

Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, Alger
Ecole Doctorale de Biotechnologies Végétales
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Biotechnologies Végétales
Option : Biotechnologies Végétales

*Etude de l'effet du stress hydrique sur une collection de lignées de *Medicago truncatula**

Par :

CHAFAI Saïd

Directeur de Thèse M. ABDELGUERFI A., Pr. ENSA
Co-Directeur de Thèse Mme LAOUAR M., MR. INRAA
11-07-2012

Soutenu à l'ENSA, le : 11 / 07 / 2012 devant le jury composé de : Président Mme MEKLICHE L., Pr.
ENSA Examineurs M. MOUHOUCHE B., Pr. ENSA M. M'HAMMEDI BOUZINA M., Pr. Univ. Chlef

Table des matières

REMERCIEMENTS . .	5
ص خ لم . .	6
Résumé . .	7
Summary . .	8
Abréviation . .	9
INTRODUCTION GENERALE . .	10
PARTIE.I DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES . .	12
I- LES LEGUMINEUSES FOURRAGERES . .	12
I-1- Importance . .	12
I-2- Classification . .	12
I-3- Le genre Medicago . .	12
II- MEDICAGO TRUNCATULA . .	13
II-1- Medicago truncatula la plante fourragère . .	13
II-2- Medicago truncatula la plante modèle des légumineuses . .	14
III- L'EAU ET LES PLANTES . .	15
III- 1- Importance de l'eau dans la vie des plantes . .	15
III-2- L'état hydrique du sol . .	16
III-3- L'état hydrique de la plante . .	17
III-4- L'efficacité de l'utilisation de l'eau . .	18
IV- LE STRESS HYDRIQUE ET LES PLANTES . .	18
IV-1- définitions . .	18
IV-2- Phase critique et phase sensible au manque d'eau . .	19
IV-3- Les stratégies de réponses au stress . .	19
IV-4- Mécanisme moléculaire de la tolérance à la sécheresse . .	20
PARTIE II. MATERIELS ET METHODES . .	22
I- Protocole expérimental . .	22
I-1- Le matériel végétal . .	22
I-2- Dispositif expérimental et facteurs étudiés . .	22
II- Conduite de l'essai . .	23
II-1- Préparation du substrat et remplissage des pots . .	24
II-2- Mise en place de l'essai sous serre en plastique . .	24
II-3- Entretien de l'essai . .	24
II-4- Estimation des besoins hydrique . .	25
II-5- Les cycles de stress hydrique . .	27
III- Les variables étudiées . .	28
III-1- Avant le stress hydrique . .	28
III-2- Pendant le stress hydrique (les deux modalités) . .	28
III-3- A maturité . .	30
IV- Analyses des données . .	31
IV-1- Indices de stress . .	31

IV-2- Analyses statistiques . . .	32
IV-3- Les corrélations. . .	32
PARTIE III. RESULTATS ET DISCUSSION . .	33
CHAPITRE 1. RESULTATS ET INTERPRETATIONS . .	33
I- CARACTERISATION DES GENOTYPES EN CONDITION HYDRIQUE OPTIMALE . .	33
II- CARACTERISATION DES GENOTYPES SOUS STRESS HYDRIQUE . .	40
III- ANALYSES MULTIVARIEES . .	57
CHAPITRE II. DISCUSSION GENERALE . .	63
1- En conditions hydriques favorables . .	63
2- En conditions hydriques stressantes . .	64
Conclusion Générale . .	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . .	72
ANNEXES . .	78
ANNEXE I :ANOVA à un seul facteur étudié chez la modalité 'T'. . .	78
ANNEXE II : Moyennes des consommations hydriques mesurés chez <i>modalité 'T' (51apports)</i> . . .	78
ANNEXE III :ANOVA de la consommation hydrique de la modalité 's' durant les trois cycle de stress. . .	79
ANNEXE IV :ANOVA a deux (2) facteurs étudiés (lignées et traitements). . .	80
ANNEXE V : ANOVA des <u>DRI</u> des 29 caractères étudiés. . .	81
ANNEXE VI :LES CORRELATIONS. . .	82

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Allah tout puissant pour le courage et toute la patience qu'il m'a donné pour surmonter toutes les difficultés rencontrées durant tout mon cursus scolaire et universitaire.

Je tiens à exprimer ma gratitude au directeur de cette thèse **M . ABDELGUERFI A .**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'avoir accepté de m'encadrer et aussi pour sa disponibilité, sa patience, sa gentillesse, pour avoir mis à ma disposition une documentation précieuse et également pour ses conseils qui m'ont permis d'achever ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent à la co-directrice de cette thèse **Mme. ABDELGUERFI M .** pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires et pour avoir contrôlé mon travail afin qu'il soit le plus correct possible.

J'adresse mes remerciements à **Mme MEKLICHE L .**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury d'examen.

Je tiens à remercier également **M. MHAMDI BOUZINA M .**, professeur à l'université de Chleff, pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier **M. MOUHOUCHE B .**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, pour ses informations et ses conseils très utiles concernant ce sujet d'étude. Je le remercie aussi pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à M. AIT HAMMOU, directeur de la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie, INRAA de Mehdi Boualem, à la directrice du laboratoire de physiologie, à M. SEMIANI du laboratoire météorologique, à ammi HAMID et tous le personnel qui travaille avec lui FAOUZI, ZOUHIR, BOUDJEMAA et ammi BACHIR de la station, qui n'ont pas hésité à m'accorder leurs aide et soutien.

Je remercie spécialement le groupe de travail sur le terrain : les doctorants CHEDDAD J, Mme BOUKECHA D. et DAHLIA F., les magisters KRIMAT M., RAHAL K., MALEK N. et l'ingénieur DALIA pour leurs efforts, aide et patience surtout pour la mise en place de l'essai et lors de la réalisation des récoltes.

Je remercie également tous mes camarades de la promotion 2009-2011 de Biotechnologies Végétales sans oublier mes camarades de l'ENSA ex-INA qui m'ont soutenu tout au long de mon cursus.

Je remercie profondément tous les membres de la famille pour leur soutien.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ص خ لم

تهدف هذه المتكزة إلى دراسة تأثير الإجهاد المائي على سلوك بعض فصائل من نبات الفصاة *Medicago truncatula* و أجريت الدراسة في محطة التجارب بالمعهد الوطني للبحوث الزراعي لمهدي بوعلام بالجزائر العاصمة تحت بيت بلاستيكي و تم تطبيق الإجهاد المائي على 3 دورات منفصلة بيوم واحد من الانتعاش المائي لمدة متوسطة قدرها 3 اسابيع. يحمل مخطط التجربة المكون من اربع تكرارات على 56 وعاء لكل واحد موزعة على 12 . فصيلة محلية من هذا النبات، و استخدم نبات واحد من نفس العائلة كشاهد *Medicago polymorpha* .

عدة خصائص نباتية يمكنها أن تقصر التكيف مع ندرة المياه . وأظهر تحليل التباين أن تأثير النوع انبائي و النظام المائي و كذا تقاطعها كان كبيرا على بعض الصفات بما في ذلك النمو و محصول القرون. أما بالنسبة لمعدل الإجهاد، ومعدل شيخوخة الورق، ومكونات الإنتاج العلفي، وكفاءة استخدام المياه فإن النظام المائي كان له التأثير الأكبر. أما بالنسبة لعدد و وزن البذور و كذا وزن القرون فإن الإجهاد المائي كان له تأثيرا إيجابيا بنسبة قليلة، لكن يبقى أن الاختلافات هي أساسا بسبب تأثير الأنواع النباتية دون أن نلاحظ وجود التقاطع بين عاملي الدراسة النظام المائي و الأنواع النباتية. وأظهرت النتائج كذلك أن الفصائل ذات الإزهار المتأخر تتميز بنمو بطيء، تفرعات كثيرة للأضراس و إنتاج كبير للثمار (القرون) بعكس الأنواع ذات الإزهار المبكر . كما تظهر النتائج أن الأنواع ذات الاستهلاك الكبير للماء تعطي دائما الإنتاج الأكبر خاصة من الحلف وهذا تحت نظام سقي عادي بدون نقص أو تحت الإجهاد المائي.

الكلمات المفتاحية: الفصاة *Medicago truncatula* _ الإجهاد المائي _ التنوع _ كفاءة استخدام المياه _ الإنتاج العلفي _ القرون _ البذور

Résumé

La présente contribution a pour objectif d'étudier l'effet du stress hydrique sur le comportement de lignée de *Medicago truncatula*. L'étude a été menée sur le site expérimental de l'INRAA de Mehdi Boualem d'Alger, sous un abri serre. Le stress a été appliqué sur 3 cycles interrompus d'une seule journée de rétablissement sur une période moyenne de trois (3) semaines. L'essai a été conduit selon un dispositif Cris-Cross avec 4 blocs comportant chacun 56 pots. Le matériel végétal est constitué de 12 lignées locales et d'un témoin représenté par l'espèce *Medicago polymorpha*. Les résultats obtenus ont permis de constater une importante variabilité sur l'ensemble des lignées.

Un grand potentiel productif a été constaté chez l'ensemble des génotypes étudiés concernant la production en matière sèche et en grains. Sous stress hydrique, plusieurs caractères phénologiques et agronomiques peuvent expliquer l'adaptation au stress hydrique. Ces caractères sont affectés d'une manière différente et à des degrés variables. L'analyse de variance montre que pour certains caractères notamment de croissance et du rendement en gousses par plante, l'effet était très significatif pour les lignées, les traitements ainsi que leur interaction. Pour le taux d'avortement, le taux de sénescence des feuilles, les composantes du rendement fourrager ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'eau, c'est l'effet traitement hydrique qui domine sans que l'interaction ne soit significative.

Enfin, sur le poids de la gousse et les caractères du rendement en graines, le stress hydrique cette fois-ci avait une action légèrement positive, mais il reste que les différences sont dues essentiellement à l'effet lignées et sans noter l'existence de l'interaction traitement*lignées. Les résultats montrent également que les lignées tardives se caractérisent par une croissance faible, une ramification plus importante et donnent particulièrement un important rendement en nombre de gousses. Il a été mis en évidence aussi qu'une bonne consommation hydrique était toujours corrélée positivement avec une meilleure performance productive sous les deux régimes hydriques humide et sec.

Mots clés : *Medicago truncatula*, stress hydrique, variabilité, matières sèche, efficacité, gousses, graine,

Summary

This thesis aims to study the effect of water stress on the behavior of *Medicago truncatula* lines. The study was conducted at the experimental site of INRAA Mehdi Boualem of Algiers, under a shelter green house. The stress was applied to three (3) cycles interrupted by one recovery day for an average of 3 weeks. The trial was carried out according to Cris-Cross experimental design of 4 blocks each carrying 56 pots. The plant material consists of 12 local lines and a control represented by the species *Medicago polymorpha*. The results revealed significant variability across all lines.

A great productive potential was seen in all genotypes studied for production in dray matter and pods. Under water stress, several phenological and agronomic traits may explain the adaptation to water stress. These characters are affected in a different way and to varying degrees. Analysis of variance showed that for some characters including growth and pod yield per plant, the effect was very significant for lines, treatments and their interaction.

For the abortion rate, the rate of leaf senescence, yield components and water use efficiency is the treatment effect which dominates but without a significant interaction. In the end, the weight of the pod and seed yield characters, water stress this time had a slightly positive actions, but the fact remains that the differences are mainly due to the effect of lines without noting the existence lines * treatment interaction. The results show also that the late lines in flowering date are characterized by low growth, a larger branch number and give particularly a large number of pods yield. It was also highlighted that much water consumption was positively correlated with better productive performance under both wet and dry moisture regimes.

Key words: *Medicago truncatula*, drought stress, , variability, dray matter, water efficiency, pods, seeds,

Abréviation

ACP	Analyse des composantes principale
DHS ou HS	différence hautement significatives
DNS ou NS	Différence non significatives
DS ou S	différence significatives
DTHS ou THS	différence très hautement significatives
HTF	hauteur des tiges B0B1
JAS	Jours après semis
LEN	longueur des entre-nœuds
MS	matière sèche
MSA	matière sèche aérienne
MSR	matière sèche racinaire
NFrB	nombre de fleurs par bouquet
NGr30Gs	nombre de graines de 30 gousses
NGrP	nombre de graines par plante
NGsB0B1	nombre de gousses sur les deux branches B0B1
NGsP	nombre de gousses par plante
NRI	nombre de ramification primaire
NRII	ombre de ramification secondaire
NRT	nombre de ramifications total
P1Gr	poids d'une graine
P30Gs	poids de 30 gousses
PFA	poids frais des parties aériennes
PFR	poids frais des parties racinaires
PFT	poids frais total
PGr30Gs	poids de graines de 30 gousses
PGrP	poids de graines par plante
PGsP	poids de gousses par plante
PrFr	précocité de floraison
PSA	poids sec des parties aériennes
PSR	poids secs des parties racinaires
PST	poids sec total
TMSA	taux de matière sèche aérienne
TMSR	taux de matière sèche racinair
TMST	taux de matière sèche total
TxAv	taux d'avortement
TxSF	taux de sénescence des feuilles
VTC	vitesse de croissance
WU	quantité d'eau utilisée water use
WUEA	efficacité d'utilisation de l'eau par rapport à la MS aérienne
WUET	efficacité d'utilisation de l'eau par rapport à la MS total

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, les météorologistes constatent des modifications des conditions climatiques à l'échelle mondiale, et surtout régionale, allant vers un réchauffement de la planète. Ce changement climatique entraîne des conditions de sécheresse prononcée, provoquant un stress hydrique d'incidence majeure sur les plantes cultivées (**Attia, 2007**). Le problème de manque d'eau se pose avec beaucoup plus d'acuité dans les régions où des cycles de sécheresse persistent posant ainsi d'énormes difficultés à la production agricole, provoquant parfois des périodes de famine récurrentes (**Baragé et al. , 2006**).

L'Algérie, du fait de son climat méditerranéen, connaît des périodes de sécheresse, en particulier estivale, qui peuvent durer plusieurs mois dans l'année. De plus, la caractéristique aléatoire des précipitations annuelles et les sécheresses imprévisibles et sévères se traduisent souvent par une situation de contrainte hydrique (**Abdelguerfi, 1994**). Mise à part la zone de l'extrême Nord-est de l'Algérie, toutes les cultures pluviales, durant leur cycle végétatif, sont soumises à des déficits de consommation en eau, parfois très importants, provoquant ainsi des stress d'intensité, de durée et/ou de fréquence variable ne permettant pas l'obtention de rendements compétitifs (**Mouhouche, 2007**).

La raréfaction de la ressource en eau et les restrictions d'arrosage qui en découlent chaque année ont poussé l'ensemble des acteurs de la filière des végétaux (producteurs, paysagistes et gérants d'espaces verts) à mener une réflexion sur le choix de plantes adaptées aux conditions sèches (**Lazrek, 2008**). Plusieurs études ont montré que, lors d'un déficit hydrique, les plantes adoptent des stratégies d'adaptation qui diffèrent d'une espèce à une autre et qui font intervenir une large combinaison de facteurs morphologiques, physiologiques et biochimiques (**Monneveux et Belhassen, 1997**).

La sélection de plantes, adaptées aux contraintes du milieu ne peut se faire qu'après les avoir soumises à l'épreuve ; c'est donc la réaction de la plante qui doit être observée dans des conditions où ses besoins (hydrique) sont volontairement insatisfaits. La seule observation des variations pluriannuelles des rendements observés chez l'espèce ne permet pas de déterminer précisément les formes de réactions qu'elle développe. L'analyse doit alors être complétée par une meilleure compréhension des mécanismes de fonctionnement de la plante ; dans le but de déterminer les mécanismes physiologiques et morphologiques d'adaptation à la sécheresse (**Baragé et al , 2006**).

Mais la question de départ que se pose un améliorateur des plantes est comment déterminer les facteurs limitant ou bien les éléments des mécanismes qui font balancer les plantes vers une résistance ou une tolérance ? Une approche comparative entre des plantes sensibles et résistantes doit être adoptée pour les détecter. Toutefois, il est important que cette différence de comportements soit reliée à une différence de tolérance et pas à d'autres différences (**Lazrek, 2008**).

Parmi les ressources prises en compte depuis plus de deux décennies, le genre *Medicago*, les espèces de ce genre se développent dans différentes régions qui ne sont pas épargnées des risques de sécheresse en Algérie. De ce fait, les différences de comportement entre les populations, face aux contraintes en eau constituent un élément important à considérer dans le choix du matériel végétal à introduire directement dans les systèmes fourragers (**Laouar et al. , 2000**). En plus de l'intérêt agronomique de ce

genre, à travers *Medicago truncatula*, il présente un intérêt particulier dans le domaine de la génomique. En effet, *Medicago truncatula* est une espèce modèle des légumineuses qui a permis d'accumuler beaucoup de données valorisables sur d'autres espèces plus stratégiques (luzerne, pois chiche...).

Le présent travail, s'intéresse à cette espèce modèle qui est une luzerne annuelle largement répondeuse en Algérie, appelée aussi la luzerne tronquée.

L'objectif visé est l'étude de l'effet du stress hydrique sur des lignées de *Medicago truncatula* en comparaison à des lignées sous condition hydrique optimale et, par le suivi du changement de comportement des plantes traduisant l'effet de la contrainte hydrique. Le but donc est d'étudier les réponses des lignées, leur variabilité, en vue de sélectionner les lignées les plus contrastées vis-à-vis d'un stress hydrique appliqué au stade plein floraison. Il s'agit d'évaluer la croissance, d'apprécier les performances de production (rendement en biomasse et en grains) et, d'analyser le comportement phénologique des plantes. L'objet ici n'est nullement de déterminer les conditions hydriques optimales de croissance de l'espèce, mais de rechercher des lignées qui utilisent efficacement l'eau. C'est donc la recherche des plantes qui tolèrent un stress hydrique sans perdre de leur caractère productif.

Douze (12) lignées de *Medicago truncatula*, appartenant à différentes populations et à différentes régions de l'Algérie, ont été conduites sous condition hydrique optimale et sous condition de stress, à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRAA) de Mahdi Boualem de Baraki-Alger.

Le mémoire de thèse sera présenté sous forme de 3 chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique relative à *Medicago truncatula* et aux mécanismes d'adaptations à la sécheresse ;
- Le deuxième présente les matériels et les méthodes utilisés ;
- Le troisième chapitre concerne l'analyse biométrique de caractères morphologiques et agronomiques chez les lignées soumises à un déficit hydrique en conditions contrôlées (serre). Enfin, le mémoire se termine par une conclusion dégageant quelques perspectives de ce travail.

PARTIE.I DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

I- LES LEGUMINEUSES FOURRAGERES

I-1- Importance

Suivant les régions, l'élevage repose essentiellement soit sur des systèmes performants de production fourragère (Europe occidentale) soit sur une activité de cueillette (pacage sur les parcours naturels) dans les pays du sud de la Méditerranée. Quel que soit le type d'élevage, les stratégies d'alimentation du bétail font appel à une large gamme d'espèces dont les rôles sont complémentaires et parfois redondants. Les plantes à vocation fourragère et/ou pastorale sont constituées pour l'essentiel par les graminées et les légumineuses. Les légumineuses, par leurs intérêts agronomique, alimentaire et écologique, se trouvent actuellement au centre des préoccupations des instances internationales. Leur importance est due entre autres à leur contribution à la fixation d'environ 65 millions de tonnes d'azote atmosphérique intégrés dans la biosphère (**Graham et Vance, 2003**). L'utilisation des légumineuses fourragères semble actuellement s'orienter plus vers des objectifs relatifs à l'amélioration durable de l'environnement en particulier pour favoriser la remontée biologique des milieux dégradés.

I-2- Classification

Les Légumineuses ou *Fabaceae* représentent une famille importante et variée des Angiospermes. En effet, il s'agit de la troisième plus grande famille chez les plantes supérieures avec plus de 720 genres et 20 000 espèces allant de la luzerne, espèce herbacée, aux arbres composant les forêts tropicales d'Amérique Latine et d'Afrique Tropicale (**Cronk et al ., 2006**). Les Légumineuses sont classiquement divisées en trois sous-familles : les *Caesalpinoideae*, les *Mimosoideae* et les *Papilionoideae* (ou *Faboideae*). La plupart des espèces cultivées appartiennent à cette dernière sous-famille (**Tab. 1**).

I-3- Le genre *Medicago*

Il comprend 56 espèces annuelles diploïdes ($2n=16$) et pérennes tétraploïdes ($2n=4x=32$). Une seule espèce arbustive (*M. arborea*) a été recensée. Les formes annuelles sont réputées comme étant autogames, les tétraploïdes sont préférentiellement allogames (**Abdelkefi et Marrakchi, 1998**). Ces espèces peuvent valoriser les parcours dégradés en zone aride (Maghreb, Péninsule Ibérique) et participer à la revégétalisation des "pare-feu" et des territoires perturbés et marginaux sur l'ensemble du pourtour Méditerranéen (**Abdelguerfi et al. , 1988a**). La relation entre milieu d'origine des cultivars sélectionnés et la capacité d'adaptation au milieu de culture et d'exploitation des Medics est régulièrement confirmée par les différents travaux. En Algérie, les travaux d'**Abdelguerfi (1976)** et d'**Abdelguerfi et al . (1988b)** ont permis de recenser 17 espèces de luzerne annuelle

dont *Medicago polymorpha* a l'écologie la plus large et la plus fréquente sur 202 relevés à travers le territoire national.

Tab. 1 : Classification des légumineuses de la famille des Papilionoideae, nombre de chromosomes et taille du génome des principales Légumineuses (d'après Zhu et al., 2005).

Tribu	Genre	Espèce	Nombre chromosomes	Taille du génome (Mb/1C)	Auto- Compatible
Trifolieae	<i>Medicago</i>	<i>M. truncatula</i>	2n=2x=16	466	Autogame
		<i>M. sativa</i> (luzerne cultivée)	2n=4x=32	1715	<i>Allogame</i>
	<i>Trifolium</i>	<i>T. pratense</i> (trèfle violet)	2n=2x=14	637	<i>Allogame</i>
		<i>T. repens</i> (trèfle blanc)	2n=4x=32	956	<i>Allogame</i>
	<i>Melilotus</i>	<i>M. officinalis</i> (mélilot officinal)	2n=2x=16	1103	<i>Allogame</i>
Viceae	<i>Pisum</i>	<i>P. sativum</i> (petit pois)	2n=2x=14	4337	Autogame
	<i>Vicia</i>	<i>V. faba</i> (fève)	2n=2x=12	13059	Autogame
	<i>Lens</i>	<i>L. culinaris</i> (lentille)	2n=2x=14	4116	Autogame
Cicereae	<i>Cicer</i>	<i>C. arietinum</i> (pois chiche)	2n=2x=16	931	Autogame
Loteae	<i>Lotus</i>	<i>L. japonicus</i> (lotier japonais)	2n=2x=16	466	Autogame
Phaseoleae	<i>Phaseolus</i>	<i>P. vulgaris</i> (haricot commun)	2n=2x=22	588	Autogame
	<i>Vigna</i>	<i>V. radiata</i> (haricotmungo)	2n=2x=22	515	Autogame
	<i>Glycine</i>	<i>G. max</i> (soja)	2n=2x=40	1103	Autogame
	<i>Cajanus</i>	<i>C. cajan</i> (embrevade)	2n=2x=22	858	Autogame

II- MEDICAGO TRUNCATULA

II-1- *Medicago truncatula* la plante fourragère

II-1-1- Description morphologique

C'est une plante annuelle herbacée, ramifiée au port souvent rampant de 15 à 80 cm de long. Elle porte des feuilles trifoliolées (**Lesins et Lesins 1979**). L'inflorescence porte 1 à 5 petites fleurs jaunes donnant après autofécondation des gousses cylindriques très dures, en forme de vrilles renfermant 3 à 12 graines. Le poids de 1000 graines oscille entre 3,3 et 6 g (**Prosperi et al., 1995**). Les spires jointives de la gousse portent des épines recourbées perpendiculaires au plan des spires. Les graines de cette plante ont une durée de vie supérieure à 40 ans, et une dormance qui peut être levée facilement. *M. truncatula* a un cycle de vie court qui varie de 2 à 3 mois. C'est une espèce diploïde (2n=16) (**Lesins et Lesins, 1979**).

II-1-2- Systématique et taxonomie

Selon **Heyn (1963)**, le genre *Medicago* est subdivisé en cinq sections ; *Medicago* (Hemynocarpos), Orbicularis, Lupularia, Falcago, Spirocarpos. *Medicago truncatula* appartient à la section des Spirocarpos qui comprend 27 espèces annuelles. **Heyn (1963)** distingue trois variétés botaniques de *M. truncatula* :

Medicago truncatula* var. *truncatula ; elle est caractérisée par une longueur de gousses supérieur au diamètre (7 à 12 mm de hauteur), 5 à 8 spires fortement serrées, des épines non incurvées plus ou moins collées à la gousse ***Medicago truncatula* var. *longispina*** ; elle est caractérisée par une longueur de la gousse inférieure ou égale au diamètre (7 à 10mm de hauteur), 5 à 8 spires légèrement serrées, des épines incurvées plus ou moins collées à la gousse.

Medicago truncatula* var. *tricycla ; elle est caractérisée par des épines parfois de grande taille supérieure à celle de la gousse. Cette dernière possède une taille plus réduite, 5 à 6mm de hauteur, et présente 2 à 4 spires.

II-1-3- Habitat et répartition géographique

Le pourtour Méditerranéen est l'aire de distribution naturelle des *Medicago* annuelles. Dans ce continuum éco-géographique, les espèces annuelles se retrouvent dans tous les étages bioclimatiques, de l'humide au saharien. L'espèce *M. truncatula*, prospectée presque dans toutes les zones agro-climatiques du territoire national, se classe, en fréquence, juste après *M. polymorpha* (**Abdelguerfi et al. , 1988b**). *M. truncatula* et *M. polymorpha* sont considérées comme des formes ubiquistes. Les travaux de **Abdelguerfi et Laouar (1998)** sur l'autoécologie de légumineuses spontanés en Algérie montrent que *Medicago polymorphe*, *M. truncatula*, *M. orbicularis*, *Hedysarum glomeratum*, *Scorpiurus muricatus* subsp. *sulcatus*, *Trifolium scabrum* et *T. angustifolium* ont la dispersion la plus large. La fréquence de *M. truncatula* augmente proportionnellement avec l'altitude, mais diminue au-dessus de 800m.

II-2- *Medicago truncatula* la plante modèle des légumineuses

II-2-1- Nécessité d'une plante modèle pour la famille des légumineuses

truncatula a été proposée comme légumineuse modèle en raison de ses nombreux atouts aux niveaux de la biologie (plante annuelle, cycle réduit), de la génétique (autogame, $2n=16$, génome petit de 550 Mpb μmillion base pair') et des différents outils génomiques qu'elle offre (possibilité de transformation, excellentes populations mutantes) et de large collections de divers écotype. (**Young et al 2009**). De plus, *M. truncatula* présente une grande syntonie avec beaucoup de légumineuses cultivées tels que le pois et la luzerne pérenne (**Zhu et al. 2005**).

Par ailleurs, à l'encontre d'*Arabidopsis thaliana* qui a été choisi comme plante modèle pour les crucifères et du Riz pour les céréales, *M. truncatula* présente une bonne interaction symbiotique et source de résistance aux parasites, permettant ainsi le transfert des acquis sur cette plante modèle vers ces légumineuses. Ces avantages sont mis à profit pour des études de génomique fonctionnelle et structurale en vue de l'identification des gènes agronomiques intéressants, ainsi que l'étude des interactions légumineuses*agents pathogènes et symbiotes (**Cook et al . 2000**).

II-2-2- Une clé de phénologie pour caractériser les phénotypes de *Medicago truncatula*

Récemment, **Moreau et al . (2006)** ont établi une clé normalisée de phénologie pour caractériser les phénotypes de *Medicago truncatula*. Cette clé a été établie en utilisant la lignée, Jemalong A17. Cependant, il peut être utilisé pour analyser tous les génotypes. Un

système de nomenclature qui peut être utilisé pour communiquer clairement les stades de développement sans description détaillée (Fig. 1).

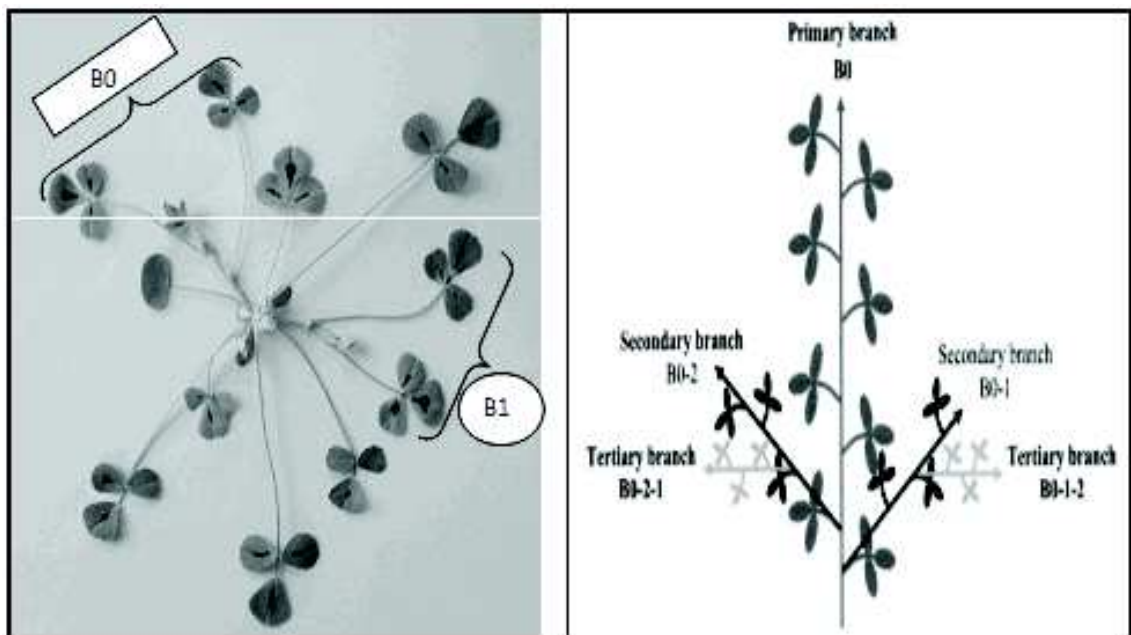


Fig. 1 : Schéma de l'arrangement des organes végétatives de *Medicago truncatula*, en (A) : les branches primaires et en (B) : les branches secondaires et tertiaires sur une branche primaire. D'après **Moreau et al . (2006)**.

- Selon les mêmes auteurs, seul le taux d'apparition des feuilles sur les deux premières branches primaires (B0 et B1) s'est révélée être un trait génotypique qui était indépendant de l'environnement (**Moreau et al. , 2006**). Ainsi, les stades de développement des plantes ne peuvent être déterminés qu'à partir d'observations effectuées uniquement sur B0 et B1 qui sont les plus représentatifs pour caractériser les génotypes.
- Des observations répétées et régulières peuvent être effectuées tout au long du cycle végétatif mais, en raison de la linéarité de ces relations pour les branches primaires, seulement 3 ou 4 dates d'observations sont suffisantes pour étudier les taux de développement.

III- L'EAU ET LES PLANTES

III- 1- Importance de l'eau dans la vie des plantes

L'eau est un facteur important pour la plante, non seulement comme constituant des cellules et des tissus mais, elle assure :

- Dissolution des éléments minéraux du sol
- La croissance et développement des plantes
- La photosynthèse (donneur d'électrons)
- La turgescence cellulaire qui donne la rigidité aux tissus végétaux ;

- Le maintien de la structure biochimique de la cellule et ses constituants ;
- Le transport des éléments minéraux et des substances organiques ;
- La régulation thermique pour dissiper la chaleur absorbée sous forme de radiations solaires ;
- La source d'éléments essentiels et nécessaires pour le métabolisme en participant d'une manière directe à de nombreuses réactions biochimiques.

III-2- L'état hydrique du sol

- L'état hydrique du sol peut être caractérisé soit par *la teneur en eau* (quantité d'eau dans le sol), soit par *le potentiel hydrique* du sol qui définit le travail requis pour déplacer l'eau de sa situation actuelle à son état libre. Le rapport entre les deux variables détermine la capacité de rétention du sol. Pour utiliser l'eau contenue dans un sol ou un support de culture, la plante doit présenter un *potentiel hydrique* inférieur à celui du sol. On peut dire que le potentiel de l'eau contenue dans la plante est plus bas que celui de l'eau dans le sol : « la succion » de la plante est supérieure à celle du sol. (Tiercelin, 2006). Le flux hydrique qui traverse la plante, correspond donc à un abaissement du potentiel de l'eau. Ce flux est facilité par des différences de potentiels élevés. Mais, lorsque la tension du sol atteint un certain niveau, les plantes ne peuvent plus extraire l'eau, même s'il en reste dans le sol car cette proportion d'eau est trop fortement retenue par le sol. Cela signifie que cette eau n'est pas disponible pour les plantes et la réaction est la suivante : la plante ressent un stress appelé stress hydrique.

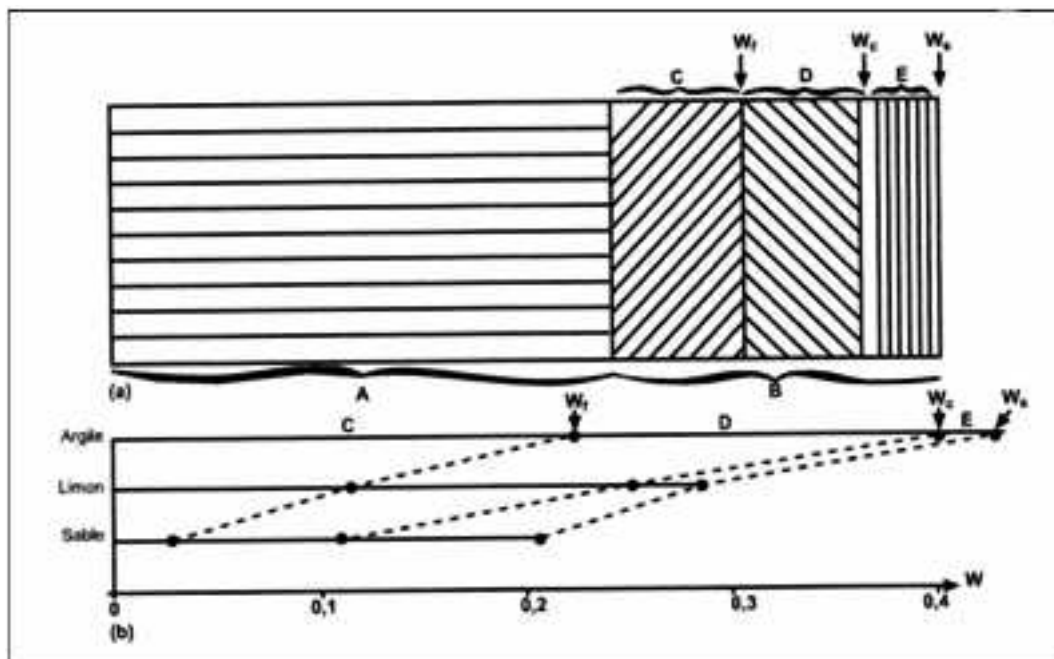


Fig. 2 : Schéma représentant les particules solides, le milieu poreux et les humidités caractéristiques du sol.

- a) Volumes occupés dans le sol par A : les éléments solides ; B : L'espace poreux ; C : L'eau inaccessible aux racines ; D : L'eau retenue dans le sol et accessible aux racines ; E : L'eau soumise à la gravité. b) Ordres de grandeur, selon le sol, du point de flétrissement

permanent (wf), de la capacité au champ (wc), et de l'humidité à saturation (ws). D'après **Cruziat (1990)**.

- La capacité de rétention passe de 10-15% pour les sols sableux à quelques 25-30% pour les sols plus fins, limoneux et argileux. Le potentiel hydrique à la capacité au champ (CC) est compris entre -0,01 et -0,04 MPa.
- La teneur en eau au point de flétrissement permanent (PFP) varie de quelques 45% pour les sols sableux à 15-20% pour les sols limoneux et/ou argileux (**Rieul, 2000**). Le potentiel hydrique correspondant est situé aux environs de -1,5 MPa (-15bars) qui correspond à environ 20% dans un sol argileux.
- l'eau disponible pour la plante est la différence entre la teneur en eau à la CC et celle du PFP.

III-3- L'état hydrique de la plante

III-3-1- Les indicateurs de l'état hydrique d'une plante

A côté de ces méthodes « classiques » de détermination des besoins en eau des cultures fondées sur le bilan hydrique ou la mesure de l'un de ses termes, d'autres approches parfois qualifiées de « qualitatives » par opposition aux précédentes dites « quantitatives », se développent depuis quelques années. Elles sont fondées sur l'utilisation d'indicateurs de l'état hydrique des tissus, indicateurs dont les valeurs sont déterminées par des mesures faites sur les plantes elles-mêmes. Elles sont de nature très variable ; les plus courantes sont les suivantes :

- **Le potentiel hydrique des plantes** ψ_w (*leaf water potential*) est une des variables les plus pertinentes pour caractériser l'état hydrique d'un échantillon végétal. Elle se mesure très aisément grâce à la technique de la chambre de pression ou **chambre de Scholander (Cruziat, 1990)**. En l'absence de déficit en eau, ses valeurs sont en général comprises entre **-2 et -4 bars** chez les plantes annuelles. Durant la journée, sous l'effet du déséquilibre entre transpiration et l'alimentation hydrique, la dépression augmente alors de **-8 à -20 bars** selon les cultures et condition climatique. Les valeurs extrêmes sont observées au midi solaire (**Rieul, 2000**). Considérant la biomasse de la plante comme un indicateur de tolérance à la sécheresse, le déficit en eau n'a pas un effet clair sur la biomasse des plantes de *Medicago truncatula*, à une valeur potentiel hydrique foliaire autour de **-1,4 ± 0,06 MPa** qui provoque une baisse importante sur la culture du pois et de soja (**G.Ivez et al, 2005**). La diminution était seulement statistiquement significative, quand leur potentiel hydrique foliaire était autour de **-2,3 MPa (Gonz. Iez et al, 2007)**.
- **La teneur en eau relative TRE (ou relative water content RWC)**, permet de connaître le niveau de saturation en eau ou de turgescence de la plante. La TRE est une mesure indépendante du poids de la feuille. Elle est déterminée de la façon suivante : $RWC = [(MF - MS)/(MT - MS)] \times 100$; MF, MS, MT= Masse de Matière Fraîche, Sèche et Turgescence .

La TRE des feuilles qui transpirent normalement est de 85 %. Si TRE < 80%, le métabolisme est complètement changé, la photosynthèse est arrêtée et la transpiration augmente. On constate aussi une accumulation de la proline et d'Acide abscissique (ABA) (**Aid, 2010**). Le Seuil critique qui provoque la mort est d'environ 50%.

- **La résistance stomatique (r_s)** constitue un bon critère d'appréciation des conditions d'alimentation hydrique et par là de l'état hydrique d'une culture : en conditions d'éclairement suffisant, une résistance stomatique faible reflète un état hydrique satisfaisant (tissus bien hydratés, $\square f$ peu négatif) ; une résistance stomatique élevée indique un état hydrique déficitaire (flétrissement, $\square f$ assez négatif). La détermination d'une valeur moyenne de r_s , représentative d'une culture exige donc un très grand nombre de mesures locales obtenues par des mesures directes porométriques (**Cruiziat, 1990**).
- **La température foliaire.** On sait que la transpiration de l'eau au niveau des feuilles refroidit ces dernières. Ainsi, en réponse à un dessèchement les stomates se ferment, la transpiration baisse et la température des feuilles augmente. Comme tous les corps, les végétaux émettent un rayonnement dont les caractéristiques varient avec leur température. Aux températures usuelles des végétaux, le maximum de rayonnement émis se situe dans l'infra-rouge thermique. On peut alors mesurer à l'aide d'un petit radiomètre portatif la différence de température de surface foliaire entre une parcelle irriguée et une parcelle non irriguée (**Rieul, 2000**).

III-4- L'efficacité de l'utilisation de l'eau

Définition

L'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) pour les fourrages, est définie comme le rapport de l'accumulation de matière sèche (DM) à la consommation d'eau (WU) sur une saison. L'augmentation de WUE pourrait théoriquement affecter la croissance des plantes. Lorsque l'eau est limitée, la productivité des plantes qui utilisent l'eau de manière plus efficace serait affecté positivement, comme chez les arachides (**Dwivedi, 1996**). La relation $DM = WU \times WUE$ montre que la matière sèche produite augmente avec l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour une quantité d'eau utilisée constante. Ainsi, lorsqu'on sélectionne pour la tolérance à la sécheresse, aussi bien la productivité de la biomasse que WUE devraient être considérées comme caractères importants. WUE montre une grande variation entre les espèces et la variation pourrait également être élevée au sein des espèces (**Jensen et al. , 2002**). WUE peut être mesurée à trois niveaux : (i) à l'échelle de la feuille unique par les échanges gazeux, (ii) à l'échelle de la plante entière cultivée dans des conteneurs, et

(iii) à l'échelle du couvert végétal basé sur l'évapotranspiration dans le champ (**Egert, 2002**).

IV- LE STRESS HYDRIQUE ET LES PLANTES

IV-1- définitions

La sécheresse est un terme complexe liée à la zone géographique et au climat. Elle se caractérise par un déficit hydrique défavorable à la faune et à la flore. Elle se scinde en trois grandes catégories : la sécheresse météorologique représentée par les faibles précipitations, la sécheresse hydrologique mesurable à partir du niveau des nappes et, enfin, la sécheresse agraire identifiable à partir de la disponibilité en eau du sol. Il convient

de parler de sécheresse lorsque la pluviométrie ne compense plus les pertes d'eau du sol, dues à l'évapotranspiration.

Parmi les stress abiotiques, le stress hydrique édaphique peut se définir comme un déficit de disponibilité en eau pour la plante. L'origine de ce déficit peut venir d'une salinité excessive du sol, d'une sécheresse ou du gel qui par cristallisation des molécules d'eau diminue sa disponibilité. Mais, en général, différents stress sont combinés et un stress ayant pour origine la sécheresse peut également devenir un stress thermique (par augmentation de la température des organes) et un stress oxydatif (par altération des structures cellulaires (Chaumeil, 2006).

IV-2- Phase critique et phase sensible au manque d'eau

Souvent, le rendement commercialisable ne concerne qu'un organe particulier du végétal (feuilles, fruits, graines...). Or, cet organe possède un rythme de développement et de croissance particulier. L'état de sécheresse aura sur cet organe une importance d'autant plus grande qu'il sera dans un stade de développement plus actif ou une phase de croissance plus rapide. Une sécheresse d'intensité constante pourra avoir une répercussion catastrophique ou nulle sur ce rendement, selon la localisation dans le temps. Il est donc très important de bien connaître les périodes auxquelles le végétal présente une réaction plus ou moins marquée vis-à-vis du manque d'eau. On peut alors distinguer deux cas :

- *les phases dites sensibles*, intéressant surtout la croissance végétative (en poids) des organes végétatifs ;
- *les phases dites critiques*, intéressant essentiellement le développement de la plante et plus spécialement les périodes de formation des organes reproducteurs. Ces phases sont d'autant plus marquées que la période de formation des ébauches est plus courte et qu'il existe moins de possibilité de compensation par le tallage ou par la formation d'un organe floral secondaire, comme c'est le cas pour le maïs. Chez un certain nombre de plantes (betterave sucrière, lin, sorgho, graminées fourragères...), il existe une possibilité de compensation partielle (ou totale) des effets de sécheresse antérieure dès que l'alimentation hydrique redevient satisfaisante. Ces « rétablissements » se produisent pendant la période de croissance racinaire dominante. Ce sont donc les racines qui profitent le plus de cet effet. Ainsi s'explique l'importance des effets des pluviométries d'arrière-saison sur le rendement de certaines cultures dont les climats comportant souvent une certaine sécheresse d'été (Cruziat, 1990).

IV-3- Les stratégies de réponses au stress

Les réponses de la plante sont multiples et si certaines sont spécifiques d'un stress, d'autres sont des réponses communes aux agressions extérieures. Chaque espèce va répondre au stress par des stratégies de résistance différentes lui permettant de survivre. **Chaves et al . (2003)** détaillent les mécanismes de résistance à la sécheresse. Ils sont groupés

en trois catégories même si ces mécanismes ne sont pas exclusifs et qu'une plante combine toute une gamme de types de réponses :

- L'échappement concerne les espèces capables d'accomplir leur cycle de vie avant que le déficit physiologique en eau n'intervienne. C'est le cas des plantes des régions arides effectuant leur cycle reproductif après une pluie et dont les graines supportent

de longues périodes de sécheresse. Cette stratégie ne s'applique pas aux plantes à longévités comme les arbres. Cette stratégie appliquée aux espèces cultivées a amené à décaler la date de semis et/ou à sélectionner des variétés plus précoces permettant d'éviter les déficits hydriques de fin de cycle.

- L'évitement consiste à maintenir le potentiel hydrique satisfaisant et à limiter au maximum les pertes d'eau par transpiration pour se prémunir de l'exposition au stress. Certaines plantes ferment très rapidement leurs stomates, d'autres limitent la masse foliaire, présentent des feuilles modifiées ou conservent les feuilles âgées pour se protéger du rayonnement solaire. Les feuilles sont aussi parfois munies de cuticules épaisses. Une allocation du carbone privilégiant un système racinaire profond et développé permet également d'optimiser l'accès aux ressources en eau.
- La tolérance à la sécheresse est le résultat de mécanismes physiologiques, biochimiques et moléculaires complexe permettant de supporter le stress. L'expression de différents gènes et l'accumulation de divers osmolytes (l'ajustement osmotique) couplés à un système antioxydant efficace sont souvent les principaux mécanismes de tolérance au déficit hydrique. Plusieurs de ces mécanismes ont été caractérisés chez différentes plantes (**Ramanjulu et Bartels, 2002**). Dans le cas des plantes tolérantes, les processus déclenchés par les premiers signaux impliquent des contrôles de la transcription activant les mécanismes de réponse au stress qui maintiennent ou rétablissent l'homéostasie, facilitent la rétention ou l'accumulation de l'eau, protègent le fonctionnement du chloroplaste et l'intégrité de la membrane cellulaire (**Vinocur et Altman, 2005**). Les espèces végétales ne présentent pas toutes la même plasticité de réponse au stress. Certaines caractéristiques sont déterminés génétiquement qu'il y ait présence du stress ou non, comme un système racinaire profond, un système foliaire constitué d'aiguilles ou un fonctionnement photosynthétique du type **CAM** (*Crassulacean Acid Metabolism*) (**Chaves et al., 2003**). De telles adaptations morphologiques et physiologiques donnent un avantage sélectif à une population au cours de l'évolution.

IV-4- Mécanisme moléculaire de la tolérance à la sécheresse

IV-4-1- Perception et transduction du signal

Avant l'activation de gènes par des facteurs de transcription, les voies de transduction du signal commencent par la perception du signal du stress par un ensemble de capteurs (comme la diminution du potentiel hydrique, la diminution de la pression de turgescence, la concentration de petites molécules etc.) suivi par la génération de seconds messagers comme l'Inositol phosphate et les espèces réactive d'oxygène ERO (ou ROS reactive oxygen species) qui vont entraîner une variation de la teneur en Ca^{++} qui à son tour déclenche des cascades de phosphorylation jusqu'à l'activation finale de facteurs de transcription (**Kaur et Gupta, 2005**). Les gènes régulés par ces facteurs peuvent être impliqués dans la biosynthèse de molécules comme l'ABA qui agira comme signal sur de nouvelles voies de transduction. Les cascades faisant intervenir les « *mitogen-activated protein kinases* » (MAPK) sont probablement le mécanisme de transduction majeur chez les plantes.

IV-4-2- Les gènes induits par le stress

Il est important de noter que *l'effet individuel de ces gènes* sur la tolérance à la déshydratation est *souvent faible*. 44 gènes sont impliqués en réponse à la déshydratation chez *Arabidopsis* (**Seki et al., 2001**). D'autre part, les gènes impliqués dans la réponse au stress sont de *deux types* ; *gènes à réponse immédiate* (secondes, minutes), fournissent une protection vis à vis du stress et une amplification initiale des signaux de transduction et *gènes à réponse tardive* (heures, jours, semaines), impliqués dans l'adaptation. Les produits de gènes inductibles par le stress sont classés en deux groupes : (I) ceux qui protègent directement contre les stress (protéines et enzymes de synthèse) et, (II) les produits de gènes incluant des facteurs de transcription, qui régulent l'expression de gènes et les voies de transduction du signal.

Le schéma ci-dessous (**Fig. 3**) résume d'une manière générale les mécanismes moléculaires exhibés par la plante lors du stress hydrique, ainsi que certaines stratégies du génie génétique utilisées pour l'amélioration du comportement des plantes vis-à-vis de la sécheresse.

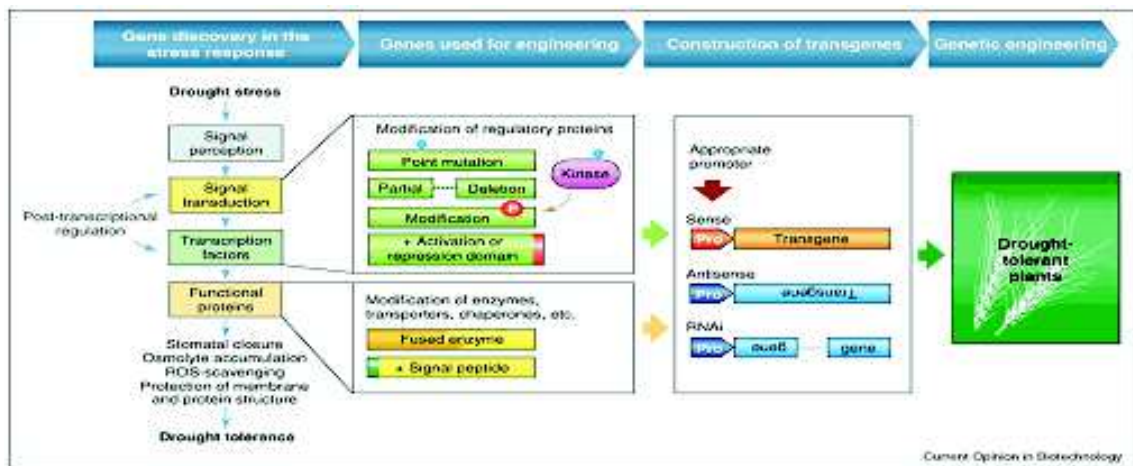


Fig. 3 : Stratégies du génie génétique pour la tolérance au stress hydrique (Umezawa et al., 2006)

Les analyses moléculaire et génomique ont facilité la découverte des gènes impliqués dans la tolérance à la sécheresse, qui peuvent ainsi être utilisés en génie génétique. Dans cette approche, une gamme de gènes peuvent être employés entre autre les gènes codant pour des protéines tels que les protéines de transport et les chaperonnes. Pour le génie métabolique, la fusion enzymatique est communément utilisée pour cibler de multiples étapes. Dans certains cas, des peptides de signal sont ajoutés pour faire des protéines travaillent au bon endroit cellulaire. Des études récentes ont mis l'accent sur le rôle des protéines régulatrices, comme les facteurs de transcription et les facteurs de signal qui ont ouvert une nouvelle route au génie de la tolérance au stress (**Umezawa et al., 2006**).

PARTIE II. MATERIELS ET METHODES

L'essai a été conduit durant la campagne 2010/2011. L'expérimentation est réalisée sous une serre plastique à la station expérimentale de l'Institut National de Recherche Agronomique d'Algérie de Mahdi Boualem (Baraki, Alger). La station de Mehdi Boualem est située dans la plaine sub-littorale de la Mitidja. Les coordonnées de la station sont :

- Altitude : 19m
- Latitude : 36°, 48' Nord
- Longitude : 3°, 06' Est

I- Protocole expérimental

I-1- Le matériel végétal

Quatorze (14) génotypes : Treize (13) lignées de *M. truncatula* et une lignée de *M. polymorpha* (utilisée comme témoin) originaires de différentes régions de l'Algérie ont été choisies pour l'étude de l'effet du stress hydrique à la floraison. (**Tab. 2**). Après la levée, douze (12) lignées de *M. truncatula* ont été retenue, une lignée (L14) a été éliminée à cause de son faible taux de levée.

Tab. 2 : Les ligné étudiées.

Nb	Noms des lignées	Abréviation	Pluvio (mm)	Altitude (m)	Origine
	<i>M. polymorpha</i>	L5T (témoin)	500	19	Mehdi Boualem
1	252-123	L1	613	30	Tipaza
2	299-185	L2	386	350	Maghnia
3	310-209	L3	449	670	Sidi Ali Youb (Telagh)
4	334-270	L4	1324	820	Yacouren
5	405-340	L6	347	720	Chelgoum El Aid
6	418-370	L7	750	950	Djemila
7	429-393	L8	350	650	El Aouinet
8	432-406	L9	550	850	Meskiana
9	433-407	L10	450	950	Ain Berda
10	440-439	L11	450	1050	Tazoult
11	443-452	L12	250	1050	Arris
12	444-457	L13	250	650	Beni Srour

I-2- Dispositif expérimental et facteurs étudiés

L'essai a été conduit suivant un dispositif expérimental de type CRIS CROSS avec quatre (4) blocs disposés perpendiculairement à la longueur de la serre (Fig. 4). Chaque bloc est partagé en 2 sous blocs. Dans chaque sous bloc, il y a deux facteurs, le premier correspond aux « lignées » et le deuxième au « régime hydrique ». Le nombre de lignées est de 14 et celui du régime hydrique est de 2 (sec et humide). Ce qui revient à 28 pots par sous bloc. Les traitements des deux facteurs sont disposés au hasard. Le dispositif comprend donc deux facteurs de même importance d'étude, l'un est disposé en ligne (lignées) et l'autre en colonne (régime hydrique).

Le nombre total de pots est de 224 (14 génotypes x 2 régimes hydriques x 2 répétitions x 4 blocs).

Les plantes ont été toutes conduites à l'ETM jusqu'au stade pleine floraison où la disponibilité en eau a été réduite pour le traitement sec. En effet, deux modalités d'arrosage; l'une dite « stressante » et l'autre dite « normale ou sans restriction hydrique » ont été adoptées.

Remarque : Pour éviter toute confusion, nous appelons les lignées du niveau 1 conduites à l'ETM « **modalité T** », celles du niveau 2 seront la « **modalité S** », alors que l'espèce *Medicago polymorpha* utilisée comme témoin de nos lignées étudiées sera nommée directement « **Témoin** ».

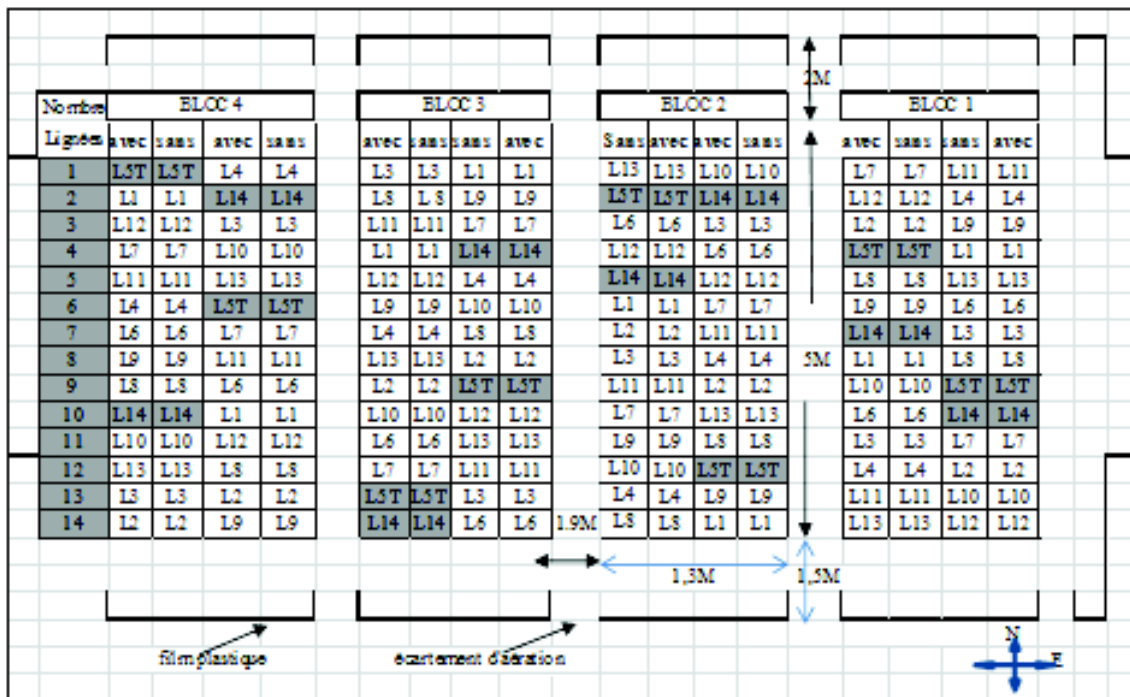


Fig. 4 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai (sous serre)

Avec : traitement ou modalité **avec** irrigation

Sans : traitement ou modalité **sans** irrigation

II - Conduite de l'essai

II-1- Préparation du substrat et remplissage des pots

Des pots en plastique de 21,5cm de profondeur, de 23cm de diamètre au sommet et de 13cm de diamètre à la base sont remplis avec 450 g de gravier placé au fond des pots (pour aérer la terre et pour faciliter la percolation de l'eau). Les pots sont ensuite remplis par 4600 g de substrat jusqu'à atteindre le poids de 5300 g du pot. Un seul substrat a été utilisé qui est un mélange de 1/3 terre, 1/3 tourbe et 1/3 sable de rivière. Il est à noter que la terre et le sable ont été tamisés à 5mm avant de faire le mélange. La terre a été prélevée des 20 premiers centimètres du sol, sur le site expérimental de l'INRAA de Baraki (Alger).

II-2- Mise en place de l'essai sous serre en plastique

La serre est de 30 x 8,5 m, la toiture est couverte avec un film plastique jouant le rôle de protection contre des apports éventuels d'eau par les pluies. L'aération est assurée par les deux portes d'extrémité et par les écartements latéraux du film plastique. Un film plastique noir couvrant toute la surface de terre dans la serre a été mis en place. Ce film permet d'éliminer les mauvaises herbes et éviter de créer des conditions favorables au développement des ravageurs et maladies surtout celles cryptogamiques (**Fig. 5**). Quatre tables en fer (5x1,30x1 m) sont conçues spécialement pour cet essai. Chaque table formée de quatre rangés représente un bloc portant 56 pots.



Fig. 5 : La serre avant culture (11/01/2011)

Avant d'effectuer le semis, une pré-irrigation excédentaire a été réalisée, à raison de 1550ml (une bouteille d'eau minérale) par pot. Les pots ont été ainsi à la capacité de rétention maximale. Le semis a été réalisé le 18 Janvier 2011. Deux heures après la pré-irrigation des pots, le semis a été réalisé à une profondeur allant de un à deux centimètres à raison de quatre (4) graines par pot pour toutes les lignées. Le démariage et la transplantation ont été effectués simultanément 20 jours après le semis, ceci pour assurer au moins un plant par pot. Les pots ne présentant aucun plant ont subi donc une transplantation.

II-3- Entretien de l'essai

Aucun engrais n'a été apporté aux plantes durant tout le cycle de culture. Un traitement phytosanitaire a été appliqué au mois de Mai (mi-Mai) contre l'attaque de l'oïdium.

Ce dernier se développe à la surface des feuilles et forme des colonies arrondies d'aspect blanc poudreux. Après deux traitements avec un fongicide systémique, le développement du champignon s'est complètement arrêté. Le fongicide est de matière active « Methylthiophanate 70% », c'est une poudre qui se prépare avec de l'eau pour faire le mélange de traitement, avec une dose pour les cultures légumières de 70g/HL.

Un autre traitement avec insecticide a été appliqué contre les Fourmies, qui sont attiré par la tourbe. Les Fourmies peuvent faire des dégâts, car en faisant des trous, exposent les racines au dessèchement, la plante par conséquent peut mourir. Les mauvaises herbes sont éliminées manuellement dès leur apparition et aucun herbicide n'a été utilisé. L'aération de la serre se fait chaque jour par écartement des bandes plastiques, dans le but d'atténuer les amplitudes thermiques et d'éliminer l'excès de chaleur et d'humidité accumulée à l'intérieur de la serre. Mais dès que la période de stress est terminée, ces bandes sont laissées ouvertes jour et nuit, jusqu'à la fin de l'expérimentation.

II-4- Estimation des besoins hydrique

- Pour le calcul de **la capacité au champ**, le protocole suivant a été suivi : un échantillon du substrat est placé dans un cylindre dont la base a été remplacée par un grillage à mailles très fines (tamis). La base du cylindre est immergée dans l'eau jusqu'à ce qu'une pellicule d'eau affleure à la surface de l'échantillon (phase de saturation). Le cylindre est alors transféré sur une surface sèche pendant 24 heures pour drainer l'excès d'eau (phase de ressuyage). Elle est exprimée en pourcentage (grammes d'eau retenus pour 100 g de sol sec). Les échantillons, révèlent une capacité au champ de **38,27%**, par conséquent notre pot qui pèse 4373,74g de substrat sec (105°C après 24 h) aura par déduction une capacité de rétention de **1673,83g**.
- **Les besoins en eau des plantes** sont déterminés par la méthode dite directe en utilisant les pots lysémétriques, cette méthode permet de calculer le bilan hydrique qui se traduit par la formule suivante :

Bilan = apport – départ

Bilan : l'eau consommée WU (ml), Apport : irrigation (ml), Départ : l'eau de drainage (ml)

42 assiettes ont été mises sous les pots, à raison de trois pots par lignée, réparties sur trois (3) blocs (B1, B3 et B4) pour recueillir l'eau de drainage (**Tab. 3**). Des verres de 70, 150, 300, et de 400 ml ont été utilisés pour maîtriser les apports d'eau, alors que les eaux drainées récupérées dans l'assiette sont d'abord versées dans un seau de 1L puis mesurée à l'aide d'une éprouvette de 150ml.

Tab. 3 : Suivi des mesures de la consommation hydrique pour les deux modalités.

MODALITE	Nombre de pots et blocs concernés
Modalité T	3 pots lysémétriques (suivi journalier) B1, B3, B4
Modalité S	3 pots lys. (mesure à la fin de chaque cycle de stress) B1, B3, B4

La maîtrise des quantités apportées et drainées a une grande importance en raison de leur emploi ultérieur dans l'estimation de l'efficacité d'utilisation de l'eau. Le suivi de la consommation en eau (WU) se fait tous les jours du semis jusqu'à la fin de l'expérimentation pour les plantes de **la modalité T (témoins)** ; la **modalité S** (sec) permet d'estimer la consommation des plantes durant la période de stress, à la fin de chaque cycle de stress.

Depuis le semis (18/01/2011) jusqu'au 20/05/2011 (**Fig. 6**), le nombre d'irrigations enregistré est de 51 apports, pour la **modalité T** conduite à l'ETM sans restriction hydrique. Toutes les irrigations faites donc après le 20/05/2011 jusqu'à la fin de l'expérimentation (le 20/06/2011) ne sont pas enregistrées.

- Pour le **contrôle de l'évaporation** trois pots avec un substrat identique à celui de l'expérience, mais non semé, ont été inclus dans l'expérience pour la détermination de l'évaporation. Les pots ont été placés au hasard dans les blocs.



Fig. 6 : La serre après culture (06/04/2011).

Les données climatiques de la période d'essai sous serre, notamment la température et l'hygrométrie, ont été enregistrées à l'aide du thermo-hygromètre durant une période d'expérimentation allant du 24/03/2011 (10^e semaine après semis) au 31/05/2011 (18^e semaine après semis). (**Fig.7**)

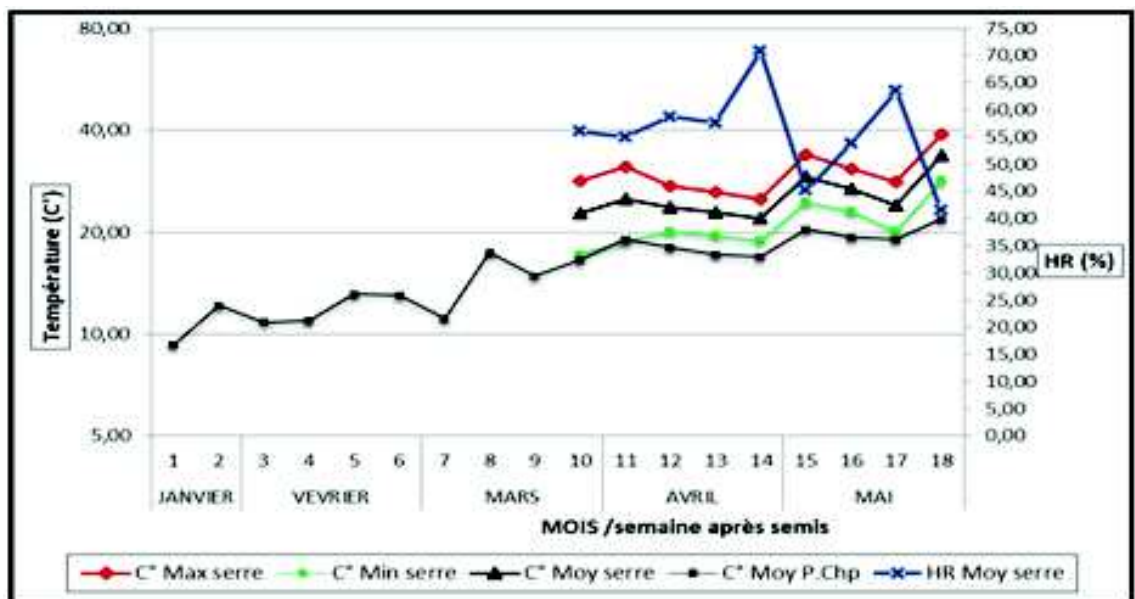


Fig. 7 : Minima, maxima et moyennes hebdomadaires de températures et d'humidités sous serre, et en plein champ caractérisant la période de la saison expérimentale.

Les températures mensuelles minimales nocturnes sous serre étaient respectivement 10,40 ; 12,62 et 15,46 C° pour les mois de Mars, Avril et Mai.

Ces conditions climatiques caractérisant la serre expérimentale ont affecté d'une manière directe l'évaporation mesurée par la méthode lysométrique (**Tab. 4**). En effet, la 14^e semaine après semis (la dernière semaine du mois d'Avril), est la plus humide, ceci entraîne l'épuisement « lent » des réserves hydriques. Pour les plantes stressées coïncidant avec cette période, le cycle de stress sera par conséquent plus long.

Tab. 4 : Mesures lysométriques de l'évaporation sous serre (en ml).

Mois	JAVIER		FÉVRIER				MARS				AVRIL				MAI		
SmAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
EVP (ml)	/	/	/	63	49	63	60	89	95	84	120	126	150	69	183	210	196

II-5- Les cycles de stress hydrique

Le stress hydrique a été appliqué au stade plein floraison. Il a été appliqué dès qu'au moins 4 plants/16 ont commencé leur floraison. Vu que la floraison a été échelonnée, le stress a été appliqué progressivement durant trois cycles sur une période moyenne de trois semaines, chaque cycle est interrompu par une période courte de rétablissement d'une (1) journée avec une irrigation à la capacité maximale de rétention (**Fig. 8**).

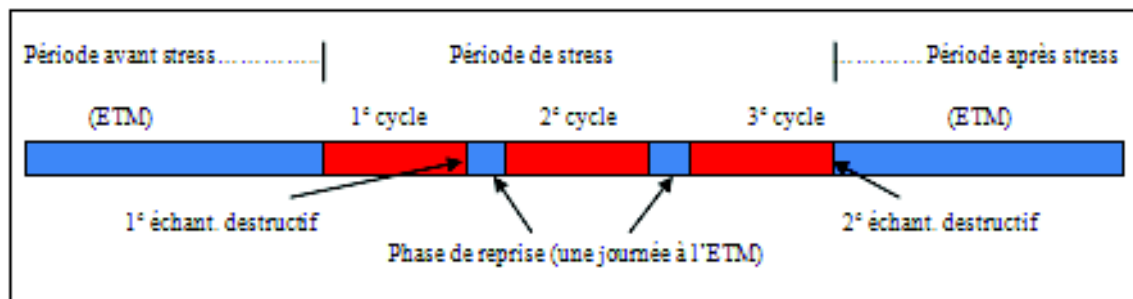


Fig. 8 : Schéma des fréquences des stress.

Pour atteindre des taux de tarissement semblables entre les différents génotypes, la règle de décision de l'irrigation des plantes stressées dépend d'une part, de l'aspect flétrissement de la plante qui est essentiellement pris en considération pour la décision de l'arrêt du stress (**Mouhouche., 2011**), mais d'autre part, de la quantité d'eau consommée par la modalité *T* correspondante, cette quantité *devrait* être égale à celle consommée par la modalité *T* du témoin au même cycle de stress.

Les quantités d'eau donnée aux plantes stressées à la fin du cycle, ont été fractionnées sur trois ou quatre apports, ceci est dû au fait que le dessèchement du substrat change son comportement provoquant sa rétraction et crée un espacement tout au tour du pot, entraînant un faux drainage (l'eau sort dès le premier apport alors que le sol n'est pas encore saturé). Il est à noter aussi qu'aucune plante n'est perdue (morte) sous l'effet du stress.

III- Les variables étudiées

III-1- Avant le stress hydrique

- La croissance et développement des plantes

Excepté la précocité de floraison où le nombre d'observations égale au nombre total de pots, deux tiges (B0 et B1) par plante et un pot par bloc ont été pris pour chaque lignée pour les mesures suivantes :

- La croissance des plantes par 5 mesures des hauteurs (**HT1...HT5**) des tiges B0 et B1 et, les vitesses de croissance (**VTC1...VTC5**), qui leur correspondent.
- La précocité de floraison (**PrF**) est le nombre de jours écoulés depuis le semis jusqu'à l'apparition de la première fleur par plante /bloc.
- Le nombre de fleurs formées par bouquet **NFrB1** au stade bouton floral, sur deux bouquets par plante pris au hasard à proximité de l'apex sur B0 et B1.
- Comportement hydrique des plantes au cours des cycles de développement

Ce comportement est étudié à travers le suivi de l'évolution des consommations des 51 apports effectués pour la **modalité T** depuis le semis (18/01/2011) jusqu'au 20/05/2011.

Pour 26 apports successifs parmi les 51 (du 16/02/2011 au 14/04/2011), nous avons utilisé trois (3) assiettes pour mesurer les différences de consommation journalières entre les lignées. Pour les autres apports (avant 16/02 et après 15/04/2011), WU a été estimé par une et parfois deux assiettes seulement.

III-2- Pendant le stress hydrique (les deux modalités)

La biomasse aérienne (BA) est récoltée en coupant le plant au niveau du collet puis elle est immédiatement ensachée pour éviter les pertes du poids par transpiration. Après la pesée de la matière fraîche, les échantillons sont mis à l'étuve pendant 48h à 80°C pour avoir la matière sèche. Les racines (BR) par contre ne sont pas récoltables directement, il fallait renverser les pots et les laver par un jet d'eau pour les nettoyer. La présence de la tourbe qui colle aux racines, a rendu l'opération un peu délicate. Les racines pures obtenues sont ensuite séchées entre deux feuilles de papiers buvard et, sont directement ensachées car elles sont plus sensibles au dessèchement que les parties aériennes. La matière sèche est obtenue à 80 C° après 24h à l'étuve.

Au cours de notre expérimentation nous avons réalisé deux échantillonnages destructifs (**Tab. 5**) ; le premier est effectué vers la fin du premier cycle concernant **3 pots** de la modalité T (uniquement) et, le deuxième est effectué à la fin du stress de chaque lignée pour les deux modalités **T (3 pots)** et **S (4pots)**. Les pots restant des deux modalités (2 pots mod.'S' et 4 pots mod.'T' par lignée) sont laissés jusqu'à la maturité pour la récolte des gousses.

Tab. 5 : Résumé des rendements effectués au cours de l'expérimentation.

Les rendements effectués	Rendement en biomasse		Rendement en gousses
	1 ^e éch. destructif	2 ^e éch. destructif	
Modalité T	3 pots B1, B2, B3	3 pots B1, B2, B4	2 pots B3, B4
Modalité S	/	4 pots B1, B2, B3, B4	4 pots B1, B2, B3, B4

III-2-1- La fin du premier cycle de stress

- Rendement en biomasse et l'efficacité en eau à la fin du premier cycle de stress

Le rendement en biomasse aérienne (poids frais **PFA1**, poids sec **PSA1** et taux de matière sèche **TMS1**) et racinaire (**PFR1** et **PSR1**) estimé sur 3 pots (plantes) par lignée, est réalisé au stade pleine floraison pour chaque lignée.

WUE correspond à la matière sèche de la biomasse aérienne (PSBA1) et totale (PSBT1 = PSBA1 + PSBR1) produite, divisée sur WU durant la même période. Nous aurons par conséquent deux estimations : **WUEA1** et **WUET1**. Elle a été donc estimée sur le même nombre de pots du rendement en biomasse.

III-2-2- La fin du troisième cycle de stress

- La croissance et le développement des plantes à la fin du troisième cycle

Sur deux tiges (B0 et B1) par plante et un pot par bloc et pour chaque modalité, nous avons effectué :

- Les hauteurs des tiges finales (HTF) de B0 et B1, à la récolte.
- Le nombre de feuilles total (NFT) et le nombre de feuilles sénescentes (NFS) pour B0 et B1. De ces trois notations (hauteur des tiges, feuilles totale et sénescentes) on peut déduire :
 - Les longueurs des entre-nœuds : $LEN (cm) = HT / NFT$.
 - Le taux de sénescence des feuilles : $TxSF (\%) = (NFT / NFS) * 100$.
- Le nombre de fleurs formées par bouquet NFrB2 au stade bouton floral sur deux bouquets par plante pris au hasard sur B0 et B1. Nous aurons par conséquent un nombre de fleurs moyen par bouquet NFrBqM (= moyenne NFrB1 et NFrB2).

Nous appelons un nombre théorique (NTh), le nombre de fleurs (bouton floraux) qui devraient être transformées dans les conditions normales, en fleurs ouvertes et/ou en gousses. Il est égale au nombre de fleurs moyens par bouquet NFrBM multiplié par le nombre de bouquets NB sur B0 et B1 : $NTh = NFrBM * NB \dots \dots \dots (1)$

Nous appelons un *nombre réel* NR, tout ce que représentent ces mêmes bouquets matures comme gousses (NGs) et fleurs ouvertes (NFr) : $NR = NFr + NGs \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2)$

De (1) et de (2), on peut calculer le taux d'avortement (TxAv) comme suit :

$$TxAv = [(NTh - NR) * 100] / NTh$$

- Le rendement en biomasses et l'efficacité en eau à la fin du troisième cycle

Le rendement en biomasse aériennes (PFA2, PSA2 et TMS2) et racinaire (PFR2 et PSR2) est estimé sur 3 pots pour la *modalité T* et, sur et 4 pots pour la *modalité S*, par lignée.

WUE qui correspond à la biomasse sèche aérienne (PSA2) et totale (PST2 = PSA2 + PSR2) produite, divisée sur WU. Nous aurons donc : WUE.A2 et WUE.T2 pour chaque

modalité. Il faut préciser que pour le calcul de l'efficience d'utilisation d'eau (WUE), il est nécessaire de calculer WU de chaque modalité :

WU de la *modalité T* à la récolte est la somme des consommations journalières jusqu'à la récolte (1^e ou 2^e échantillonnage destructif).

WU des plantes stressées de la *modalité S* est égale à la quantité consommée avant stress plus celle consommée pendant la période du stress.

Ce deuxième échantillonnage destructif marque la fin du 3^e cycle (fin du stress) et tous les caractères notés ici concernent les *deux modalités T et S*. Les caractères sont notés une journée avant d'arrêter le stress et, la récolte concerne 3 pots *T* et 4 pots *S*, est faite le jour même de l'arrêt de l'imposition du stress et avant de faire l'irrigation. Par conséquent WU des plantes détruites à la récolte est estimée par le reste des pots « non détruits », pour les deux modalités.

III-3- A maturité

- Le rendement en gousses et en graines à maturité

A maturité, il ne reste par lignée que 2 pots *modalité T* et 4 pots *modalité S*, répartis sur les 4 blocs de la façon décrite précédemment. Les caractères liés à la récolte des gousses réalisés sont :

- Le nombre de gousses par plantes (NGsP) ;
- Le poids des gousses par plante (PGsP) ;
- Le poids d'un échantillon de 30 gousses (P30Gs) ;
- Le nombre de graines d'un échantillon de 30 gousses (NGr30Gs) ;
- Le poids de graines d'un échantillon de 30 gousses (PGr30Gs).

Environ deux semaines après la fin du stress, tous les pots qui étaient sur les tables ont été transposés par terre sur un film plastique noir dans des cellules en carré de 80cm². Pour cela, on a utilisé l'espace laissé entre les tables pour étaler le film plastique (**Fig. 9**).



Fig. 9 : Dispositif de récoltes des gousses (16/05/2011).

Pour éviter toute stagnation d'eau, le film plastique est percé laissant l'eau s'infiltrer sans qu'il perde les gousses. Les assiettes servant à l'estimation du bilan hydrique sont enlevées par la suite et les mesures quantifiant WU sont complètement arrêtées le 20/05/2011.

La récolte des gousses est faite progressivement dans le temps, à raison de deux ramassages par semaine et la dernière date de récolte coïncidait avec la sénescence totale des plantes et la fin de l'expérimentation, le 20/06/2011 (154JAS). Les gousses récoltées ont été nettoyées (feuilles, tiges...) avant d'effectuer les pesées. Le comptage a été fait manuellement. Un échantillon de 30 gousses par lignée et par traitement a été choisi pour obtenir les graines, l'opération du dégoussage a duré plus 10 jours.

IV- Analyses des données

IV-1- Indices de stress

Pour mieux évaluer l'effet du stress et permettre une meilleure sélection des génotypes tolérant, plusieurs indices de tolérance existent, le plus utilisé est l'indice de réponse au stress "*Drought response index*" (*DRI*), cité par *Rizza et al . (2004 in Abayomi et Abidoeye., 2009)* et par *Chen et al (2007 in Badri et al ., 2010.)*, est le ratio entre valeurs observées sous stress hydrique et celles observées sous de bonnes conditions d'irrigation ; c'est une mesure du changement des traits des plantes causé par le déficit hydrique. L'indice "*1-DRI*" indique l'intensité de stress '*stress intensity*' (*SI*), il représente ainsi le taux de diminution (ou d'augmentation) de la modalité S par rapport

à la modalité T. Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé le DRI, il a été calculé et statistiquement analysé.

$$\text{DRI} = \text{ratio S/T} = (\text{Valeur modalité S} / \text{Valeur modalité T})$$

IV-2- Analyses statistiques

Des données manquantes existent au niveau de certains blocs à causes des échantillonnages destructifs réalisés, ce qui a nécessité le choix d'analyses statistiques adéquates. Le nombre de donnée manquantes est égale à une donnée par lignée pour le premier échantillonnage destructif, 2 données par lignée pour le 2^e échantillonnage destructif (modalité T) et 2 données manquantes par lignée pour le rendement en grain (toujours modalité T).

Deux analyses de variances ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS/STAT® 9.1 :

- Une première analyse de variance à **deux facteurs** étudiés (régime hydrique et lignées) et un facteur contrôlé (blocs) a été appliquée pour montrer l'effet du stress sur les différents paramètres étudiés. Le Modèle proposé pour l'analyse de variance est GLM Procédure (General Linear Model), ce modèle d'analyse de variance est le plus efficient lorsqu'il existe des valeurs manquantes ou dans le cas des blocs incomplets. Le logiciel SAS calcule les variables dépendantes avec configuration équivalente des valeurs manquantes.
- Une deuxième analyse de variance à **un seul facteur** étudié (lignées) a été appliquée pour les ratios S/T des différents paramètres étudiés afin de voir le classement des lignées selon le taux de diminution provoqué par le stress. Mais pour pouvoir calculer les ratios à partir des différentes observations des deux modalités, les données manquantes ont été remplacées par les moyennes de chaque modalité correspondante. L'analyse statistique a été faite par la même procédure.

La signification des différences des moyennes est testé par le test SNK (Student-Newman-Keuls test)

IV-3- Les corrélations.

Quatre tableaux de corrélations sont réalisés correspondant aux moyennes des variables : *i)* notées pour la caractérisation, *ii)* de la modalité T, *iii)* de la modalité S et, *iiii)* du ratio S/T. Les facteurs du milieu (altitude et pluviométrie) ont été introduits comme facteurs supplémentaires.

L'analyse des composantes principales a été réalisée pour la modalité S et les DRI des caractères étudiés. Le même logiciel a été utilisé.

PARTIE III. RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 1. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I- CARACTERISATION DES GENOTYPES EN CONDITION HYDRIQUE OPTIMALE

Dans ce chapitre nous allons aborder l'étude du comportement des lignées en condition hydrique optimale, afin d'avoir une idée générale sur les différences entre les lignées étudiées en ce qui concerne certains caractères de croissance et de développement atteint avant d'effectuer le stress. Aussi, il sera étudié leur comportement hydrique à travers le suivi des consommations en eau dans ces conditions hydriques optimales.

I-1- Croissance et développement des plantes

I-1-1- La levée

Après le semis (4 graines par pots), nous avons compté le nombre total des plants levés ainsi que le nombre de pots ayant au moins un plant levé. Le taux de levée moyen est de 38,22%. Le démariage et la transplantation ont été effectués simultanément pour combler les manques, en plant par pot, chez certaines lignées. L'objectif étant d'avoir pour chaque lignée 16 plants, un plant par pot, à raison de 4 plants par bloc (**Tab. 6**). Au total 44 pots/224 (19,64%) étaient sans plantes. Après transplantation il ne restait que deux lignées L10 et L14 qui présentent des manquants. La lignée L14 a été éliminée compte tenu du grand nombre de plants manquants (9/16).

Tab. 6 : Taux de levée après semis et nombre de pots transplantés.

Lignées	Nbr. de graines/pot	Nbr. de pots	Nbr. de graines semées	Nbr. de plants levés	Levée (%)	Nb de pots ayant au moins une plantule	Nbr. pots subissant une transplantation	Nbr. de plants manquants
L1	4	16	64	33	51,56	16	0	0
L2	4	16	64	18	28,13	11	5	0
L3	4	16	64	20	31,25	11	5	0
L4	4	16	64	19	29,69	11	5	0
L5T	4	16	64	36	56,25	16	0	0
L6	4	16	64	16	25,00	12	4	0
L7	4	16	64	47	73,44	16	0	0
L8	4	16	64	32	50,00	16	0	0
L9	4	16	64	36	56,25	14	2	0
L10	4	16	64	12	18,75	09	3	4
L11	4	16	64	32	50,00	16	0	0
L12	4	16	64	19	29,69	11	5	0
L13	4	16	64	27	42,19	15	1	0
L14	4	16	64	07	10,94	06	1	9
Totaux	-	-	896	354	-	180	31	13

I-1-2- Hauteur de végétation et vitesse de croissance des plantes

Après 51 jours du semis (JAS), nous avons commencé à évaluer la croissance des plantes à travers les mesures des *longueurs des deux tiges primaires B0 et B1*. Cinq mesures ont été effectuées pour évaluer la croissance. La **figure 8** montre l'évolution des hauteurs de végétation des différentes lignées en fonction du temps.

D'après la **figure 10**, on voit que la lignée L1 présente un bon départ de croissances, mais par la suite d'autres lignées (L2 et L5T) prennent le dessus par une croissance plus rapide. A la date du 04/04/2011, (76 JAS) la hauteur moyenne des tiges B0 et B1 atteint 60,31cm pour la L2, alors que la L6 n'était qu'à 22,5cm de hauteur. Ceci est dû à la différence dans la *vitesse de croissance* qui est spécifique pour chaque lignée (**Tab. 7**). En effet, la lignée L2 possède la vitesse de croissance moyenne la plus grande (1,77cm/jour), alors que la vitesse de la lignée L6 ne représente que le tiers de la vitesse de la lignée L2 (0,65cm/jour). Les analyses statistiques ont révélé des différences très hautement significatives pour les deux caractères hauteur moyenne des rameaux (HR5) et la vitesse de croissance (VTCMoy) (**Tab. 7 et ANNEXE I.1, I.2**).

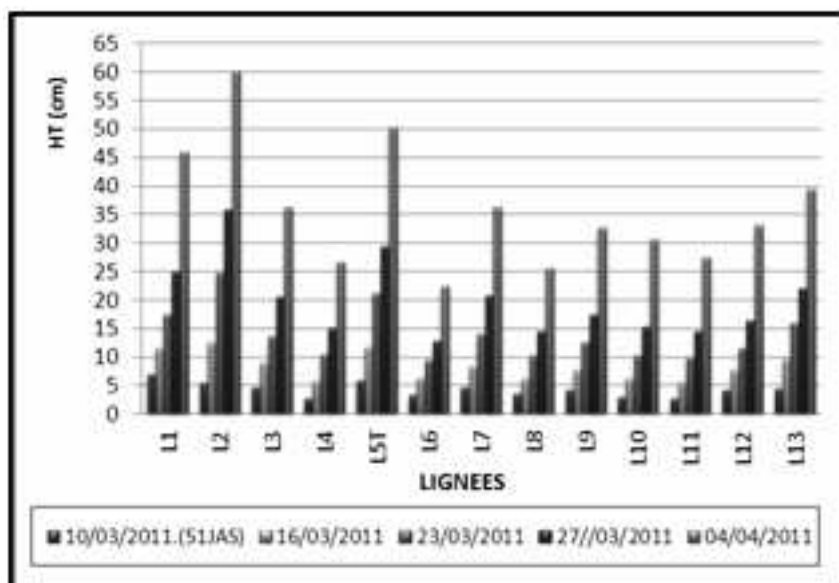


Fig . 10 : Hauteurs moyennes des rameaux B0 et B1.

Tab. 7 : Vitesse de croissance moyenne (cm/jour) des rameaux B0 et B1.

Lignées	L2	L5T	L1	L13	L3	L7	L12	L9	L10	L11	L4	L8	L6
VTCMoy	1,77	1,44	1,36	1,16	1,13	1,08	1,01	0,95	0,95	0,83	0,79	0,74	0,65
Groupes	A	B	B	C	C	C	DC	DCE	DCE	DFE	FE	F	F

I-1-3- Précocité de floraison

Pour ce caractère l'analyse de la variance montre des différences très hautement significatives entre lignées (**ANNEXE I.3**). Les résultats montrent que l'espèce témoin *Medicago polymorpha* (L5T) est la plus précoce, elle forme avec la L2 et la L13 un même groupe (Tab. 8). Une grande variabilité existe entre lignées avec un écart de 16,5 jours entre la lignée la plus précoce L2 (58 JAS) et la plus tardive L6 (74,5JAS).

Tab . 8 : Nombre de jours moyenne depuis le semis jusqu'au début floraison.

LGN	L6	L12	L1	L11	L8	L9	L4	L10	L7	L3	L13	L2	L5T
JAS	74,5	73,5	72,5	72,5	71,0	70,75	70,5	69,0	67,0	64,5	59,5	58,0	58,0
Grp	A	B A	B C	B C	D C	D C	D	E	F	G	H	H	H

I-2- Comportement hydrique des lignées au cours du développement

I-2-1- Comportement des lignées vis-à-vis de la consommation hydrique journalière

Le nombre total d'irrigation que nous avons réalisé du semis (18/01/2011) au 20/05/2011 est égale à 51 apports (**ANNEXE II**), à raison en moyenne d' une irrigation tous les 2,4 jours . Sachant qu'au départ, du 18/01/2011 au 02/02/2011 (15 jours), trois apports uniquement ont été effectués. Du 16/02/2011 au 14/04/2011, 27 apports ont été effectués et statistiquement analysés. L'analyse de la variance de ces consommations journalières montre (**ANNEXE II**):

- Qu'il n'y a pas de différence de consommation journalière entre lignées pour les sept premiers apports successifs réalisés entre le 16/02/2011 et le 10/03/2011, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune différence dans la consommation hydrique des lignées depuis le semis jusqu'à la fin de la 7^e semaine.
- Par contre, toutes les irrigations faites depuis le 13/03/2011 au 14/04/2011 révèlent des différences hautement ou très hautement significatives entre les lignées. La L5T et la L1 se révèlent les plus consommatrice d'eau.
- Enfin, la consommation moyenne journalière calculée pour tout le cycle est de 212,36ml/jour, elle varie entre 200ml et 270ml par jour chez les différents génotypes, ce qui engendre un écart de plus de **9L** d'eau depuis le semis jusqu'à la fin du cycle entre une lignée plus et une lignée moins consommatrice.

I-2-2- Évolution hebdomadaire de la consommation hydrique journalière

La **figure 9** montre la moyenne des consommations hydrique journalière par semaine. Il en résulte 17 semaines depuis le semis du 18/01/2011 au 20/05/2011(**Fig. 11**).

D'après la **figure 9**, la consommation hydrique des lignées après levée passent par trois phases essentielles :

- La première , du semis jusqu'à la fin de la 7^e semaine, les besoins des plantes n'excèdent pas les 150ml par jours, c'est la phase la plus longue, elle occupe le tiers du cycle de vie de la plante. Les consommations sont progressivement lentes et, jusqu'à la 4^e semaine sont très proches de l'évaporation, par la suite elles sont linéairement ascendantes, mais restent faibles et pas encore statistiquement différentes.
- La deuxième , de la 8^e à la 14^e semaine, la consommation hydrique des plantes suit une courbe ascendante. Les écarts de consommation par semaine sont importants avec une augmentation dépassant 100ml par semaine, créant ainsi un grand décalage avec l'évaporation. Les premières différences de consommations sont enregistrées à la 8^{èmes} semaine, ce qui correspond au début floraison qui s'étale selon nos résultats de la 9^e jusqu'à la fin de la 10^e semaine. Elle est donc liée à la mise en place de nouveaux organes (organes puits et organes réserves) de la plante. Les pics de consommations sont enregistrés entre la 12^e et la 13^e semaine après semis, puis il y a diminution jusqu'à la 14^e semaine où on enregistre une valeur très faible de l'évaporation.
- La troisième , de la 14^e à la 17^e semaine, on assiste à un autre pic de consommation hydrique par les plantes mais qui n'est pas aussi important que le premier et qui est en relation principale avec l'augmentation de l'évaporation enregistrée vers les dernières semaines. On remarque qu'après la 15^e semaine, malgré une demande climatique trop importante (évaporation toujours en hausse), les plante n'y répondent pas positivement et leur consommation ne cesse de diminuer, c'est donc lié au phénomène physiologique et/ou biologique des plantes. La moyenne de consommation de la lignée L2 atteint précocement celle de l'évaporation à la 16^e semaine, c'est une lignée à cycle court.

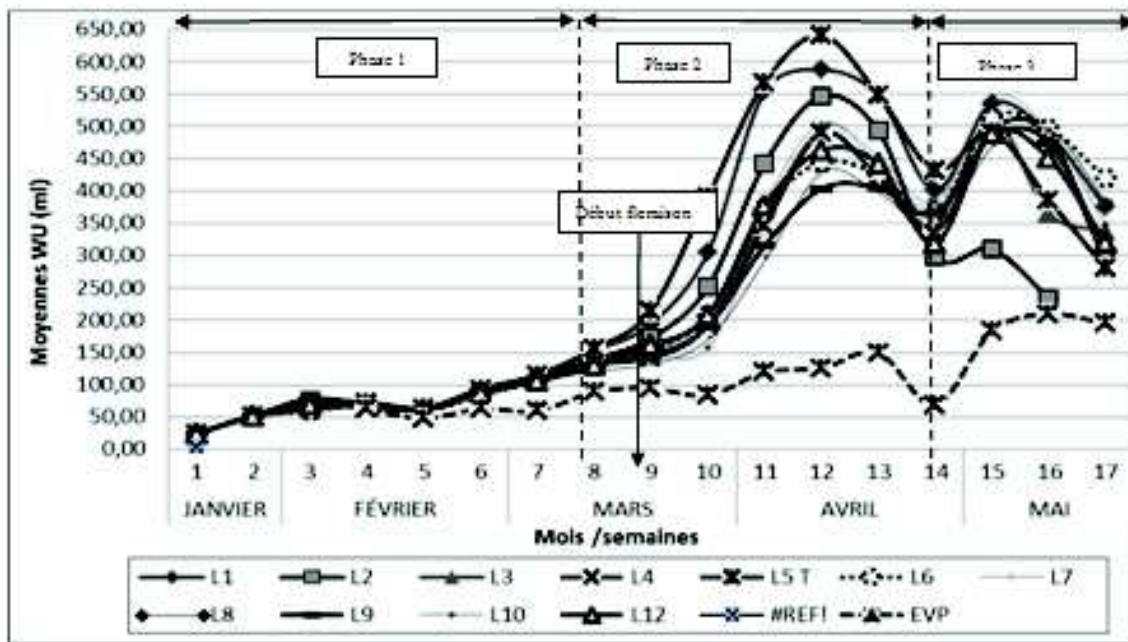


Fig. 11 : Évolution hebdomadaire de l'évapotranspiration journalière en régime humide, au cours des 17 semaines de développement.

I-2-3- Cumule de la consommation hydrique journalière

51 apports sont effectués depuis le semis du 18/01/2011 jusqu'au 20/05/2011 (fig 12). Le cumul des consommations hydriques pour le témoin L5T et les lignées de *M. truncatula* suit deux fonctions linéaires, avec une différence de 7500 ml après 122 jours, le témoin L5T et la lignée L1 sont les plus consommateurs d'eau comparés aux autres lignées. Les deux droites coupent l'axe des « X » en un même point, cela indique que la consommation pour l'ensemble des lignées étudiées est très faible pendant les premières périodes de croissance (semis-levée). En effet, elle n'atteint que les 1000 ml qu'après 22 jours du semis.

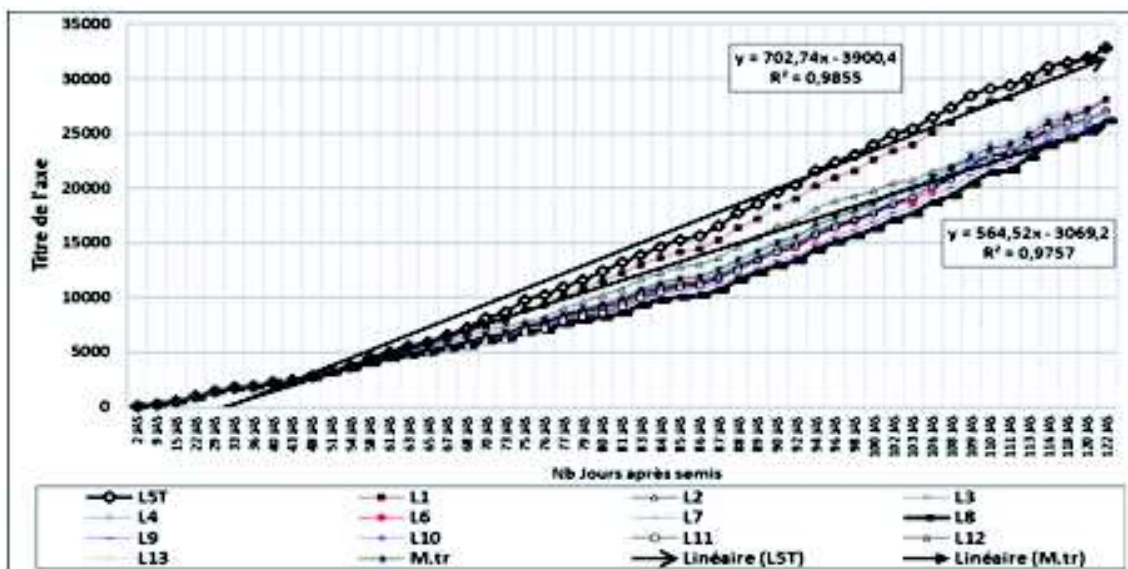


Fig. 12 : Cumule des consommations hydriques journalières en régime humide.

Les quantités totales d'eau consommées avoisinent les 29 litres par plant/lignée. La consommation hydrique moyenne de l'ensemble des plantes dépasse 390 litres d'eau, du semis à la fin des notations.

- Ces différences de consommations hydriques entre lignées et entre espèces pourront-elles entraîner des potentialités différentes, en termes de production fourragère, entre génotypes ?

I-3- Le rendement en biomasse et l'efficience en eau au stade en pleine floraison

I-3-1- Rendement en biomasse

Nous avons montré précédemment, concernant la floraison, qu'il existe une différence de 16 jours entre les lignées précoces et celles tardives. De ce fait, la notation de la biomasse a été faite à des dates différentes (**Tab. 9**) correspondant à la pleine floraison de chaque lignée. Ces dates correspondent à la fin du premier cycle du stress.

Tab. 9 : Dates de réalisation u premier échantillonnage destructif.

Lignées	L2, L5T, L13	L3, L7	L4, L8, L9, L10	L1, L6, L11, L12
Date de la 1 ^{ère} notation	29/03/2011	03/04/2011	06/04/2011	10/04/2011
Nbr. de jours après le semis	70	75	78	82

Les résultats de la **figure 13** montrent que les lignées tardives pour arriver au stade pleine floraison, elles accumulent d'abord une matière sèche (PSA) importante (> 15g) par rapport aux lignées précoces ; ces lignées fleurissent même si leur biomasse n'est pas importante (environ 6g de PSA au stade pleine floraison). Le témoin L5T bien qu'il soit le plus précoce, son PSA rejoint



Fig. 13 : Rendement en poids sec total (PST) des 13 génotypes étudiés.

celui des lignées tardives. Cette différence est due à la variation interspécifique (entre espèces).

Le nombre estimé de gousses, à partir des fleurs pour les deux tiges B0 et B1, varie entre 23,50 gousses (L1) et 2,75 gousses (L8) (**ANNEXE I. 4**). L'analyse de variance du poids frais et sec des parties aériennes et racinaires montre des différences très hautement

significatives entre les lignées (**ANNEXE I ; 5, 6, 7, 8, 9 et 10**). Ce nombre de gousses (fin 1^e cycle) sera comparé à celui dénombré en fin du 3^e cycle.

I-3-2- Utilisation et efficacité d'utilisation de l'eau

Les quantités totales d'eau consommées depuis le semis jusqu'à la récolte (ou TWU) ainsi que l'efficacité en eau sont présentées sur la **figure 14 « a » et « b »**.

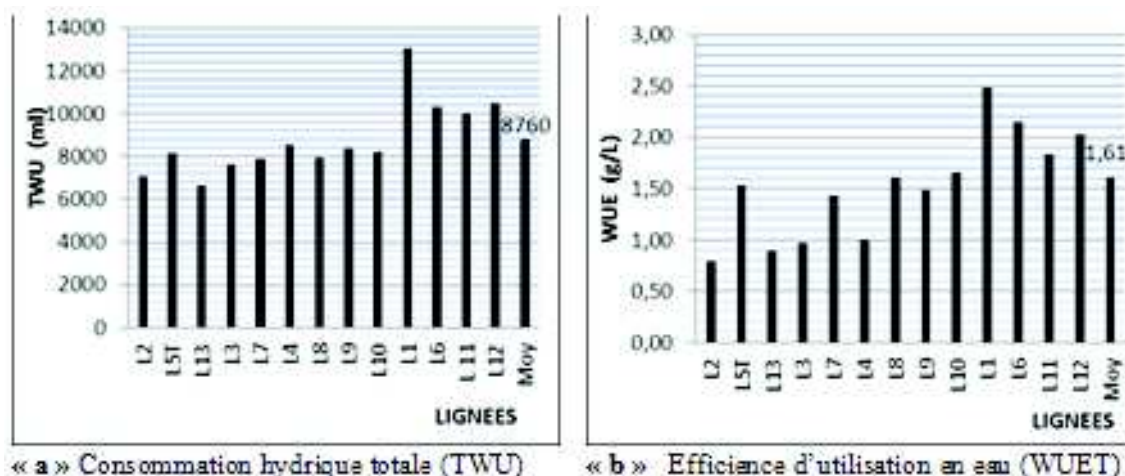


Fig. 14 : consommation hydrique totale « a » et

efficacité en eau « b » au 1^e échantillonnage destructif.

Il est clair, d'après la **figure 14 « a »**, que les lignées les plus productives sont celles les plus tardives et qui consomment le plus d'eau.

La lignée L1 (tardive) est celle qui utilise le plus d'eau. La lignée qui utilise le moins d'eau est la L3 (précoce) (**Fig. 14 « b »**).

Le témoin L5T révèle des potentialités de production fourragères très intéressantes comparées aux lignées précoces de *M. truncatula*, car malgré sa précocité son WUE (1,53g/L) est élevé (**ANNEXE I ; 14, 15**). Ce comportement doit être lié à la variation interspécifique.

Chez *M. truncatula*, il apparaît clairement que les lignées tardives sont celles qui valorisent le mieux l'eau.

Il est à rappeler que les deux génotypes L5T et L1, bien qu'ils ne se caractérisent pas par un nombre de ramifications important, produisent beaucoup de matière sèche. Ceci est dû au fait que ces deux lignées forment de vraies tiges –primaires- ligneuses d'important diamètre (non mesuré)

Nous remarquons que plus le cycle du développement de la plante est long plus l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) est grande. Le taux de matière sèche aérienne varie entre 20,55% pour la lignée tardive (L1) et 14,71% pour la lignée précoce (L2). La matière sèche racinaire varie de la même façon entre les lignées tardives et précoces respectivement, 11,63% et 8,19% (**ANNEXE I ; 11,12,13**).

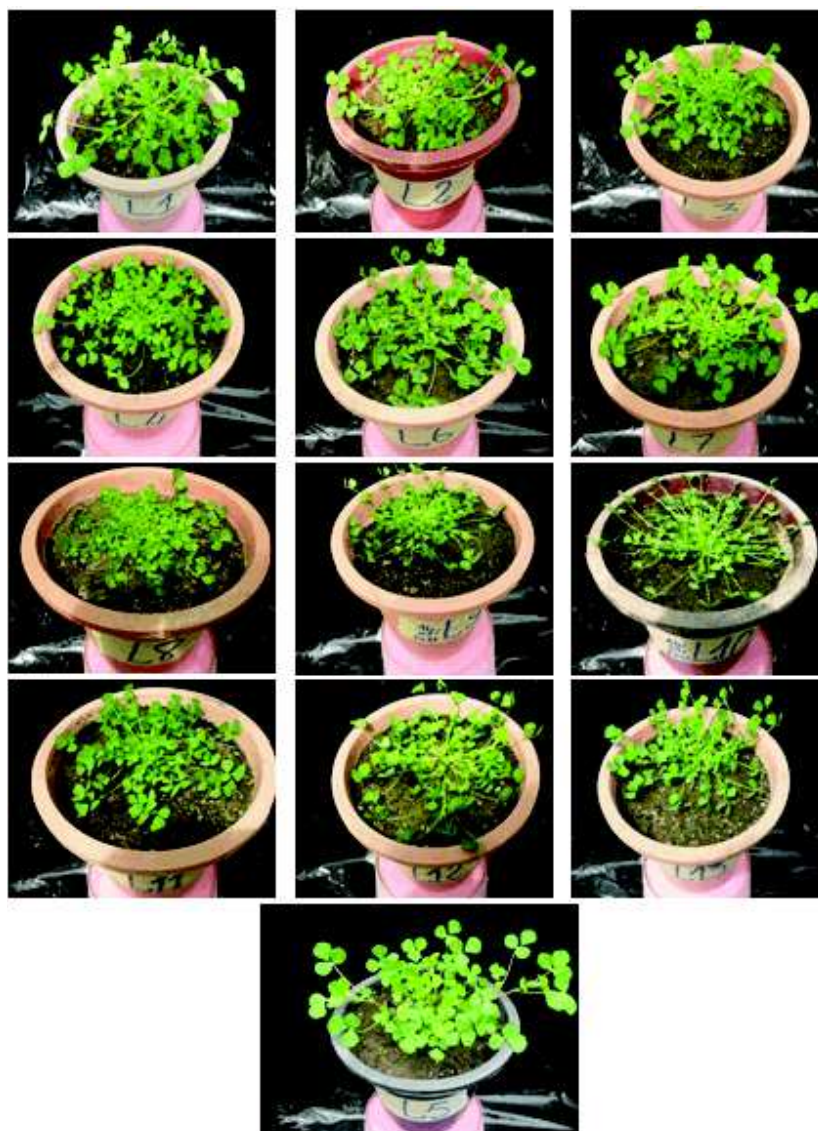


Fig. 15 : Les lignées de M. truncatula et l'espèce témoin (L5T) M. polymorpha, le 14/03/2011 (55 JAS).

II- CARACTERISATION DES GENOTYPES SOUS STRESS HYDRIQUE

II-1- Consommation hydrique durant le stress

II-1-1- Présentation des trois cycles de stress

Comme il a été indiqué en matériel et méthode nous avons réalisé trois cycles de stress ; à la fin de chaque cycle, les plantes subissent une journée d'irrigation à l'ETM, comme phase 'courte' de rétablissement. Le témoin L5T qui est le plus précoce a subi par conséquent le stress en premier.

Groupe lignées /précocité	Lignées	Dernier apport à l'ETM	1 ^{er} cycle (début floraison)	2 ^e cycle	3 ^e cycle	Total Jours	Jours de stress= TOTAL-3Jrs
1	L5T	61JAS	7J	6J	6J	19	16
	L2	//	8J	6J	7J	21	18
	L13	//	9J	6J	6J	21	18
2	L3	65JAS	9J	7J	7J	23	20
3	L7	67JAS	7J	7J	7J	21	18
4	L10	69JAS	8J	8J	8J	24	21
5	L4	70JAS	7J	6J	7J	20	17
	L8	//	7J	7J	8J	22	19
	L9	//	7J	8J	8J	23	20
6	L1	74JAS	4J	7J	8J	19	16
	L6	//	6J	7J	7J	20	17
	L11	//	6J	7J	9J	22	19
	L12	//	7J	9J	12J	28	25
Moyennes			7,08J	7,00J	7,69J	21,77J	18,77J

JAS : Jours à partir du semis

Tab. 10 : Stade d'application de la contrainte hydrique et durées de chaque cycle de stress.

Des températures basses, enregistrées du 23/04 au 30/04/2011, ont fait que les durées de stress, lors du troisième cycle de certaines lignées (L1, L8, L9, L10, L11 et L12), se sont allongées.

II-1-2- Comparaison de la consommation hydrique des deux modalités durant les 3 cycles de stress

La figure 16 (« a », « b », « c » et « d ») ci-dessous résume les résultats des consommations pour les deux modalités **T** (irrigué) et **S** (sec) durant les trois cycles ainsi que les cumuls et les ratios S/T (DRI) qui en résultent. (S/T ; WU modalité S / WU modalité T).

II-1-2-1- La consommation hydrique (WU)

La consommation (WU) de la modalité **T** est très nettement supérieure à celle de la modalité **S** pour le même cycle de stress (**Fig. 16 « a »**) ; cet écart de consommation augmente au fur et mesure des cycles pour la même lignée. La consommation moyenne passe de 2049ml à 2836ml puis à 3585ml respectivement du premier au troisième cycle avec un cumul moyen de 8471ml. Les ratios S/T sont en baisse continue passant de 0,60 au premier cycle puis à 0,46, ensuite à 0,36 au troisième cycle (**Fig. 16 « c »**).

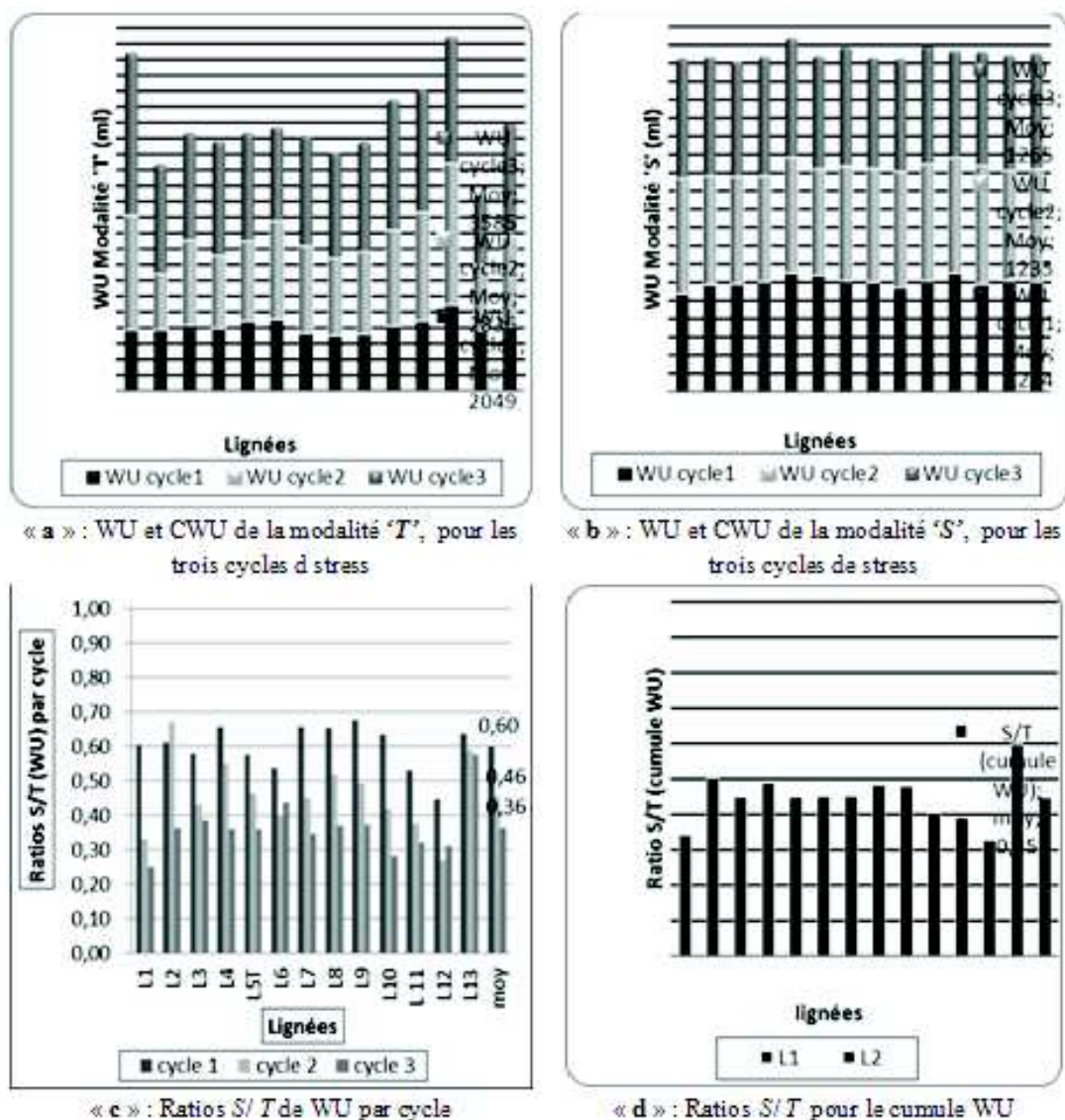


Fig. 16 : WU et cumul CWU pour la modalité T (« a ») et modalité S (« b ») pendant le stress et, ratio S/T (DRI) par cycle (« c ») et pour le cumule « d ».

L'écart moyen de consommation entre les deux modalités pour le cumule dépasse le double, il est en moyenne de 55% (ratio S/T=0,45) (Fig. 16 « d »). Les plus grands écarts de consommation (S/T = 0,34 et 0,33) sont enregistrés chez les deux lignées tardive L1 et L12 respectivement, où la modalité T consomme le triple de la modalité S correspondante, alors que les plus faibles écarts sont attribués aux deux lignées précoces L2 et L13 (valeur de S/T > 0,50).

Al'encontre de la modalité T, WU de la modalité S est gérée expérimentalement pour avoir une consommation semblable entre lignées pour les différents cycles. Nos résultats (Fig. 16 « b ») montrent que la consommation de la modalité S est en moyenne de 1200ml par cycles avec un cumule de consommation moyenne de 3700ml. Cependant, les extrêmes de variations inter-génotypes pour les différents cycles sont entre 1069ml (L1) et 1297ml (L5) pour le cycle 1 et, entre 1157ml (L2) et 1297ml (L12) pour le cycle 2 et, entre 1171ml (L11) et 1308ml (L1) pour le cycle 3, alors que le cumule varie entre 3614ml (L3) et 3872ml (L5).

De ce fait, l'analyse de variance de WU modalité **S** des trois cycles a montré des différences significatives *pour le premier et le troisième cycle*, par contre aucune différence n'a été révélée entre lignées *ni pour le deuxième cycle, ni pour le cumul* (**ANNEXE III ; 1 à 8**).

La gestion du stress des lignées, qualifiées comme très consommatrices d'eau (L5T et L1), nécessite un suivi particulièrement minutieux, en raison de l'épuisement rapide des réserves mises à leur disposition en un temps très réduits, surtout en premier cycle. La lignée L1 qui paraît moins consommatrice d'eau au 1^e cycle avec la moyenne la plus faible (1069ml, 63,87% CR), a consommé cette quantité seulement en quatre (4) jours, alors que le témoin L5T en tête de liste, a consommé 1297ml (77,5% CR) en sept (7) jours.

Autrement dit, les consommations journalières pour L1 et L5T pour ce premier cycle étaient respectivement de 267ml et de 185ml pour la modalité S, alors que les consommations de la modalité T correspondantes étaient de 483ml et de 315ml par jour, respectivement pour la L1 et la L5T. Ceci dit, si on laisse la lignée L1 (modalité S) subir une autre journée de stress, le taux de tarissement au 5^e jour peut dépasser les 80%. La gestion des cycles ultérieurs, par contre, est moins délicate que le premier, car le système foliaire des plantes stressées ne fonctionne pas toujours avec la même efficacité évaporatrice du départ.

II-1-2-2- Ecart de consommation entre modalités (sec et irrigué) et économie d'eau chez la plante stressée.

L'écart de WU enregistré entre les deux modalités pour le même cycle est dû au fait que les plantes conduites à l'ETM sont en développement continu et elles sont dotées d'une surface évaporatrice très importante, leurs besoins en eau donc augmentent chaque jour, alors que les plantes stressées ralentissent leur croissance lors du stress, mais parfois régressent si le stress dure longtemps et on assiste à une chute des feuilles de la base. Ses besoins ne sont donc que pour assurer sa survie.

Chez les plantes stressées donc, outre les besoins de la plante et les conditions climatiques qui participent à l'épuisement des réserves, il y a un troisième paramètre qui intervient, c'est celui de la stratégie de réponses au stress mise en place par les plantes stressées pour économiser et diminuer ces pertes d'eau. Ce qui rend plus ou moins lent l'épuisement des réserves hydrique mais propre à chaque plante stressée. La lignée **L1** par exemple, est la plus sensible au manque d'eau, les réserves hydriques sont épuisées en une courte durée et les signes de flétrissement se manifestent très rapidement.

Conduire les plantes sous contrainte hydrique, permet *une certaine économie d'eau* en réduisant les apports en eau d'irrigation. En effet, l'écart de consommations entre les deux modalités T et S durant la période de stress est de 55%, il en résulte donc que depuis le semis jusqu'à la fin du stress (récolte en biomasse), le ratio S/T des quantités moyennes d'eau économisée est de **32%**, soit une quantité moyenne d'eau économisée de l'ordre de 4,7 litres par plante stressée. Néanmoins, les quantités économisées sont extrêmement importantes chez les lignées subissant le stress en dernier lieu (7,1L chez la lignée L12) et elles sont, par contre, faibles chez les lignées stressées en premier lieu et plus faible chez celles qualifiées comme moins consommatrices d'eau à l'ETM (3,2L et 2,5L, chez les lignées L2 et L13 respectivement).

Mais, quelles seraient les conséquences de cette réduction des apports en eau sur la croissance, le développement et sur la productivité de la plante stressée ?

II-2- Effet du stress sur les paramètres de croissance et du développement

II-2-1- Effet sur la longueur des rameaux et des entre-nœuds

Les longueurs des rameaux primaires, mesurées à la récolte, révèlent des différences très hautement significatives entre les deux facteurs étudiés (**ANNEXE IV ; 1**). Les moyennes sont de 62,13cm et de 41,28cm respectivement pour les modalités **T** et **S**.

Pour les longueurs des entre-nœuds, l'analyse de variance montre une différence très hautement significative aussi bien entre lignées qu'entre traitements. Les valeurs les plus élevées des longueurs des entre-nœuds sont attribuées aux génotypes dits à croissance rapides : L5T, L2 et L13, avec le témoin qui vient en tête avec une longueur d'entre-nœuds moyenne de 2,3cm. Les moyennes générales des deux traitements **T** et **S** sont respectivement 1,92cm et 1,55cm (**ANNEXE IV ; 2**).

La comparaison des ratios S/T des deux paramètres de croissance révèle (**Fig. 17**) :

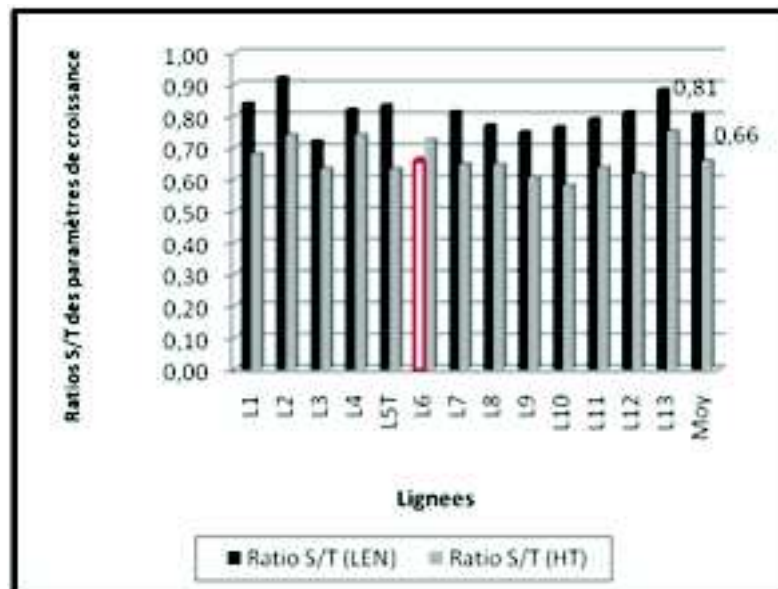


Fig. 17 : Les ratios S/T (ou modalité S/modalité T) des deux paramètres de croissance hauteurs des tiges (HT) et longueurs des entre-nœuds (LEN).

- La longueur des tiges B0 et B1(HT) est la plus affectée par le stress hydrique que les longueurs moyennes des entre-nœuds (LEN). Les moyennes des ratios (modalité S / modalité T) pour la HT et LEN, sont respectivement 0,66 et 0,81 ; ainsi les taux de réduction seront de 34% et de 19% respectivement pour les deux caractères.
- D'autre part, les lignées L2, L13, qualifiées de précoces, ont les valeurs les plus élevées des ratios hauteur de la tige et longueur des entre-nœuds, elles sont par conséquent les moins affectées par le stress concernant ces deux paramètres.
- Inversement, pour les autres lignées, la LEN de la lignée L6 est plus affecté par le stress que la hauteur des rameaux.

II-2-2- Effet sur le nombre de ramifications primaires et secondaires

Ces deux caractères sont réalisés à la fin de l'expérimentation. Les résultats montrent donc que les *différences sont hautement significatives entre lignées* pour les deux caractères. On constate d'abord que la lignée L6, qualifiée comme étant la plus tardive, est la lignée la

plus ramifiée, elle vient en tête pour les deux types de ramifications, primaires et secondaires respectivement 13,0 et 11,3. Il s'avère aussi que les lignées L2 L13 et L5T, qualifiées comme les plus précoces, sont les moins ramifiées. L5t présente un nombre de 5,0 et 7,83 respectivement pour les ramifications primaires (NRI) et secondaires (NRII) (**ANNEXE IV ; 3 et 4**). *Entre traitement*, par contre, les différences ne sont significatives que pour le NRI. Les ratios S/T sont très faibles, ils sont de 0,87 et de 0,96 respectivement pour NRI et NRII. Le nombre de ramification est un caractère explicatif important du rendement en biomasses, mais il pourrait avoir la même importance pour le rendement en gousses. Le produit NRI*NRII donne une idée sur le nombre de ramifications totales que peut porter une plante, la lignée L6 vient en tête avec 146,9 ramifications alors que les génotypes L2, L5T et L13 possèdent un nombre de ramifications moyen total de 46,41.

II-2-3- Effet sur le nombre de fleurs par bouquet

Au cours de notre expérimentation nous avons réalisé deux comptages du nombre moyen de fleurs par bouquet NFrB, à la fin du 1^e cycle et à la fin du 3^e cycle (**Tab.11**). L'analyse statistique des résultats ne montrent **aucune** différence significative entre **traitements** concernant toutes les notations du nombre de fleurs, alors qu'il existe entre lignées une différence très hautement significative pour ce paramètre (**ANNEXE IV ; 5, 6 et 7**). En réalité, il est très difficile de détecter l'effet du stress sur le nombre de fleur par bouquet car, selon **Abdelguerfi (2011)** « chez *M. truncatula*, le nombre de fleurs par bouquet est en moyenne de quatre (4), mais il est par contre variable selon la position du bouquet sur les tiges primaire B0 et B1 ».

Tab. 11 : Nombre de fleurs par bouquet pour les deux notations réalisées.

Lignées	L7	L12	L6	L5T	L4	L1	L13	L11	L9	L10	L8	L3	L2	Moy
NFrB1...(1)	5,98	4,50	4,54	3,56	4,13	4,06	3,57	3,83	3,50	3,63	3,58	2,88	2,94	3,90
NFrB2...(2)	6,13	5,00	4,33	4,47	3,88	3,88	4,25	4,00	4,00	3,83	3,25	3,25	2,88	4,09
(2) / (1)	1,02	1,11	0,95	1,26	0,94	0,95	1,19	1,04	1,14	1,06	0,91	1,13	0,98	1,05
NFrMoyB	6,05	4,75	4,46	4,02	4,00	3,97	3,91	3,88	3,75	3,63	3,42	3,06	2,91	<u>3,98</u>

Les résultats montrent que la lignée L7, qui forme le plus de fleurs (6,05) par bouquet, provient de l'étage subhumide, c'est une lignée assez tardive dans la formation des fleurs. Par contre, la lignée L2, la plus précoce, forme le moins de fleurs par bouquet (3 fleurs) provient de l'étage semi-aride. On note aussi qu'il existe une légère augmentation du nombre de fleurs entre première et deuxième notation pour la plupart des lignées, ceci serait peut être dû au fait que les bouquets portés par les nœuds supérieurs forment plus de fleurs que les bouquets de la base.

II-2-4- Taux de sénescence des feuilles et taux d'avortement

Pour le taux de sénescence des feuilles (TxSF en %), l'analyse de variance montre une différence très hautement significative aussi bien entre lignées qu'entre traitements avec les moyennes générales des deux traitements **T** et **S** respectivement de 20,11% et de 53,15% avec une moyenne générale de 36,63% (**ANNEXE IV ; 10**). Les lignées L2, L13 et le témoin L5T sont respectivement les génotypes ayant le taux de sénescence le plus faible n'excédant pas les 25% alors que les lignées L9, L11 et L12 ont des moyennes dépassant les 44% ; la lignée L8 vient en tête avec un taux moyen de sénescence des feuilles de 58,07%. Concernant les ratios S/T du nombre de feuille total NFT et du nombre de feuilles sénescentes NFS, ils sont respectivement de 0,82 et 2,14.

Pour le taux d'avortement (TxAv en %), les moyennes des deux traitements *T* et *S* sont respectivement de 21,21% et de 39,77%. L'analyse de variance montre un effet THS pour les deux facteurs étudiés avec une moyenne générale de 30,40%. Exception fait pour la lignée L6, le classement des moyennes met les lignées précoces et tardives en groupes distincts. En effet, les lignées précoces sont les moins touchées par le phénomène d'avortement (15% en moyenne), alors qu'il est très élevé chez les lignées L1 et 12 (46,82% et 62,50% respectivement) (**ANNEXE IV ; 11**).

II-3- Effet du stress sur la production en biomasse

II-3-1- Effet sur le rendement en matière fraîche

L'analyse de variance montre des différences très significatives concernant le rendement en matière fraîche aérienne, racinaire et totale. Les moyennes générales sont de 109,72g, 25,21g et de 138,84 g respectivement pour les trois paramètres. Les moyennes les plus élevées sont attribuées à la lignée L1 et les plus faibles aux deux lignées L2 et L13 (**ANNEXE IV ; 12, 13, 14**).

Les ratios S/T moyens des trois caractères sont de 0,36, 0,54 et de 0,38 respectivement pour le rendement en matière fraîche aérienne, racinaire et totale. Ces ratios sont très faibles pour l'ensemble des lignées, ceci serait dû d'abord à l'effet du stress, mais aussi à cause de la pratique des récoltes détruisant les plantes stressées à sec à la fin du stress. La **figure 18** montre une comparaison entre les deux modalités *T* et *S* à la fin de deux cycles de stress.

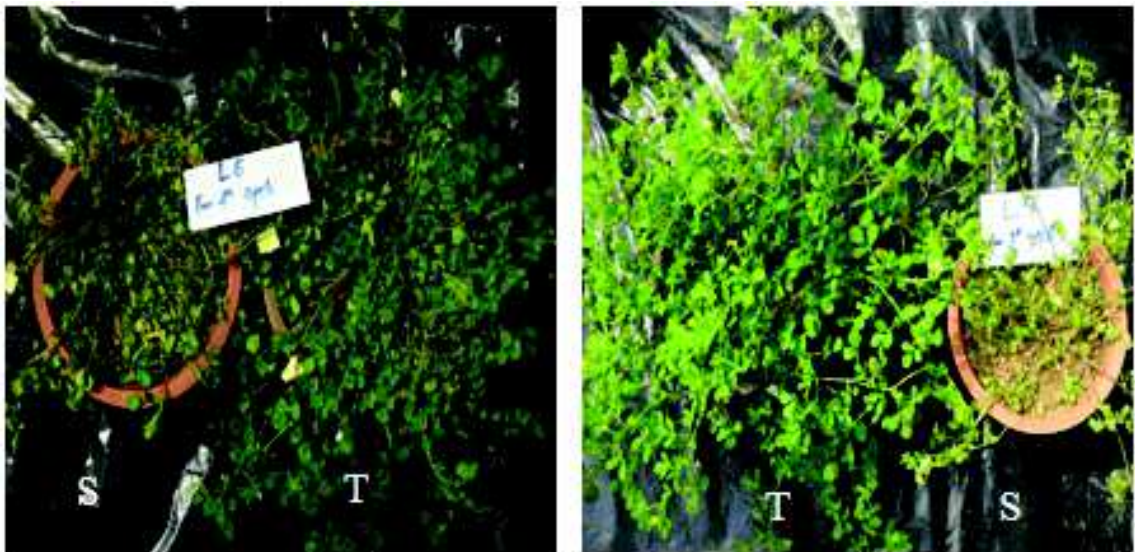


Fig. 18 : Etats de développement des deux modalités '*T*' et '*S*', en fin du premier cycle pour la lignée L6 (à gauche) et en fin du troisième cycle pour le témoin L5T (à droite).

II-3-2- Effet sur le rendement en matière sèche

Les moyennes générales des parties aériennes, racinaires et totales sont respectivement de 22,54g, 3,00g et de 25,87g. Entre modalités *T* et *S*, les moyennes sont de 31,19g et 16,49g, de 3,93g et 2,21g et de 34,77g et 18,49g, respectivement pour les trois caractères. Les ratios moyens qui en résultent sont donc de 0,53, 0,56 et de 0,53, montrant ainsi l'effet négatif du stress sur les deux parties de la plante, avec un effet plus sévère sur les parties aériennes que racinaires. L'analyse de variance a montré des différences THS aussi bien

entre traitements (modalités) qu'entre lignées. Les moyennes les plus élevées sont attribuées à la lignée L1 et les plus faibles aux deux lignées L2 et L13 (**ANNEXE IV ; 15, 16, 17**).

Le comportement des géotypes en régime humide et en régime sec est présenté sur la **figure 19**.

Chez la modalité T (Fig. 19 « a »), on remarque que les lignées les plus productives en MSA (L1, L5T, L6 et L11) se caractérisent par les racines les plus développées (PSR élevés). Les rendements de ces mêmes lignées (PSA ou PSR) pour la modalité S sont également moins affectés lors du stress hydrique (**Fig. 19 « b »**), alors que les autres lignées se caractérisent par un développement faible des deux parties aérienne et racinaire à l'ETM et leur rendement se voit très défavorisé en cas de stress. La lignée L12 a un bon PSA à l'ETM, supérieur à celui de la L11 même avec un PSR faible ; mais lors du stress, c'est l'inverse qui se produit, c'est la L11 qui se trouve plus résistante avec moins de diminution.

Concernant l'écart de production entre les deux modalités, bien que la lignée L1 et le témoin L5T sont les plus productives sous les deux conditions d'ETM et de contrainte hydrique, l'écart de production (en PSA) entre les deux modalités est trop important, il est de 60% pour le témoin L5T et de 47% chez la L1 (**Fig. 19 « c »**). La lignée la moins touchée par la diminution est la L10 avec des ratios S/T (PSA) =0,75 et S/T (PSR)=0,65.

II-3-3- Effet sur le taux de matière sèche

L'évolution du TMS des deux parties aériennes et racinaires est présenté dans la **figure 19 « d »**.

Sur le TMS des parties aériennes, on note une nette augmentation avec un ratio S/T de 1,50 passant en moyenne de 17,57% à 26,27% respectivement de la modalité T à la modalité S. Cependant, pour les lignées L9, L10 et L1 surtout, enregistrent les ratios les plus élevés proches de deux (2), ce qui veut dire un taux d'augmentation de 100% du TMSA. Par contre chez les lignées L5T, L2 et L13 l'évolution de la matière sèche était faible, le taux passe en moyenne pour les trois lignées de 20,66% à 24,62% respectivement de la modalité T à la modalité S. Les différences entre moyennes pour le TMSA sont HS pour les deux facteurs étudiés (**ANNEXE IV ; 18**).

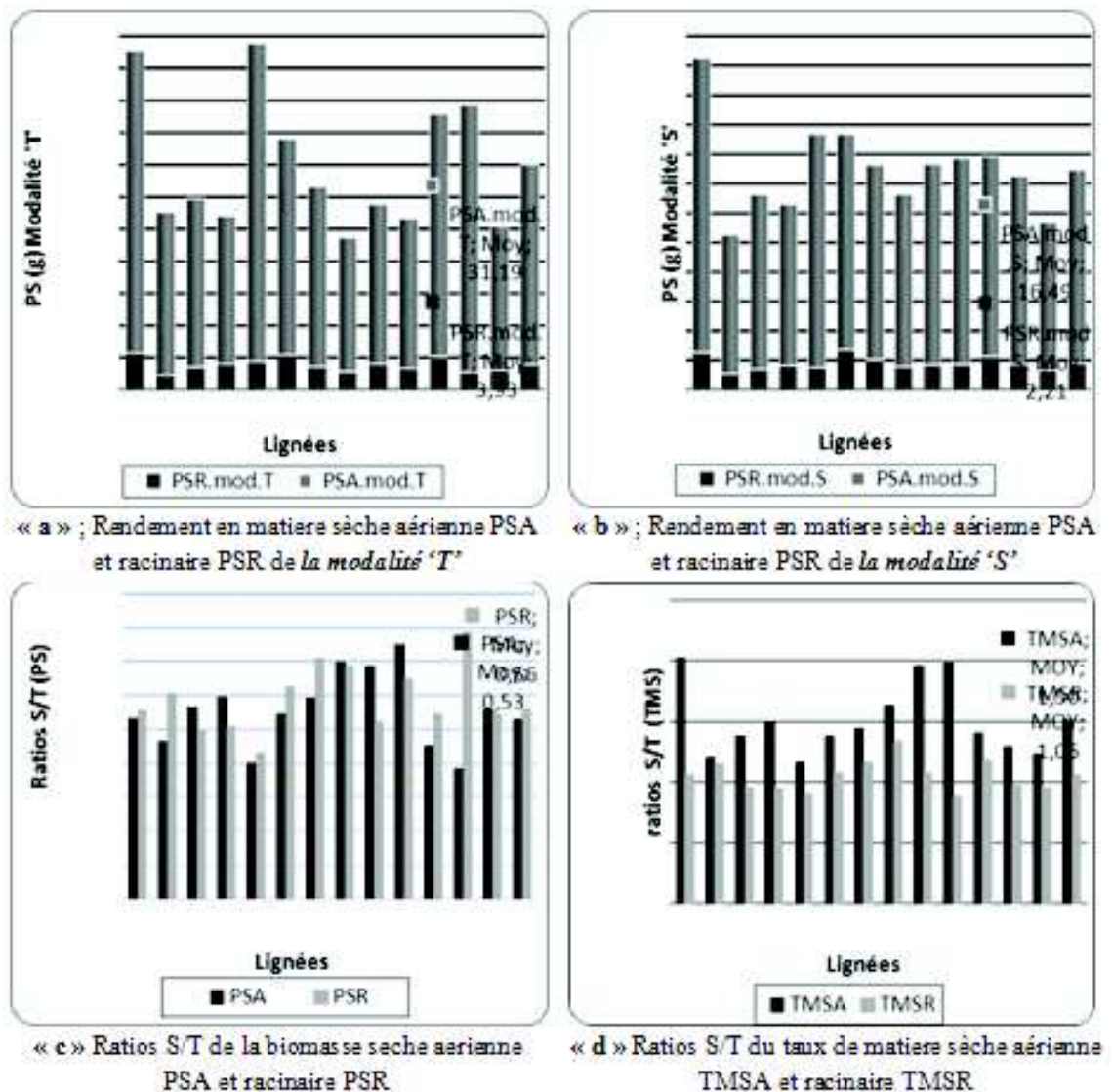


Fig. 19 : Rendement matière sèche produite par la modalité 'T' « a » et par la modalité 'S' « b » et, les ratios S/T du poids sec « c » et du taux de matière sèche « d » aérienne et racinaire.

Sur le TMS des parties racinaires, il semble plus stable que le TMSA avec un ratio moyen S/T de 1,06, il passe en générale de 11,73% à 12,41%. L'analyse n'a montré aucune différence pour les deux facteurs concernant ce paramètre (Fig. 20 ANNEXE IV ; 19).

En résumé, le stress hydrique réduit le PSA et le PSR à raison de 47% et de 44% respectivement, il augmente par contre le TMSA de 50% et ne semble avoir aucune influence sur le TMSR car l'augmentation n'était que de 0,6%. **Comment peut-on donc expliquer ce résultat ?**

En effet, les racines sont un organe qui n'a pas le rôle d'emmagasiner l'eau, mais plutôt il a la fonction principale d'absorber et de véhiculer l'eau à la partie aérienne, de plus les racines de la modalité T développent de grosses racines de MS élevée. La figure 18 montre les différences entre les racines des deux traitements.

Photo.1 : Racines intactes d'une plante à l'ETMPhoto.2 : Brûlures sur racines d'une plante stresséePhoto.3 : Racines bien développées d'une plante conduite à l'ETMPhoto.4 : Racines moins développées d'une plante stressée

Fig. 20 : Racines intactes et bien développées d'une plante conduite à l'ETM (photographie 1 et 3) et, brûlures et faible développement des racines issues d'une plante stressée (photographie 2 et 4), avant et après lavage.

II-4- Effet sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau

II-4-1- Effet direct du stress sur l'efficacité en eau

Comme la plupart des paramètres précédemment étudiés, le stress hydrique a un effet défavorable sur l'WUE. L'analyse de variance a mis en évidence des différences THS entre les deux facteurs étudiés concernant WUE.A et WUE.T (**ANNEXE IV ; 21, 22**). Les ratios S/T de WUE.A et de WUE.T sont de 0,80 pour les deux, c'est à dire que la WUE est affectée en général de 20%.

En ce qui concerne l'efficacité eau de la partie aérienne (WUE.A), le témoin L5T vient en tête avec une moyenne de 2.63g/L ; cependant, son ratio S/T= 0.60 est le plus faible (**Tab. 12**). Le témoin L5T et la lignée L1 possèdent les valeurs moyennes les plus élevées en WUE ; car ces deux géotypes sont plus efficaces en condition hydrique suffisante,

mais lorsqu'ils sont soumis au stress hydrique, leurs sensibilités diffèrent. Par contre, les lignées L8, L9 et particulièrement la lignée L10, bien que leur efficacité soit moyennement faible, maintiennent cependant des ratios S/T élevés. La lignée L10 qui possède une faible efficacité (1,59g/L), son WUE semble s'améliorer sous stress (S/T=1,15).

Tab. 12 : Moyennes de WUE.A et ratios S/T correspondants.

Lignées	L5	L1	L11	L6	L7	L9	L12	L3	L13	L2	L10	L8	L4
WUE.A	2,63	2,17	1,87	1,81	1,75	1,71	1,69	1,69	1,69	1,67	1,59	1,49	1,48
Ratio S/T	0,60	0,83	0,70	0,78	0,89	0,97	0,64	0,88	0,73	0,65	1,15	0,98	0,86

II-4-2- Effet indirect du stress sur l'efficacité en eau

- Comment peut-on expliquer que l'WUE de certaines lignées reste stable même en cas de stress ?
 - D'abord l'WUE des plantes stressées, ainsi calculée, ne représente pas réellement la WUE pendant le stress, car la plante stressée a vécu une partie de sa vie à l'ETM où l'efficacité était relativement élevée, ce qui fait que l'efficacité ainsi obtenue *représente la moyenne du comportement de la plante dans deux conditions d'ifférentes*, à l'ETM et sous stress hydrique.
 - Aussi, nous avons montré que le stress fait diminuer à 50% le rendement en MS, mais augmente le taux de la matière sèche aérienne (TMSA) de 50%. Il permet aussi d'économiser l'eau jusqu'à 32% en moyenne par rapport à la modalité sans stress, soit une économie d'eau de 4,7 l par plante. Ceci permet de garder toujours le rapport MS/WU plus ou moins stable c'est-à-dire une WUE moins affectée. Des corrélations entre les ratios WUE.A et les ratios des paramètres PAS et TMSA confirment que les lignées dont les WUE sont les moins affectées sont celles qui maintiennent élevés les ratios S/T du PSA et du TMS (**Fig. 21**).

Les résultats de la figure 19 montrent que les deux paramètres : *i*) la production de la matière sèche plus particulièrement celle des parties aériennes et *ii*) le taux de matière sèche aérienne, affectent d'une manière linéaire et indirecte, la stabilité de la WUE en conditions stressantes. Ce sont donc les lignées qui maintiennent élevés les ratios S/T du PSA (>0,70) et du TMS (>1,5) qui pourront être tolérantes au stress hydrique concernant le paramètre WUE, c'est le cas des lignées L8, L9 et surtout L10 et du moins la lignée L1. Le témoin L5T et la L12 qui sont efficaces en eau en condition hydrique suffisante, se montrent sensibles lorsqu'elles sont soumises aux conditions déficientes.

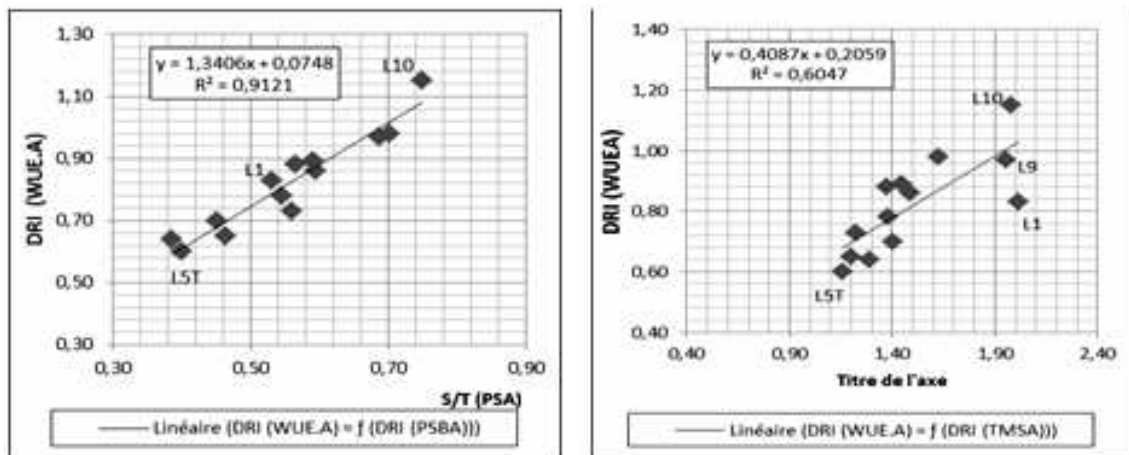


Fig. 21 : Évolution du ratio S/T ou DRI(WUE.A) en fonction des deux paramètres ; ratio DRI(PSBA) (à gauche), ratio DRI(TMSA) (à droite).

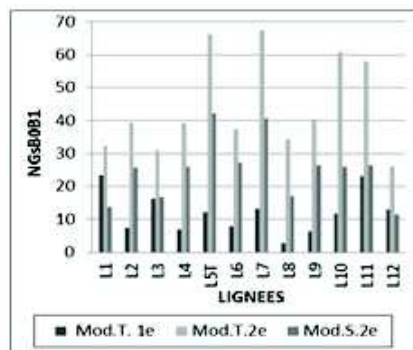
Enfin, malgré que le stress a permis une économie moyenne d'eau de 32% et, bien que le WU, "le dénominateur", rentre directement dans la formule de calcul de la WUE, nos résultats n'ont pas permis d'obtenir une corrélation entre les deux ratios S/T (TWU) et S/T (WUE), ceci peut être par ce que toutes les quantités consommées ne contribuent pas à l'élaboration de la matière sèche.

II-5- Comparaison entre les deux échantillonnages destructifs

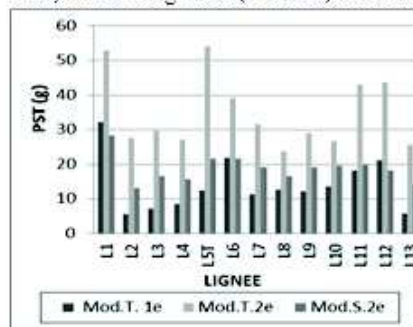
Avec la **figure 20** « a », « b » et « c » qui suit, nous allons faire une comparaison entre les deux échantillonnages destructifs réalisés concernant les trois paramètres communs ; *i*) nombre de gousses sur les deux rameaux B0 et B1 (NGsB0B1), *ii*) rendement en matière sèche totale (PST) et *iii*) efficience d'utilisation en eau (WUE.T).

II-5-1- Evolution du nombre de gousses sur les deux rameaux B0 et B1.

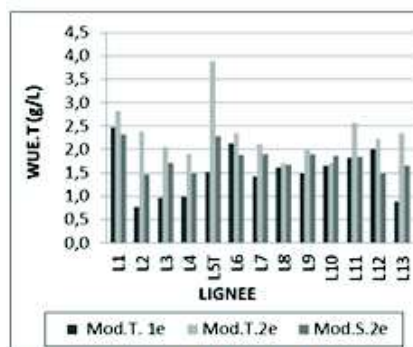
Nous avons vu que le stress hydrique a un effet important sur l'avortement, cet avortement peut concerner les fleurs seulement comme il peut affecter les gousses nouvellement formées, en conséquence le taux d'avortement tel qu'on l'a calculé ne peut démontrer l'action du stress sur les gousses, pour cela seule l'étude de l'évolution du nombre de gousses par des comptages réguliers et sur des rameaux bien déterminés qui peut distinguer l'augmentation ou la diminution du nombre au cours du temps.



« a »; Nombre de gousses (la somme) sur B0 B1



« b »; rendement en matière sèche totale



« c »; Efficacité d'utilisation /MST

Fig. 22 : Comparaison du nombre de gousses « a », du rendement en matière sèche « b » et, de l'efficacité en eau « c » entre 1^{er} et 2^{ème} échantillonnages destructif.

On remarque d'après la figure 22 « a », qui représente l'évolution du nombre de gousses sur les deux rameaux primaires pour les différents génotype, que du premier au deuxième échantillonnage destructif :

Le nombre de gousses (NGsB0B1) a régressé chez la modalité 'S' de certaines lignées, notamment la L1 et L12 et n'a pas augmenté chez L3 et L11 ; cela veut dire qu'outre l'avortement des fleurs, le stress a affecté également les gousses provoquant une leur chute prématurément. Ce sont donc les gousses sous alimentées en eau ou de faible compétitivité qui sont éliminées. Néanmoins certaines lignées connaissent une augmentation importante et continue du NGs, notamment le témoin L5T, L7 et L10 pour les trois observations.

Les résultats montrent aussi qu'au 2^{ème} échantillonnage destructif, le témoin possède en moyenne 54,25Gs directement issues des rameaux primaire B0 et B1 (ANNEXE IV ; 23).

II-5-2- Evolution du rendement en matière sèche

On observe le même comportement des lignées L1, L11, L12 et L6, dont le rendement en poids sec total (PST) évolue négativement de la 1^{ère} récolte (mod.T) à la 2^{ème} récolte (mod.S), mais là, on ne parle pas de régression du PST, mais plutôt c'est la forte production de la mod.T.1^e en une semaine qui a dépassé la production de la mod.S.2^e en trois semaines (Fig. 22 « b »).

II-5-3- Evolution de l'efficacité en eau

C'est à cause d'une WUE élevée en 1^e éch. dest. des lignées précédentes (L1, L6, L11, L12) que la production de la mod.T.1^e était supérieure à celle de la mod.S.2^e. Maintenant entre modalité T (1^e et 2^e), on constate que pour les lignées tardives (L1, L6, L11, L12) l'augmentation moyenne du PST et la WUE était respectivement de 48,01% et de 14,90%, alors que pour les géotypes précoces (L2, L5T, L13), l'augmentation était de 75,26% et de 63,23%. On note aussi que la L8 et la L10 possèdent une WUE relativement faible, mais elle est maintenue stable sous les différents stades de développement et conditions de conduite (Fig. 22 « c »).

II-6- Effet du stress sur la production en grains

II-6-1- Effet sur la production en gousses

II-6-1-1- Effet sur le nombre

Sur le nombre de gousses par plantes (NGsP), le stress avait un **effet néfaste** hautement significatif avec une diminution de 41% (S/T = 0,59). (**ANNEXE IV ; 24**). Les moyennes sont de 543,19 et 320,55 de respectivement pour les deux modalités T et S. Les différences de moyennes entre lignées sont elles aussi THS. La lignée L10 vient en tête avec le nombre le plus élevé et le ratio S/T le plus faible (**Tab. 13**). La moyenne générale est de 399,85 gousses par plante.

Tab. 13 : Nombre de gousses par plante (NGsP) et ratios S/T correspondants.

Lignées	L10	L4	L6	L8	L5T	L13	L11	L9	L7	L1	L12	L3	L2
NGsP	659,40	627,83	587,40	491,40	454,00	434,83	408,17	395,00	373,67	236,40	203,17	201,17	187,33
Ratio S/T	0,47	0,73	0,83	0,58	0,60	0,49	0,48	0,60	0,63	0,86	0,51	0,64	0,53

II-6-1-2- Effet sur le poids

Sur le poids de gousses par plante (PGsP), les moyennes entre modalités T et S varient entre 37,89g/plante et 25,65g /plante. Les résultats montrent que l'**effet lignée** n'a provoqué qu'une **très faible différence** (probabilité P= 0,0493), alors que l'effet était THS entre modalités (**ANNEXE IV ; 25**) ; mais sachant que le nombre de gousses est inégale entre modalités, les différences seront automatiquement grandes entre modalités et le ratio S/T moyen sera, par conséquent, faible, il est de 0,68 ; ce ratio donc comporte l'effet aussi bien du stress que du nombre. Pour cela, nous allons étudier le poids d'un *échantillon de nombre égal de gousses*, ce caractère va nous donner le véritable effet du stress sur le poids des gousses et, expliquer aussi les faibles différences du poids entre lignées.

- Sur le poids de 30 gousses (P30Gs) (Tab. 15)
 - Premièrement, le ***stress hydrique cette fois-ci a un effet significativement favorable sur le poids de la gousse***, les moyennes entre modalité T et S varient entre 2,73g et 3,19g avec un véritable ratio S/T donc supérieur à un, il est de **1,17** (Tab.14 et ANNEXE IV ; 26).
 - Deuxièmement, les différences de moyennes entre lignées sont aussi THS et, en regardant les résultats de ce tableau, on comprend pourquoi les différences entre lignées concernant le PGsP étaient faibles. C'est parce que d'abord les lignées les moins productives, telles que la L1, L2, L3 et L12 (207 gousses/plante), donnent naturellement des gousses de grande taille (P30Gs supérieur à 4 g) et deuxièmement, parce que le stress hydrique a provoqué un effet favorable sur le poids des gousses, ce qui a fait que le PGsP est contrebalancé par un effet conjugué de deux phénomènes, l'un naturel et l'autre imposé.
 - Nous remarquons néanmoins, que chez deux génotypes qui sont le témoin L5T et la L1, le ratio S/T est toujours *inférieur à un*, c'est à dire que le poids des gousses est affecté négativement par le stress.

Tab.14 : Poids de 30 gousses par plante (P30Gs) et ratios S/T correspondants.

Lignées	L1	L2	L3	L12	L8	L5T	L7	L11	L13	L9	L4	L6	L10
P30Gs (g)	5,05	4,69	4,58	4,08	2,92	2,76	2,42	2,38	2,27	2,08	1,95	1,89	1,57
Ratio S/T	0,92	1,23	1,18	1,05	1,26	0,91	1,14	1,39	1,51	1,15	1,32	1,12	1,25

En fait, les chiffres présentés ci-dessus sont enregistrés à la fin du stress, alors que les plantes stressées destinées pour la récolte des gousses continuent leur vie et à l'ETM jusqu'à la fin du cycle et, c'est dans la période après stress que se sont produits des phénomènes post-stress, qui peuvent fournir les éléments de réponses à notre question. En réalité, les plantes stressées, conduites à l'ETM après cessation du stress, montrent exceptionnellement *un comportement post-stress, positif à la production en gousses*. En effet, toutes plantes stressées (y compris le témoin) conduite à l'ETM après cessation du stress, présentent ***une forte reprise de floraison après irrigation et conduite à l'ETM*** (Fig. 23).



Fig. 23 : La modalité T de la lignée L4 (à gauche) et, la modalité S correspondante (à droite) à quarante (40) jours après fin stress. À l'encontre de la modalité T, il ya toujours présence de fleurs chez la modalité S (photo prise le 31/05/2011, 134 JAS).

La floraison chez les plantes ayant été stressées reprendra d'une manière importante mobilisant l'ensemble des ramifications mettant ainsi ces plantes en pleine floraison. Il est à noter qu'il est difficile de quantifier ce caractère pour distinguer entre plantes ou lignées. Ainsi, ce comportement favorisant la floraison et par la même la production de gousses, et il peut contrebalancer tout ratio S/T théorique de la chute de production en gousses.

II-6-2- Effet sur la production en graines

II-6-2-1- Effet sur le nombre

Aucun effet du stress sur le nombre de graines par 30 gousses n'a été enregistré, les **différences** de moyennes **sont dues à l'effet de lignées** et elles sont THS (**ANNEXE IV ; 27**), les lignées L1 et L2 caractérisées par leurs gousses volumineuses, viennent en tête avec le nombre le plus élevé de graines par gousse (**Tab. 15**). Les moyennes des modalités T et S sont de 179,39 et de 178,46 respectivement avec un ratio moyen S/T =0,99. Les faibles ratios sont attribués aux génotypes L1, L3, L2, L4 et L5T.

Tab. 15 : Moyennes du nombre de graines de 30 gousses, par gousse

Lignées	L1	L2	L5T	L3	L12	L13	L11	L8	L7	L9	L4	L6	L10
NGr30Gs	235,8	228,67	218	200,7	199,5	169,17	167	166	156	149	143,8	135,4	132,8
Ratio S/T	0,87	0,93	0,94	0,88	1,06	1,06	0,97	1,23	1,01	0,99	0,92	1,08	0,99
NGr/Gs	7,87	7,63	7,07	6,7	6,67	5,633	5,57	5,53	5,2	4,97	4,8	4,43	4,43

Il en résulte aussi que le témoin L5T et la lignée L4 sont les plus productifs en graines avec un nombre dépassant les trois mille (3000) graines par plante, ensuite vient la lignée L10. Les lignées L2 L3 et L12 sont les moins productives en graines par plante avec en moyenne 1370 graines par plante.

II-6-2-2- Effet sur le poids

Sur le poids des graines issues de 30 gousses (PGr30Gs) : l'analyse de variance du PGr30Gs montre des différences THS **entre lignées et, aucun effet du stress** n'a été enregistré (**ANNEXE IV ; 28**), mais les résultats montrent que le poids de la modalité S est supérieur à celui de la modalité T, les moyennes sont de 0,725g et de 0,747g respectivement pour la modalité T et S avec un ratio S/T= **1,03** . Les résultats montrent aussi que la lignée L1 caractérisée par le P30Gs et le NGr30Gs les plus élevés, possède également le PGr30Gs le plus élevé. De même, la lignée L10 caractérisée par le P30Gs et le NGr30Gs les plus faibles possède également le PGr30Gs le plus faible.

Sur le poids d'une graine (P1Gr) : pour obtenir le poids d'une graine nous avons calculé le PGr30Gs sur le NGr30Gs. Les résultats montrent que le ratio S/T moyen d'une graine est légèrement supérieur à un (S/T= **1,05**), indiquant ainsi une stabilité du poids des graines entre les deux modalités. Le témoin L5T et la lignée L1, sont les seuls génotypes sensibles au stress avec des diminutions du poids de 2% et de 14% respectivement ; la lignée L13 par contre enregistre une bonne amélioration du poids de la graine (**Tab. 16 et ANNEXE IV; 29**).

Tab.16 : Moyennes du poids d'une graine.

Lignées	L12	L2	L3	L7	L5T	L1	L8	L11	L6	L13	L4	L9	L10
P1Gr	0,00480	0,00460	0,00450	0,00440	0,00440	0,00440	0,00400	0,00400	0,00370	0,00360	0,00350	0,00350	0,0030
Ratio S/T	1,00	1,12	1,00	1,01	0,98	0,86	1,02	1,11	1,06	1,23	1,16	1,01	1,04

En fin sur le nombre et poids des graines par plante (NGrP, PGrP) : les moyennes générales du traitement humide sont de 3031,2 graines de 11,62g par plante. L'effet des deux facteurs était THS avec des taux de réduction de 40% et 36% respectivement pour le nombre et le poids de graines par plante. (**ANNEXE IV; 30 et 31**). Le DRI des deux caractères pour la lignée L6 sont de 0.90, 0.95, alors qu'ils sont de 0.46 0.48 pour la lignée L10.

II-6-3- Résumé de l'action du stress sur la production en grains

On peut noter sur la base de ces résultats obtenus :

- Que l'effet du stress sur les gousses a provoqué une diminution importante sur le nombre de gousses de l'ordre de 41% (S/T=0,59), alors que sur le poids, il avait un effet positif en améliorant le poids des gousses de 17% (S/T=1,17) et, que chez l'ensemble des lignées le poids de la gousse est amélioré exception faite pour le témoin L5T et la L1.
- Que l'effet du stress sur les graines n'a provoqué en général aucun effet sur le nombre et le poids des graines ; toutefois, le ratio moyen du nombre (0,99) reste toujours inférieur au ratio du poids (1,05) et, que chez l'ensemble des lignées le poids de la gaine reste stable ou légèrement amélioré exception faite toujours pour la lignée L1 et le témoin L5T.
- Que le ratio PGr30Gs/P30Gs, qui représente mathématiquement le poids des graines sur poids de la gousse mère, calculé pour chacune des modalités, montre que pour la modalité T, le poids des graines occupe en moyenne 27% du poids de la gousse, alors que chez la modalité S, les graines n'occupent que 24% du poids de la gousse.

De ces constats, on peut conclure l'action du stress était plus sévère sur le nombre de gousses et de graines que sur le poids et que, la réaction de la plante, vis-à-vis du stress,

a pour objectif la protection de l'intégrité (nombre et surtout poids) des graines en condition stressante au détriment surtout du nombre de gousses. La **figure 24** montre les différents types de gousses des lignées de *M. truncatula* étudiées.

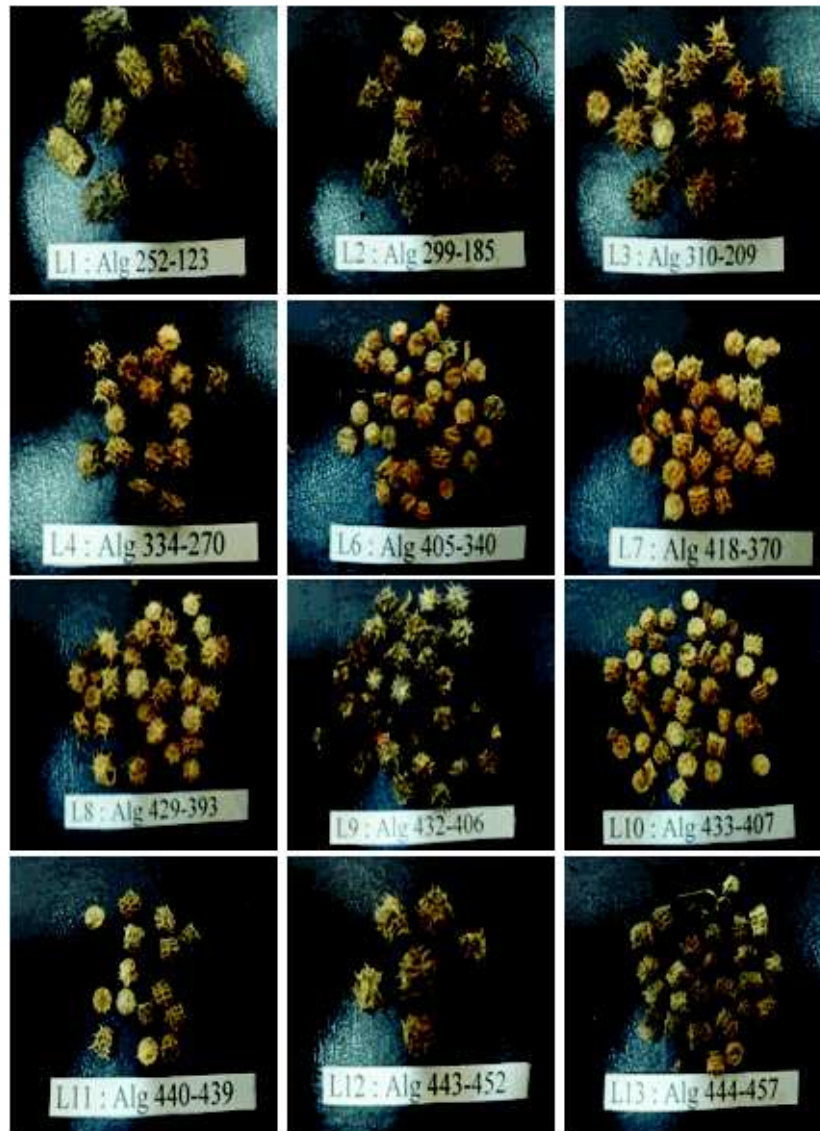


Fig. 24 : Les différentes formes de gousses chez les lignées de *Medicago truncatula* étudiées.

III- ANALYSES MULTIVARIEES

III-1-Productivité moyenne et DRI des lignées

Des sources de résistance ou de tolérance au stress hydrique ont été identifiées chez certaines espèces et lignées d'espèces et ont été utilisées comme critères de sélection des géotypes ; chez certaines lignées de pois chiche par exemple, les critères sont basées sur le rendement stressé, l'indice de sensibilité au stress, la productivité moyenne et d'autres critères physiologiques. Pour le haricot c'est l'indice de sensibilité au stress, la conductance stomatique et la discrimination isotopique du carbone (**Stoddard et al. , 2006**) ; de plus,

la cohérence du rangement des lignées, entre les moyennes du rendement stressé et les indices de stress (indice de sensibilité), est souvent prise en compte lors de l'étude de la variation des réponses au stress hydrique des géotypes (**Solomon, 2003**).

Certaines lignées sont très contrastées ; celles qui sont très productives en fourrage en condition hydrique favorable sont L1, L5T, mais leur degré de sensibilité est important (tab. 17) d'autres lignées comme la L10, est moyennement productive mais qui garde des DRI en MSA et WUET élevés. La lignée L6 s'avère la plus résistante concernant la production en grains, à l'inverse de la lignée L10 qui s'est montrée la plus sensible en ces caractères avec les DRI les plus faibles en P30Gs, NGrP et P1Gr.

Caractères	Composantes	Moy et DRI	L1	L2	L3	L4	L5T	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
Phénologie	PrFr	PrFr (ETM)*	+	+++	++	++	+++	-	++	++	++	++	+	+	+++
Production de Matière Sèche	MSA	MSA	+++	+	+	+	+++	++	++	+	+	+	+	++	+
		DRI	-	+	++	+	+	+	++	++	+	+++	+	+	++
	MSR	MSR	+++	+	+	++	++	+++	++	+	++	+	+++	+	+
		DRI	++	++	+	+	+	++	+++	++	++	+	++	+++	++
Efficience	WUET	WUET	++	+	++	+	+++	++	+	+	+	+	++	+	+
		DRI	++	++	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++	++	++	++
Production en gousses	NGsP	NGsP	+	+	+	+++	+	++	+	++	+	+++	+	+	+
		DRI	+++	+	++	++	++	+++	++	++	++	+	+	+	+
	P30Gs	P30Gs	+++	++	++	+	+	+	+	+	+	-	+	++	+
		DRI	+	+++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++
Production en graines	NGsOGs	NGrP	+++	+	+	+	+++	+	+	+	+	-	++	+	+
		DRI	+++	+	++	++	+	+++	++	++	++	++	++	++	++
	NGrP	NGrP	+	+	+	++	+++	++	+	++	+	++	+	+	+
		DRI	++	+	++	+++	++	++	++	++	++	+	+	++	+
	P1Gr	P1Gr	++	++	++	+	++	+	++	++	+	-	++	+++	+
		DRI	++	++	++	++	++	+++	++	++	++	+	+	+	++

* PrFr : précocité de floraison sur l'essai à l'ETM ; MSA : Matière Sèche Aérienne ; MSR : Matière Sèche Racinaire ; WUET : Efficience d'Utilisation de l'Eau par rapport à la MS Total ; NGsP : Nombre de Gousses par Plante ; P30Gs : Poids de 30 Gousses ; NGrP : Nombre de Graines par Plante ; P1Gr : Poids d'une Graine. Signification : - : très faible ; + : faible ; ++ : moyen ; +++ : élevé.

Tab. 17 : Moyennes et DRI des principaux caractères (fait à partir de l'ANNEXE IV et V).

III-2- Le RSI (the rank summation index)

Abayomi et Abidoeye. (2009), pour l'évaluation de la performance des lignées sous stress hydrique, calculent le RSI " *the rank summation index* ", par lequel les géotypes sont classés de 1 (valeur de DRI faible) à 13 (valeur de DRI élevée) pour chaque caractère étudié, les valeurs des classes de chaque lignée sont à la fin additionnées représentant ainsi le RSI de la lignée pour l'ensemble des caractères. Le géotype possédant des valeurs de RSI le plus élevé des DRI sera donc **le plus tolérant**, et celui ayant la somme la plus faible il est considéré comme le **plus sensible**. Le tableau 18 représente l'ensemble des calculs pour tous les caractères qu'ils soient ou non significatifs (classement fait à partir de l'ANNEXE V).

Le classement selon le RSI de tous les caractères étudiés met en première position les deux lignées L8 et L6 comme lignées plus résistante et en dernière position la lignée L12 et le témoin L5T (**Tab. 18**).

Tab. 18 : Résultats du RSI chez les 13 lignées pour les 29 caractères.

Caractères	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	Sign.
HTF	9	13	5	10	4	12	7	8	2	1	6	3	11	DNS
LEN	11	13	1	8	10	5	7	4	2	3	6	9	12	DNS
NRI	13	7	1	5	10	8	4	12	9	6	2	3	11	
NRII	5	2	12	13	9	7	4	6	11	2	10	3	8	
NFT	6	8	11	13	3	12	4	11	7	1	5	2	10	
NFS	10	11	12	3	9	13	4	1	8	7	6	5	2	
TxSF	4	2	3	12	5	1	10	13	7	6	9	8	11	
NFrM	1	9	10	12	2	5	4	13	8	3	6	11	7	DNS
TxAv	7	4	10	2	11	8	6	3	13	5	1	12	9	DNS
PFA	1	7	11	8	4	9	10	12	5	6	3	2	13	
PSA	5	4	8	9	2	6	10	12	11	13	3	1	7	
TMSA	13	2	6	9	1	5	8	10	11	12	7	4	3	
PFR	5	7	4	8	2	10	11	6	3	12	1	13	9	
PSR	7	8	2	3	1	9	12	11	4	10	5	13	6	
TMSR	9	11	4	5	2	7	10	13	8	1	12	6	3	NS
PFT	1	6	8	7	4	9	11	12	5	10	2	3	13	
PST	8	3	7	5	1	9	10	12	11	13	4	2	6	
TMST	13	3	5	7	1	6	9	10	12	11	8	4	2	
WUEA	7	2	9	8	1	6	10	12	11	13	4	3	5	
WUET	9	2	8	6	1	7	10	12	11	13	5	3	4	
NGsB0B1	2	12	6	11	9	13	8	5	10	1	3	7	4	DNS
NGsP	13	5	10	11	7	12	8	6	9	1	2	4	3	
PGsP	11	2	9	13	4	12	7	10	8	3	6	1	5	
P30Gs	2	8	7	11	1	4	5	9	6	10	12	3	13	
NGr30Gs	1	4	2	3	5	12	9	13	7	8	6	11	10	
PGr30Gs	1	6	2	9	3	11	5	12	4	7	10	8	13	
P1Gr	1	11	3	12	2	9	6	7	5	8	10	4	13	
NGrP	12	3	7	10	6	13	8	11	9	2	1	5	4	
PGrP	11	4	5	12	6	13	8	10	7	1	2	3	9	
RSI	198	179	188	245	126	253	225	276	224	189	157	156	226	
Classement	10	9	3	13	2	5	1	6	8	11	12	4		

Si on élimine tous les caractères non significativement (pas de différences entre les lignées), le classement des lignées garde toujours les lignées L8 et L6 en première position mais également toujours le témoin L5T et la lignée L12 en dernière position (**Tab. 19**).

Tab. 19 : Résultats du RSI chez les 13 lignées et seulement pour les 23 caractères significatifs.

Caractères	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
RSI	159	117	152	197	88	203	183	230	181	175	123	108	180
Classement	8	11	9	3	13	2	4	1	5	7	10	12	6

III-3- Corrélations

L'étude des corrélations des caractères sous les deux régimes humide et sec (**ANNEXES VI ; 1, 2 et 3**) nous permet de mettre en évidence les aspects suivants :

- Sous un régime hydrique humide, les résultats des corrélations montrent que la vitesse de croissance (VTC) est corrélée à la hauteur de végétation (HTB0B1), mais négativement avec la floraison (TrFr) et le nombre de ramifications primaires et secondaires (NRI' NRII). Autrement dit, les lignées les moins développées se caractérisent par une floraison très tardive mais par une ramification plus importante par rapport aux lignées dite de grande vitesse de croissance qui sont plus précoces et moins ramifiées (**ANNEXE VI ; 1, et 2**).
- Il existe sous les différentes conditions de conduite des plantes que ce soit en humide ou en sec, une corrélation entre le poids frais des racines (PFR) avec celui des parties aériennes (PFA), de même que pour le poids secs des deux parties (PSR avec PSA) révélant ainsi que les génotypes caractérisés par des racines vigoureuses peuvent donner des de bons rendements en matières sèche aériennes sous différentes conditions (**ANNEXE VI ; 1, 2 et 3**). Cette production en poids frais ou sec est surtout favorisée (corrélée) par une bonne alimentation hydrique (TWU) ; mais la consommation hydrique en régime humide favorise les parties aériennes, alors qu'une forte consommation hydrique en régime sec favorise l'accumulation de la matière sèche de plus en plus dans les parties racinaires qu'aériennes. La plante limite ainsi les pertes d'eau par transpiration et investit dans les organes d'absorption.
- Le taux de matière sèche racinaire (TMSR) en régime humide est parfois fortement corrélé au poids frais et poids sec des parties aériennes (PFA et PSA), alors que sous les conditions stressantes, cette corrélation n'existe pas. Une bonne production en matière sèche aérienne et un taux de matière sèche élevé des parties aériennes surtout, se répercute positivement sur l'efficacité d'utilisation en eau (PSA et TMSA sont fortement corrélés avec WUE.A WUE.T) ; mais la corrélation de l'efficacité en eau avec la consommation hydrique (TWU) semble inexistante chez les deux modalités humide et sèche (bien qu'elle soit forte lors d'une récolte progressive réalisée en fonction du stade du développement de chaque plante).
- Le taux d'avortement (TxAv) a un effet positif sur le poids des gousses (P30Gs), surtout en régime humide, sur le nombre de gousses. Ce taux d'avortement est corrélé à la consommation hydrique (TWU) en régime humide, alors qu'il est corrélé aux taux de sénescence des feuilles (TxSF) en régime sec.

Corrélations entre les DRI (Drought response index) ou ratios S/T des caractères (ANNEXES VI ; 4). Selon **Badri et al. (2010)**, une corrélation positive entre les DRI suggère que le comportement des lignées en stress hydrique suit le même modèle général.

- Comme nous l'avons présenté, une corrélation a été établie entre les ratios du poids sec aérien et du taux de matière sèche avec celui de l'efficacité en eau ; ceci indique que les lignées qui maintiennent leur efficacité en eau plus ou moins stable lors du stress, sont celles dont le poids sec est le moins affecté et dont le taux de matière sèche est le plus élevé.

Entre la consommation hydrique (TWU) et la production en grains, les seules corrélations montrent que les plantes stressées qui avaient consommé le plus d'eau (S/T du TWU élevé) ont amélioré simultanément le poids de gousses (P30Gs) et le poids de graines (PGr30Gs) (**ANNEXE VI ; 3 et 4**).

III-4- Analyse des composantes principales (ACP)

Le but de l'ACP est d'aller vers un petit nombre de caractères de combinaison linéaire (composantes principales) d'un groupe de variables qui retient le plus d'information possible à l'intérieur des variables originales. L'ACP peut être vue aussi comme une tentative de découvrir une approximative dépendance linéaire entre les variable.

Nous avons réalisé deux ACP ; l'une prend en compte les données du traitement stressé et l'autre prend en compte les indices de stress (DRI). Seuls les caractères les plus importants (les plus informatifs) ont été retenus. Les caractères nombre de ramifications primaires et secondaires ont été rassemblés en nombre de ramifications totales (NRT).

III-4-1- ACP par rapport aux caractères du traitement stressé

Le **tableau 20** ci-dessous montre les valeurs propres des trois principaux axes qui totalisent 77,56% de la variabilité observée.

	F1	F2	F3
Valeur propre	7,935	6,510	3,393
Proportion	34,498	28,305	14,751
% cumulé	34,498	62,803	77,555

Tab 20 : Valeurs propres et proportions des principaux facteurs.

La **figure 23** montre la projection des génotypes et des variables sur le plan engendré par les axes 1 et 2, le pourcentage de contribution des variables dans l'édification des deux axes est aussi représenté. Le plan (1-2) fournit 62.80% de l'information.

La première composante principale indique 34,5% de la variabilité observée. Les caractères poids frais et sec aérien, racinaire et total, nombre de ramification totale (PFA, PFR, PFT, PSR, PST, NRT) et le nombre et le poids des gousses et des graines par plant (NGsP, PGsP, NGrP, PGrP) ont la contribution la plus élevée à son édification et sont en corrélation positive avec cet axe. Négativement, les caractères : hauteur des tiges finales (HTF), longueur des entre nœuds (LEN), nombre et le poids de grains de 30 gousses (NGr30Gs, PGr30Gs), poids de 30 gousses (P30Gs) et poids d'une gousse (P1Gr) sont corrélés négativement à l'axe 1.

Les lignées L6 et L10 et L4 (Groupe A) sont corrélés positivement à l'axe 1 et s'opposent aux lignées L2, L12, L3 et L13 (Groupe B). Cet axe différencie les lignées en deux groupes, le Groupe A dont les lignées produisent plus de gousses et decgrains mais de petites tailles et, le Groupe B caractérisé une faible production de gousses mais qui sont de gros calibre renfermant plusieurs graines, d'un poids élevée ; ce groupe est représenté par la lignée L2 (**Fig. 25**).

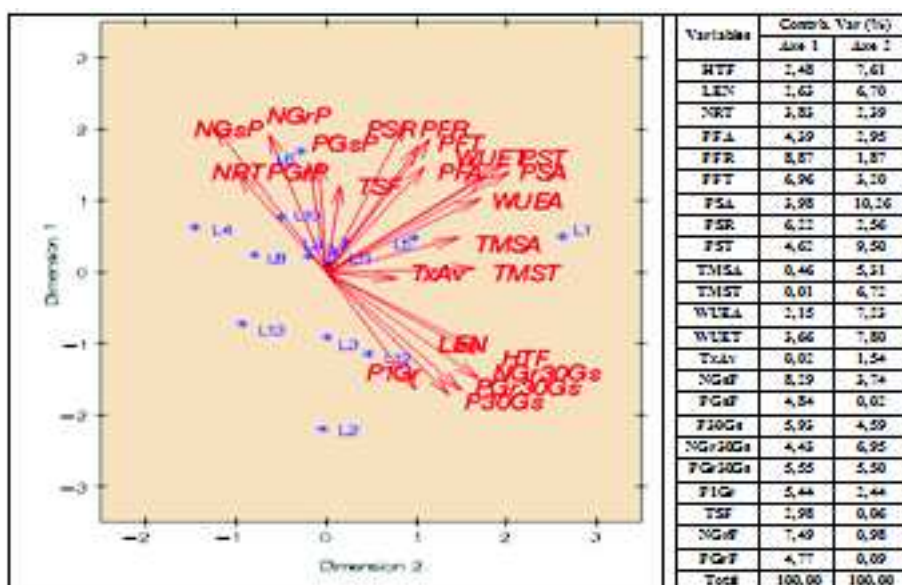


Fig. 25 : Projection des géotypes et variables (sous stress hydrique) sur le plan 1-2 de l'ACP.

La deuxième composante principale extrait 28,31% de la variabilité observée. Les caractères (HTF, LEN, PSA, PST, TMSA, TMST, WUEA, WUET, NGr30Gs) ont la contribution la plus élevée à son édification et sont en corrélation positives avec cet axe. C'est un axe qui sépare donc les lignées selon leurs performances en biomasse et leur efficacité en eau. En effet, les lignées L1 et L5T sont corrélées positivement à l'axe 2 et sont en opposition avec la lignée L4.

III-4-2- ACP par rapport aux DRI des caractères étudiés

Le **tableau 21** ci-dessous montre les valeurs propres des trois principaux axes qui totalisent 69,38% de la variabilité observée. Les deux premiers axes (1 et 2) fournissent 50,61% de la variabilité totale observée (**fig. 26**)

	F1	F2	F3
Valeur propre	6,438	5,201	4,317
Proportions	27,993	22,613	18,768
% cumulé	27,993	50,607	69,375

Tab. 21. : Valeurs propres et proportions des principaux facteurs.

La première composante principale extrait 27,99% de la variabilité (**Fig. 26**). Les DRI des caractères (PSA, PST, TMSA, TMST, WUEA, WUET, PGsP) ont la contribution la plus élevée à son édification et sont en corrélation positive avec cet axe. Cet axe par contre est en corrélation négative avec les DRI des caractères (LEN, TxSF). Les lignées sont séparées selon cet axe en un groupe (L8, L10 et L9) qui est le moins affecté par le stress hydrique pour la production de biomasse et pour l'efficacité de l'eau et, un autre groupe (L2, L12 et le témoin L5T) dont la croissance des tiges primaires est la moins sensible au stress.

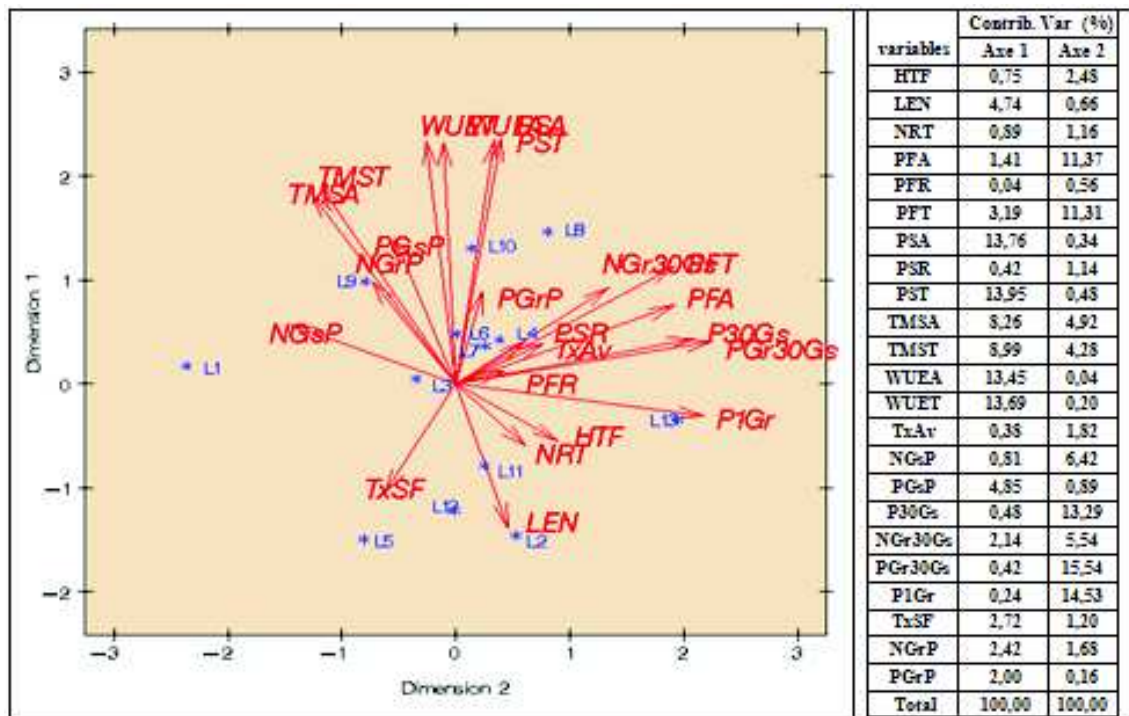


Fig. 26 : Projection des géotypes et des indices de stress sur le plan 1-2 de l'ACP.

La deuxième composante principale extrait 22,61% de la variabilité observée. Les DRI des caractères (PFA, PFT, P30Gs, NGr30Gs, PGr30Gs, P1Gr) ont la contribution la plus élevée à son édification et sont en corrélation positive avec cet axe, ils caractérisent les lignées L13, L8 et L2. Par contre l'indice de stress du NGsP est en corrélation négative avec cet axe, il caractérise la lignée L1 et le témoin. Cet axe sépare les lignées L13, L8 et L2 qui sont le plus affectées par le stress dans leur production de gousses mais qui arrivent à produire des gousses plus grosses renfermant plus de graines. Ces lignées s'opposent à la lignée L1.

CHAPITRE II. DISCUSSION GENERALE

1- En conditions hydriques favorables

Le cycle de vie *Medicago truncatula*, du semis jusqu'à la sénescence totale, était en moyenne de **145** jours (**20,7** semaines). *Le comportement de cette plante à l'ETM* montre une grande variabilité vis-à-vis de la floraison, cette dernière commence en moyenne **68,6** jours après le semis (JAS), mais l'écart est de **16,5** jours entre lignées précoces et celles tardives. Dans les mêmes conditions cette plante peut développer une longueur des rameaux B0 et B1 dépassant les **68** cm avec un taux de croissance de **1,04** cm/jours légèrement inférieur à celle du témoin *Medicago ciliaris* qui est le plus précoce.

Elle se caractérise moyennement par **4** fleurs par bouquet et elle donne **537** gousses (équivalent de **36,74g**) par plante renfermant chacune **6** petites graines, ce qui permet à cette plante de produire plus de **3100** graines (équivalent de **12,21g**) par plante, un nombre considéré comme un stocke grainier important dans le sol, produit par une seule plante

annuelle et pour une seule saison de culture. *Medicago truncatula* est une plante qui peut produire en moyenne au stade pleine floraison (**76 JAS**) un rendement en fourrage sec de **11,72 g** tout en consommant **8813 ml** d'eau avec une efficacité en eau pour cette période de **1,25 g/L**.

Mais, à un stade plus tardif (**88 JAS**), cette plante peut produire **29,55 g** de matière sèche aérienne (tiges, feuilles, gousses et fleurs) avec une efficacité d'utilisation en eau de **1,93 g/L**. Cette plante possède, en fin du cycle, un nombre de ramifications primaires et secondaires de **10,5** et **9,5** respectivement, contrairement au témoin *M. polymorpha* qui possède **5** et **8** ramifications primaires et secondaires et qui produit **617** gousses à l'ETM.

L'alimentation en eau des cultures à l'ETM est favorable à la croissance et au développement. Cependant, elle n'assure pas les meilleures performances techniques pour certaines productions. Ainsi, il y a incompatibilité par exemple entre un trop fort développement végétatif et la production de graines de nombreuses légumineuses : déséquilibre du rapport N/C, risque de verse, d'avortement (pois...) (**Rieul, 2000**). Néanmoins, il ne faut jamais penser que l'eau est la clé de tous les problèmes d'une agriculture performante, c'est la combinaison des autres facteurs de production avec l'eau et accompagnée par toutes les opérations culturales nécessaires à chaque culture, « l'itinéraire technique », qui permet d'obtenir une bonne production (**Mouhouche et Guemraoui, 2004**).

Dans ces conditions, nos résultats sur le *début floraison* montrent que ce sont les lignées originaires de basses altitudes et de pluviométries moyennes qui sont les plus précoces. En outre, les résultats témoignent que les lignées (y compris le témoin) les plus précoces sont les moins ramifiées. Sur 63 populations de *M. ciliaris* collectées en Algérie, **Abdelguerfi et Laouar (2000)** ont constaté que les populations des régions semi-arides sont les plus précoces alors que celles des régions humides sont les plus tardives, de plus l'écart de début floraison entre les lignées d'une même population est de 3,7, 4,6 et 6,0 jours respectivement pour les populations du semi-aride, subhumide et humide. Un QTL expliquant une grande partie de la variation génétique pour la date de floraison et la croissance des branches a été trouvé sur le chromosome 7 ; les autres chromosomes ont été également impliqués dans la variation détectée dans plusieurs traits (**Julier et al. , 2007**).

Des corrélations montrent qu'une plus grande consommation hydrique a été toujours associée à un grand potentiel productif en matière sèche fourragère sous les deux régimes hydrique humide et sec. Des résultats similaires ont été obtenus par **Haddadj (1995)**, sur des populations de *M. ciliaris*, qui indique que les quantités d'évapotranspiration relativement élevées sont en relation avec une importante production en matière sèche chez ces populations et que les faibles productions sont enregistrées chez les populations les moins consommatrices.

2- En conditions hydriques stressantes

Suite à la réduction des apports en eau d'irrigation, plusieurs caractères sont affectés surtout négativement et à des degrés variables entre lignées.

· *Pour la croissance des plantes*, le développement en longueur des rameaux primaires et des entre-nœuds, a été respectivement diminué de **34%** et de **19%**, où les lignées L2 et L13 qualifiées de précoces sont les moins affectées par le stress concernant ces deux paramètres. La réduction de la croissance peut être liée à une

réduction de la capacité photosynthétique suite à une diminution de la conductance stomatique de CO₂ sous contrainte hydrique. La diminution des longueurs des entrenœuds n'est pas la seule conséquence directe de réduction des hauteurs de tiges car même la formation de nouveaux entrenœuds est affectée aussi sous conditions de déficience hydrique. Cette formation nécessite des réserves hydriques et minérales mises à la disposition de la plante ; mais, le stress hydrique limite leur disponibilité. Le nombre des entrenœuds est affecté en cas de contrainte hydrique par un arrêt du développement de l'extrémité apicale (**Ousalem, 1998**). Cette réduction des entrenœuds est accompagnée par une réduction des longueurs des rameaux chez les populations de *M. truncatula* de **49%** et de **50%** pour des stress appliqués durant toute la phase végétatif et floraison respectivement (**Chebouti, 1999**). Un taux de réduction élevé a été rapporté dans les résultats de **Ouafi (2009)** où la croissance du premier rameau est nettement affectée (de **61,56%**) par un stress appliqué au stade végétatif, chez les populations de *M. truncatula*, mais après cessation du stress, il a été constaté que la vitesse de la croissance était plus importante chez les plantes stressées chez les plantes conduites sans restriction hydrique.

Plusieurs caractéristiques de la feuille, telles que le potentiel hydrique, l'ajustement osmotique, la stabilité de la membrane cellulaire, la cuticule et présence de cire ainsi que la conductance stomatique, peuvent affecter la résistance des plantes vis-à-vis du stress hydrique (**Islam et al . , 2009**). Une sénescence des feuilles a été constatée chez les plantes conduites à l'ETM avec un taux de **20%**, alors qu'en condition de stress le taux était de **53,15%**. La sénescence foliaire peut être attribuée à l'action de l'*Acide abscissique* ; hormone ayant pour rôle physiologique principal communément admis l'inhibition de la croissance et du développement des parties aériennes sur des plants bien alimentés en eau ; elle agit comme une anti-gibbérelline. C'est une des stratégies de réponse au déficit hydrique prononcé (**Kiani, 2007**). En réponse à la sécheresse, la sénescence foliaire limite considérablement la production primaire et conduit également à une allocation préférentielle des ressources aux organes reproducteurs. La sénescence foliaire précoce est habituellement corrélée à un faible rendement (**Merrien et al. , 1981**). L'accélération de la dessiccation et la mort des feuilles est le moyen par lequel les plantes réduisent leurs besoins en eau sous stress hydrique. La dessiccation du feuillage se fait d'une manière progressive de la base (feuilles âgées) vers le haut (feuilles jeunes) malgré que les feuilles de la base soient, en général, en bon état hydrique par rapport à celles de la base (**Blum, 2009**).

L'effet du stress s'est traduit aussi par une chute importante de la croissance pondérale, en effet le stress hydrique réduit d'avantage la croissance des parties aériennes comparativement à celle des racines. Les rendements en matière sèche des parties aériennes, racinaires et totales sont respectivement diminués de **47%**, **44%** et de **47%**, en contrepartie le taux de matière sèche est augmenté de **50%** pour les parties aériennes et de **0,6%** pour les racines. Une analyse des pertes de rendement par application de stress hydriques chez le riz a été réalisée par **Pantuwan (2000)** selon laquelle l'intensité du traitement, le stade de développement et la modalité d'application, des chutes de **18 à 81%** ont été enregistrées par rapport au témoin irrigué de façon optimale. Mais, il convient de distinguer sur le plan agronomique entre la survie et la tolérance à la sécheresse. D'un point de vue agronomique, **la tolérance** à la sécheresse est la capacité de la plante à croître et donner des rendements satisfaisants dans des zones sujettes à des déficits hydriques

épisodiques (Turner 1997), la survie par contre n'implique obligatoirement pas un accroissement dans la croissance et le rendement.

Nos résultats révèlent que le témoin, *M. polymorpha*, (pluviométrie : 450 mm, altitude : 19 m) et la lignée L1 (613 mm, 30 m) sont les plus productifs en matière sèche aérienne et racinaire en condition hydrique optimale ; mais lors du stress, le témoin semble le plus sensible. La lignée L12 (250 mm, 1050 m) qui possède les racines les moins développées, présente elle aussi un bon rendement fourrager à l'ETM, mais en cas de stress ce rendement se voit très diminué. Selon Laouar et al. (2000), les populations précoces dans le cycle de floraison et de fructification produisent plus de matière sèche racinaire.

En outre, il a été démontré que lorsque le potentiel hydrique du sol est élevé, la croissance des racines a lieu en surface (Avril à Juin), mais lorsque le potentiel est bas, la croissance racinaire a lieu en profondeur (Aïd, 2010). Un système racinaire capable d'extraire l'eau du sol serait un caractère essentiel pour l'adaptation à la sécheresse. Cette caractéristique revêt une importance particulière pour les cultures qui subissent régulièrement des déficits hydriques durant le cycle de croissance. Son impact sur le rendement serait particulièrement élevé car il interviendrait directement dans la disponibilité de l'eau pour la plante en conditions de stress (El Fakhri et al., 2010). Mais l'optimisation de l'absorption d'eau est liée à un ensemble complexe de caractères morphologiques des racines : masse et volume, ramifications, profondeur (Ramanjulu et Bartels 2002).

- Concernant l'effet du stress sur le nombre de fleurs par bouquet, il est difficile de mettre en évidence l'effet du stress sur ce caractère, car le nombre de fleurs n'est pas régulier et il est variable d'un nœud à l'autre (Abdelguerfi, 2011). Les medics produisent plusieurs types d'infrutescences, par exemple *M. ciliaris* produit plus de types d'infrutescences à 1, 2 et 3 gousses ; les infrutescences à une gousse donnent des gousses plus lourdes et qui contiennent plus de graines que celles à 2 et 3 gousses (Laouar et Abdelguerfi, 2000). Cela montre bien que ce caractère ne peut être bien suivi que si et seulement si les de bouquets bien précis issus des mêmes nœuds sont minutieusement suivis. En effet, lors du stress, un certain nombre de fleurs peut avorter et même quelques gousses peuvent être éliminées prématurément.
- Comparées à d'autres travaux, nos lignées révèlent d'après les résultats obtenus concernant la production en gousses et en graines (en nombre et en poids), un potentiel productif important dépassant largement ceux obtenus sur d'autres luzernes annuelles par Chebouti et al. (2000) et par Mefti et al. (2001), et ceci que ce soit en régime humide (543 gousses et 3031 graines par plante) ou en sec (320 gousses et 1813 graines par plante). Il semble selon Senhadri-Maamri et al. (1992), qui ont étudié la biométrie des gousses et des graines de populations de deux générations de *Medicago truncatula* Gaert., que le matériel de multiplication possède des valeurs plus élevées par rapport au matériel de prospection et, il en est de même pour la variabilité inter-population. L'utilisation d'un substrat très riche en matière organique (tourbe) dans notre expérimentation avait peut-être une contribution dans l'augmentation de la production en grains car, malgré le lessivage entraîné par le drainage, le substrat fournit toujours des éléments fertilisant en alimentant en permanence les plantes.

Sur la production en grains, nos résultats montrent que le stress hydrique affecte particulièrement la production en nombre total de gousses par plante avec une diminution de 41% (y compris le témoin). Cependant, l'effet du stress était positif sur le poids des

gousses (+17%) et des graines (+0.5%) sans avoir un effet sur le nombre de graines (-0,1%). Lestravaux de **Chebouti et al. (2000)** sur l'effet stress chez les trois espèces, *M. aculeata*, *M. orbicularis* et *M. truncatula*, montrent que sur deux plants par pots et en régime humide, le *nombre total de gousses par pot* était de **115,4**, **121,9**, et **152,1** gousses respectivement pour les trois espèces, alors qu'en régime sec et pour un stress appliqué du début jusqu'à la fin de la floraison, la diminution était presque similaires et de **46%**.

Pour le poids total qui était de **17,60g** chez *M. truncatula* en régime humide, la diminution en cas de stress était de **28%**, pour ce qui est du nombre et du poids des graines totales qui étaient de **1187** graines et de **4,63g**, ils se sont réduit respectivement en cas du stress de **53%** et de **57%**. Les résultats de **Mefti et al. (2001)** montrent que le nombre gousses par pot (avec 2 plants), est en moyenne de **90** gousses à l'ETM et que le déficit hydrique, appliqué à partir du début floraison jusqu'à la fin du cycle, a causé une réduction de **27,62%** de la production de gousses chez des plantes de *M. truncatula*.

Chez le haricot nain (*Phaseolus vulgaris* L., variété Coco du Prague), **Mouhouche et al. (1998)** signalent que le nombre de gousses par plante est la composante du rendement la plus sensible à un stress hydrique appliqué au stade floraison et que la diminution était de **53%** par rapport au traitement humide conduit à l'ETM, alors que le nombre de graines par gousses était moins sensible avec une diminution maximale de **13%**. Le même travail de recherche montre l'importance de la probabilité d'avortement d'un bouton floral qui de **50%** pour le non stressé et de **70%** pour le stressé ; ces valeurs sont trop élevées comparées à nos résultats où on a obtenus des taux d'avortements moyens de **21,21%** et de **39,77%** respectivement pour les traitement humide et secs, mais il faut préciser que dans le cas du haricot, on peut dénombrer avec précision le nombre de fleurs et gousses et leurs évolution c'est qui n'est pas le cas chez *Medicago truncatula*.

Nos résultats peuvent être expliqués par le fait que dans le cas de notre travail, l'effet répétitif du stress qui est appliqué d'une manière plus ou moins sévère (**73%** de la CR) et continue (courte durée de rétablissement d'un jour à l'ETM), a forcé la plante stressée de diminué sa production en nombre de gousses par plante (de **41%**) et qui, par voie de conséquence a conduit à l'amélioration de la qualité des fruit par la sélection de gousses de gros calibre. Mais il semble que c'est la période courte du stress (3 semaines) et la conduite à l'ETM des plantes en fin de stress, qui a permis aux peu de gousses restantes d'être bien développées et particulièrement aux graines qu'elles renferment de maintenir leurs propres poids.

A l'inverse de notre travail, c'est *la durée longue du stress* appliquée durant toute la durée de floraison et touchant toutes les phases de développement des gousses et des graines, qui a provoqué la forte chute en nombre et en poids des gousses et des graines produites. Toutefois, il faut signaler que dans notre essai, seuls deux génotypes (L1 et L5T) ont été touchés par la diminution aussi bien du nombre que du poids pour les gousses et les graines.

Mais si notre stress appliqué au stade pleine floraison, et qu'on peut qualifier de courte durée par rapports aux travaux précités, n'avait aucun effet négatif sur le poids des gousses, ni sur le nombre et le poids des graines, mais il avait plutôt défavorisé le nombre de gousses tout en augmentant leur leurs poids ainsi que le nombre et le poids des graines (excepté deux génotypes L1 et L5T). Le travail de **Chebouti et al. (2000)** semble en contradiction avec nos résultats, car selon ces auteurs, même avec un stress appliqué du début jusqu'à la fin de la phase végétative (et sans atteindre la phase floraison), le déficit hydrique a causé toujours des réductions dans la production de gousses et de graines (nombre et poids), sauf que la réduction était moins importante par rapport à un stress appliqué durant

la phase floraison et ceci chez trois espèces de *Medicago* : *M. aculeata*, *M. orbicularis* et *M. truncatula*. Les taux de réduction étaient presque similaires et en moyenne de **25%** pour le nombre de gousses par plante, de **28%** pour le poids des gousses par plante, de **33%** pour le nombre de graine et **39%** pour le poids des graines.

D'autre part, les résultats de *la production en gousses* sont tout à fait contradictoire à ceux trouvés par **Chebouti (1999)** où il indique que les populations précoces sont les plus productives en gousses car échappant selon lui aux températures élevées qui peuvent augmenter le taux d'avortement des fleurs. Les résultats de notre travail montrent que la production en grains était toujours nettement supérieure chez les lignées tardives ; certes le taux d'avortement calculé était bien supérieur chez les lignées tardive, mais au contraire nos résultats montrent par le biais des composantes du rendement que ce sont les lignées les plus tardives qui sont les plus productives en gousses et celles qui sont précoces sont beaucoup moins productives car, *les lignées tardives se caractérisent par* : *i*) un nombre de fleurs par bouquet plus élevée ; *ii*) elles forment plus de ramifications primaires et secondaires à raison de 60 ramifications contre 45 pour les lignées précoces ce qui leur confère une bonne contribution à l'élaboration du rendement en gousses ; *iii*) elles possèdent des gousses de poids variables parfois très faibles permettant à la plante de porter plusieurs gousses d'un poids physiologiquement supportable ; en outre, *iv*) les lignées précoces se caractérisent parfois par un cycle court dû à une sénescence précoce, ce qui affectent négativement l'étalement de la floraison et donc la production de gousses et de graines. **Yahiaoui et Abdelguerfi (1995)** affirment que les populations qui sont précoces pour la floraison, sont aussi précoces pour d'autres caractères phénologiques tel que formation et la maturation des gousses ainsi qu'une entrée précoce en sénescence.

Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus durant notre expérimentation où la lignée **L2**, originaire de l'Ouest du pays (Maghina, pluviométrie : 386 mm, altitude : 350 m), la plus précoces et la moins productive en gousses, est rentrée tôt en sénescence par rapport au reste des génotypes. **Soltani et al . (2006)** quant à eux notent chez le pois chiche qu'il a été observé que les lignées fleurissant tardivement ont déjà bien développé leurs parties végétatives et permettent par la suite un meilleur remplissage des graines.

L'efficacité de l'utilisation de l'eau, ce paramètre est pour une part déterminée génétiquement et constitue une caractéristique de l'espèce ou de l'individu et pour une part sous contrôle environnemental (**Brendel et al. , 2002**). La diminution des consommations hydrique de **31%**, chez la plante stressée de notre expérimentation, a provoqué une chute de **47%** du rendement en matière sèche aérienne, cela implique que *l'efficacité de l'utilisation en eau se trouve elle aussi défavorisée* sous la contrainte hydrique où le témoin se montre le plus sensible. Chez l'ensemble des génotypes, la diminution générale était de **20%** par rapport aux conditions d'irrigation optimales (de **2,27** à **1,81g/L**). Les lignées dont l'WUE est la moins affectées (telles que la L8, L9 et L10) sont celles ayant un poids sec surtout de la partie aérienne légèrement affecté et une bonne amélioration du TMS lors du stress hydrique.

Mouhouche (2004) rapporte qu'en agriculture, 1m³ d'eau d'irrigation peut produire 30 à 40 Kg de pastèque, 12 Kg de pomme de terre, 10 Kg de tomate, 3 à 4 Kg de fraise et, seulement 0,5 à 1 Kg de blé. Des résultats suggèrent qu'un apport adéquat (de faible quantité) en azote serait recommandé pour stimuler la croissance, améliorer l'efficacité d'utilisation en eau mais aussi pour *alléger les effets du stress hydrique* et permettre un bon établissement des plantules (de *Sophora davidii*) sous conditions hydriques restrictives (**Wu et al. , 2007**). Mais *lors d'un stress hydrique* , les résultats divergent.

Certains travaux d'ingénieur agronome réalisés à l'ENSA, indiquent *l'effet défavorable* du stress hydrique sur l'WUE (**Siakhene, 1984 ; Tefiani, 1985 ; Ouchai, 1990 ; Haddadj, 1995**). Les travaux de **Bellague et al. (2008)** et **Khelifi et al. (2008)** sur le comportement de quelque cultivars de luzerne pérennes en Algérie, montrent aussi que la WUE est variable selon les coupes et il tend à diminuer fortement au fur et mesure que l'on s'approche de la saison estivale même avec une irrigation dans un essai conduit à l'ETM ; mais les moyennes montrent que la WUE est toujours faible sous un régime sec, de $2,5\text{Kg/m}^3$ à $2,05$ en zone subhumide et de $2,48$ à $1,25\text{Kg/m}^3$ en zone semi-aride, respectivement du régime humide au régime sec.

Un stress hydrique appliqué durant la *phase végétative-phase avant maturité des grains* et à une intensité de stress qui varie entre 65% à 75% de la capacité au champ, a provoqué chez des génotypes de blé dur, une réduction significatives de l'efficacité avec $2,8\text{g/Kg}$ et de $1,57\text{g/Kg}$ respectivement pour les traitements irrigué et stressé concernant WUET (**Solomon et al. , 2003**). Ces auteurs indiquent aussi que les génotypes tolérant ont généralement une WUEG (grains) élevée par rapport aux génotypes sensibles.

Certains d'autres expliquent que l'augmentation ou la diminution de l'efficacité dépend de l'intensité du stress ; **Zhao et al. (2004)** indiquent, qu'en général, un léger stress hydrique produit une augmentation de l'efficacité, alors qu'un stress sévère, qui réduit l'activité des enzymes photosynthétiques, provoque une diminution de l'efficacité.

A l'inverse de ces résultats, plusieurs chercheurs montrent que *la WUE augmente* avec l'augmentation du stress et un approvisionnement en eau la réduit et cela a été confirmé récemment par la discrimination isotopique du carbone. Des travaux indiquent que la WUE calculée pour la plante entière était significativement élevée comparée au traitement bien irrigué chez les plantes de la canne à sucre (**Rytter, 2005**). D'autres auteurs ont découvert que la WUE (WUEA, WUET) augmente avec l'augmentation du stress hydrique mais uniquement pour les premiers stades de développement du Riz ; selon ces auteurs la WUE augmente en raison d'une réduction de la conductance d'une manière aussi importante que la réduction de l'assimilation. Mais après le stade tallage (tallage-floraison et maturité), le stress hydrique diminue la WUE (**Zhao et al. , 2004**).

En fin, il a été démontré que *la résistance à la sécheresse a été trouvée associée à une faible WUE* lorsqu'elle a été analysée par le delta (discrimination isotopique du carbone) sous un approvisionnement en eau limitée. Les résultats de **Pinheiro et al. (2005 in Blum, 2009)** confirment qu'un clone de *Coffea canephora* résistant à la sécheresse avait relativement une WUE plus faible que le clone connu comme étant sensible à la sécheresse et que la résistance a été associée à des racines plus profondes et sans doute à une plus grande utilisation en eau (WU). Selon **Solomon et al. (2003)**, les génotypes de blé dur sensibles au stress hydrique utilisent une grande quantité d'eau avant l'anthèse et une faible quantité après l'anthèse, à l'inverse des génotypes tolérants qui utilisent la grande proportion hydrique durant la période post-anthèse.

Blum (2009) conclue que le renforcement de la production de biomasse en période de sécheresse peut être réalisé principalement par la maximisation de prise d'eau du sol tout en détournant la plus grande partie de l'humidité du sol disponible vers la transpiration stomatique. Ceci est défini comme l'utilisation effective de l'eau (*effective use of water EUW*) et il est le principal moteur de l'amélioration agronomique ou génétique de la production des cultures sous un régime d'eau limité. Le facteur déterminant de la production végétale dans la plupart des conditions d'approvisionnement en eau limité est bien donc, l'Utilisation effective de l'eau et non pas l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE).

Conclusion Générale

Nos résultats montrent que les lignées à croissance végétative lente se caractérisent par une floraison très tardive et par une ramification plus importante, comparées aux lignées à grande vitesse de croissance et qui sont plus précoces et moins ramifiées. La tardivité de floraison renseigne sur l'étalement de la phase végétative de la plante qui permet de produire une bonne quantité de matière sèche avant la formation des gousses mûres. Les lignées étudiées montrent un grand écart de date floraison (plus de 2 semaines) entre les lignées précoces et celles tardives. Le stade floraison est généralement pris en considération lors de la récolte des fourrages où un compromis est recherché entre la quantité en matière sèche produite et la qualité.

Le comportement hydrique des lignées de *M. truncatula* à l'ETM a permis de mettre en évidence les lignées plus (L1, L5T) ou moins (L8 surtout) consommatrices d'eau mais également de prévoir leur capacités productives particulièrement en rendement fourrager. En effet, une bonne consommation hydrique était toujours associée à une meilleure performance productive.

L'exposition des plantes de Medicago truncatula au stress hydrique par la réduction des apports en eau d'irrigation s'est traduite positivement par une certaine économie d'eau, mais s'est répercutée gravement sur *la croissance, le développement et la productivité des plantes et l'efficience de l'utilisation de l'eau*. En effet, dès l'imposition du stress, les plantes commencent à limiter les consommations hydrique journalière, où on enregistre un grand écart entre les plantes conduites en régime humide et sec ; cette limitation peut aller jusqu'à la réduction de la moitié des quantités consommées par jour.

Dès lors des conséquences se manifestent progressivement sur différents aspects de la plante et affectent au fur et à mesure plusieurs paramètres morphologiques et agronomiques, à des degrés plus ou moins variables entre organes d'une même plante et entre différentes lignées d'une même espèce. Et, si les effets *immédiats* touchent sévèrement la croissance végétative et la production en matière sèche fourragère en affectant l'efficience d'utilisation de l'eau de ces plantes, le rendement en gousses se trouve considérablement défavorisé *a posteriori*. Néanmoins, les phénomènes ultérieurs post-stress, de *forte reprise de floraison caractérisant les plantes de Medicago*, permettent exclusivement aux plantes stressées de récupérer une partie de la production en gousses compromise lors du stress.

Des différences significatives ont été observées entre les lignées pour l'ensemble des caractères étudiés, ces différences s'expliquent par l'existence d'une grande variabilité génétique. De plus, si le mot 'stress' ne sous-entend que des effets négatifs, les résultats de notre expérimentation lui attribuent certains effets positifs notamment quant à la production pondérale de gousses. Des gousses de grand calibre et de poids élevé ont été obtenues à partir de plantes stressées, le nombre et le poids des graines qu'elles renferment sont également maintenus stables. Ainsi, le seul effet défavorable du stress hydrique sur la production en grains, était sur le nombre de gousses par plante excepté pour deux génotypes (la lignée L1 et le témoin L5T où le poids de graines est également touché).

Cet effet positif sur le poids des gousses est dû à l'effet répétitif du stress qui a permis d'éliminer systématiquement les fleurs et/ou des gousses très concurrencées, mal formées ou

de faible alimentation hydrique. Les lignées tardives, bien qu'elles soient les plus touchées par le phénomène d'avortement, possèdent plusieurs caractéristiques de composantes du rendement, leur permettant d'avoir une meilleure production en grain nettement supérieure à celle des lignées précoces. *Sur la production en grains*, notre stress appliqué durant la phase pleine floraison d'une manière sévère et pendant une courte durée, était un peu particulier, car il a conduit la plante stressée, d'une part, à diminuer significativement sa production en nombre de gousses et à sélectionner, d'autre part, des gousses de gros calibres suite à l'avortement et à la chute de certaines fleurs et gousses prématurément.

La durée courte également de ce stress et la conduite par la suite à l'ETM des plantes stressées ont laissé les phases de maturation particulièrement des graines s'échapper réellement du stress, ce qui a permis au nombre de graines d'être maintenu stable mais au poids des graines d'être nettement amélioré. En outre, l'écart en terme de production en gousses entre traitement (modalités) ne devrait pas être attribué au seul *effet direct* du stress, car après une courte période de stress, les plantes "stressées" de *Medicago truncatula* conduites à l'ETM, repartent en floraison d'une manière plus ou moins forte, conduisant ainsi à une augmentation *indirecte* de la production en grains de la plante stressée.

Il est difficile de trouver une lignée résistante vis-à-vis du stress hydrique pour tous les caractères car si une plante se montre plus résistante par ce que son rendement en matières sèche est le moins affecté, elle se trouve en même temps sensible car son rendement en grains est le plus amoindri. Néanmoins, le classement selon le RSI de tous les caractères étudiés met en première position les deux lignées L8 et L6 comme lignées les plus résistantes et en dernière position la lignée L12 et le témoin L5T. Ainsi, il est donc indispensable de viser un objectif très précis de la sélection (production fourragère, rendement en grains) et de définir les conditions de mise en culture, notamment la disponibilité en eau (irrigation, région pluvieuse ou non). La production de grains pour une plante fourragère, particulièrement du genre *Medicago*, n'est pas une finalité, c'est beaucoup plus la production en matière verte et sèche qui importe.

La production de grains pour cette plante aura donc un objectif commun et de même importance entre lignées précoces et tardives, mais ce qui peut être différent, c'est l'orientation vers les zones de culture ; les lignées précoces (ex. L2, L13) du fait de leur croissance rapide et leur cycle parfois court, seront orientées vers des zones où la sécheresse survient très tôt, alors que les lignées tardives (L1, L6, L11 et L12) seront mieux utilisées en zones où la période des pluies est très étalée dans l'année.

A l'issue de ce travail qui a porté sur l'étude de l'effet du stress hydrique sur des lignées algériennes de *M. truncatula* et qui a participé à la production de semences en laissant plus de 11300 gousses et 4620 graines issues des deux traitements humide et sec, il a contribué ainsi indirectement à la conservation de ce matériel génétique à forte variabilité et qui présente une intéressante valeur par rapport au matériel provenant directement des prospections. Il convient de développer certaines connaissances sur certains effets post-stress, particulièrement la floraison après stress en essayant de répondre à certaines questions :

- Est-ce que la forte reprise de floraison est influencée par l'intensité et/ ou la durée du stress ?
- Est-ce qu'on peut utiliser le stress pour améliorer la production en qualité de grains? Quelle est si possible la durée et ou l'intensité du stress idéale ?
- Est-ce que les graines issues des plantes stressées possèdent toujours la même capacité germinative.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABAYOMI Y. A. ET ABIDOYE T. O., 2009. Evaluation of cowpea genotypes for soil moisture stress tolerance under screen house conditions . *African Journal of Plant Science* Vol. 3 (10), pp. 229-237.
- ABDELGUERFI A., 1976. Contribution à l'étude de la répartition des espèces locales de luzernes annuelles en fonction des facteurs du milieu (200 stations). Liaison entre les caractères de ces 200 populations étudiées à Beni-Slimane et leur milieu d'origine. These Ing. INA, El Harrach, 74 p.
- ABDELGUERFI, A. 1994. Autoécologie de quelques légumineuses spontanées d'intérêt fourrager et pastoral en Algérie. In « Facteurs Limitant la Fixation Symbiotique dans le Bassin Méditerranéen », Montpellier (France). Les Colloques de l'INRA, 77 : 229-238.
- ABDELGUERFI A, 2011. Communication personnelle lors d'une réunion sur l'état d'avancement du travail.
- ABDELGUERFI A. et LAOUAR M., 1998. Autoécologie de légumineuses spontanées d'intérêt fourrager et/ou pastoral en Algérie. *Opt. Médit.*, 97-101.
- ABDELGUERFI A., LAOUAR M., 2000. Effet des conditions bioclimatiques du milieu d'origine sur le comportement et la floraison des populations de *M. ciliaris* (L.) Krock. *Opt. Médit.*, 241-243.
- ABDELGUERFI A., CHAPOT, J, CONESA, A.P., 1988a. Contribution à l'étude des luzernes annuelles spontanées en Algérie selon certains facteurs du milieu. *Fourrages*, 113 : 89-106.
- ABDELGUERFI, A., CHAPOT, J., CONESA, AP., ROSEAU, R., 1988b. Contribution à l'étude des espèces spontanées du genre *Medicago* L. en Algérie. I. Répartition des espèces en fonction des facteurs du milieu. *Ann. Inst. Nat. Agro. El-Harrach*, 12 (1) : 304-328.
- ABDELKEFI A et MARRAKCHI M., 1998. Les ressources phytogénétiques fourragères et pastorales : de l'érosion a la conservation. *Opt. Médit.*, 15-27.
- AID F., 2010. Document d'appui du cours sur les stress biotique et abiotique, en Ecole Doctorale de Biotechnologies Végétales de l'ENSA d'El Harrach (Alger).
- ABAYOMI Y. A. AND ABIDOYE T. O., 2009. Evaluation of Cowpea genotypes for soil moisture stress tolerance under screen house conditions. *African Journal of Plant Science*, 3 (10); 229-237.
- ATTIA F. 2007. Effet du stress hydrique sur le comportement écophysiological et la maturité phénolique de la vigne *Vitis vinifera* L. : étude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées. thèse. doct. sciences agronomiques. Institut National Polytechnique de Toulouse, 194 p.
- BADRI M, ARRAOUADI S, HUGUET T AND AOUANI M A., 2010. Comparative effects of water deficit on *Medicago laciniata* and *Medicago truncatula* lines sampled

- from sympatric populations. *Journal of Plant Breeding and Crop Science Vol. 2(8)*, pp. 259-266, August 2010.
- BARAGE M., BALLA A., ADAM T., 2006. Identification des sources de tolérance au stress hydrique sur des espèces sauvages de la famille des Cucurbitacées en culture *in vitro*. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 10 (1) : 3-6.
- BELLAGUE D., CHEDJERAT A., KHEDIME A., KHELIFI H., M'HAMDI BOUZINA M., MERABET B., LAOUAR M. et ABDELGUERFI A., 2008. comportement et efficacité d'utilisation de l'eau de quelques cultivars de luzerne pérenne dans une région semi-aride en Algérie. *Opt. Médit. Serie A*, 79, 265-268.
- BLUM A., 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research* 112 (2009) 119–123.
- BRENDEL, O., POT, D., PLOMION, C., ROZENBERG, P. AND GUEHL, J.M., 2002. Genetic parameters and QTL analysis of delta 13C and ring width in maritime pine. *Plant, Cell Environ.* 25 (8) : 945- 953.
- BLUM A., 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112: 119–123.
- CHAUMEIL P., 2006. Plasticité moléculaire de deux écotypes de pin maritime soumis à un stress osmotique. Thèse. Doct. Biologie Végétale et Forestière Univ. Nancy I, 382 p.
- CHAVES M.M., MAROCO J.P. and PEREIRA J.S., 2003. Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.*, 30 : 239-264.
- CHEBOUTI A., 1999. Effet du stress hydrique sur le comportement et la production de semences chez trois espèces de luzernes annuelles: *M. aculeata*, *M. orbicularis* et *M. truncatula*. Thèse. Magister INA. El Harrach, p 125.
- CHEBOUTI A., ABDELGUERFI A., MEFTI M., 2000. Effet du stress hydrique sur le rendement en gousses et en graines chez trois espèces de luzernes annuelles : *Medicago aculeata*, *Medicago orbicularis* et *Medicago truncatula*. *Opt. Médit.*, 163-166.
- CHEN C., TAO C., PENG H., DING Y., 2007. Genetic analysis of salt stress responses in Asparagus Bean [*Vigna unguiculata* (L) ssp *sesquipedalis* Verdc]. *J. Hered.*, 98 (7) : 655-665.
- COOK D.R., KIM D.J., ZHU H.Y., URIBE P., 2000. Plant-pathogen interactions in *Medicago truncatula*. *Grain Legumes*, 28 : 20.
- CRONK Q., OJEDA I., and PENNINGTON R.T., 2006. Legume comparative genomics: progress in phylogenetics and phylogenomics. *Curr Opin Plant Bio* , 9 : 99-103.
- CRUIZIAT.P, 1990. Techniques Agricoles : L'eau et les cultures. 1165 TA. 21pp
- DWIVEDI S.L., NIGAM S.N., RAO R C.N., SINGH U., RAO K V.S., 1996. Effects of drought on oil, fatty acids and protein content of groundnut seeds. *Field Crop Res.*, 48 : 125–133.
- EGERT M., TEVINI M., 2002. Influence of drought on some physiological parameters sympatic for oxidative stress in the leaves of chives (*Allium schoenoprasum*). *Environ. Exp. Bot.*, 48 43–49.

- EL FAKHRI M., MAHBOUB S., BENCHEKROUN M., NSARELLAH N., 2010. Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Nature et Technologie*, 03 : 6-12.
- Gálvez L, González EM and Arrese-Igor C (2005) Evidence for carbon flux shortage and strong carbon/nitrogen interactions in pea nodules at early stages of water stress. *J Exp Bot* 56, 2551-2561
- GRAHAM PH, VANCE C.P., 2003. Legumes : Importance and constraints to greater use. *Plant Physiol.*, 131 : 872–877.
- GONZALEZ E.M., LADRERA R., LARRAINZAR L., IGOR C., 2007. Response of *Medicago truncatula* to flooding stress : Response of *Medicago truncatula* to drought. *Medicago truncatula* handbook. 7-12, 32 p.
- HADDADJ A. 1995. Effet physiologique du stress hydrique sur dix populations de *Medicago ciliaris*. These Ing., INA., El Harrach, 65 p.
- HEYN C.C., 1963. The annual species of *Medicago* L. publications of Hebrew university, Jerusalem, 54 p.
- ISLAM M.A., DU. A., NING. J., YE. H., XIONG. L., 2009. Characterization of Glossy1-homologous genes in rice involved in leaf wax accumulation and drought resistance. *Plant Mol. Biol.*, 70 :443–456.
- JENSEN K.B., ASAY K.H., JOHNSON D.A., WALDRON B. L., 2002. Carbon isotope discrimination in orchard grass and ryegrasses at four irrigation levels. *Crop Sci.*, 42: 1498-1503.
- JULIER B., HUGUET T., CHARDON F., AYADI R. PIERRE J.B., PROSPERI J.M., BARRE P. HUYGHE C., 2007. Identification of quantitative trait loci influencing aerial morphogenesis in the model legume *Medicago truncatula*. *Theor Appl Genet.*, 114:1391–1406.
- KAUR N., GUPTA A. K., 2005. Signal transduction pathways under abiotic stress in plants. *Current Science*, 88 (11) : 1771-1779.
- KHELIFI H., KHEDIME A., MERABET B., BENMESSEoud H., HADJ OMAR K., NABI M., ALOUANE Y., LAZALI M., BELLAGUE D., OUMATA S., LAOUAR M., M'HAMMDI BOUZINA M. et ABDELGUERFI A., 2008. Résultats préliminaire de production et d'efficacité d'utilisation de l'eau chez des cultivars de luzerne pérenne *M. sativa* L. en régime hydrique pluvial et irrigué. *Opt. Médit.* Série A, 79 : 327-330.
- KIANI S.M., 2007. Analyse génétique des réponses physiologiques du tournesol (*Helianthus annuus* L.) soumis à la sécheresse. Thèse. Doct. Génét. Amélio. Plant. Univ. Toulouse, 229 p.
- LAOUAR M. et ABDELGUERFI A., 2000. Etude du complexe d'espèces *Medicago ciliaris*- *M. intertexta*: caractérisation des différents types d'infrutescences. *Opt. Médit.*, 39-42.
- LAOUAR M., KIES N., ABDELLAOUI K., BENNOUR A., BETTAHAR N., KADI S., BOUZZA L., ABDELGUERFI A., 2000. Effet du stress hydrique sur le comportement de 10 populations de *M. intertexta*. *Opt. Médit.*, 45 : 167-171.
- LAZREK-BEN FRIHA F., 2008. Analyse de la diversité génétique et symbiotique des populations naturelles tunisiennes de *Medicago truncatula* et recherche de QTL liés au stress salin. Thèse Doct. biol. Toulouse, 255 p.

-
- LESINS K., LESINS I., 1979. Genus *Medicago* (Leguminosae). A taxonomic study. Junk, The Hague, London, 125pp
- MEFTI M., ABDELGUERFI A. et CHEBOUTI A., 2001. Etude de la tolérance à la sécheresse chez quelques populations de *Medicago truncatula* (L.) Gaertn. *Opt. Médit.*, 173-177.
- MERRIEN A0, BLANCHET R., GELFI N., 1981. Relationships between water supply, leaf area development and survival, and production in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Agronomie*, 1: 917-922.
- MOREAU D., SALON C. and MUNIER-JOLAIN N., 2006. Using a standard framework for the phenotypic analysis of *Medicago truncatula*: an effective method for characterising the plant material used for functional genomics approaches. *Plant Cell. Env.*, 29 :1087-1098.
- MONNEVEUX, P. ET NEMMAR, M., 1997. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* desf.) : étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6 : 583-590.
- MOUHOUCHE B., 2011. Communication personnelle sur les techniques de contrôle du stress hydrique.
- MOUHOUCHE B. et GUEMRAOUI M., 2004. Réhabilitation des grands périmètres d'irrigation en Algérie. Séminaire sur la Modernisation de l'Agriculture Irriguée dans les Pays du Maghreb, 19 au 21 avril 2004 Rabat, Maroc.
- MOUHOUCHE B., RBUGET F., DELECOLLE R. 1998. Effects of water stress applied at different phenological phases on yield components of dwarf bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomie*, 18 :197-205.
- MOUHOUCHE B. BOURAHLA A., 2007. Optimisation de l'irrigation d'appoint apportée a différentes phases phénologiques d'une culture de blé dur (*Triticum durum*). *Sciences & Technologie c*, 25 : 53-58.
- OUAFI F., 2009. Caractérisation cytogénétique et comportement vis à vis d'un stress hydrique de quelques populations de trois espèces de *Medicago* (*M. ciliaris*, *M. intertexta* et *M. truncatula*). Thèse. Magister INA. El Harrach, p57
- OUCHAI M., 1990. Etude de quelques aspects physiologiques du déficit hydrique chez deux espèces de luzerne annuelle : *M. truncatula* et *M. rotata*. Thèse Ing. Agr. INA. El Harrach, 62 p.
- OUSALEM Z., 1998. Effet du stress hydrique appliqué a différentes phases phénologiques sur la croissance, le développement et les composantes du rendement du haricot nain (*P. vulgaris*). Thèse Magister INA El Harrach, 83p.
- PANTUWAN G, 2000. Yield responses to rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to water deficit in rainfed lowlands. St. Lucia, Qld.179.
- PINHEIRO H.A., DAMATTA F.M., CHAVES A.R.M., LOUREIRO M.E., 2005. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. *Ann. Bot.*, 96 : 101-108.
- PROSPERI J.M., GUY P., GENIER G. et ANGEVAIN M., 1995. Les luzernes ou genre *Medicago*. Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon. INRA et BRG, pp131-167.
-

- RAMANJULU S., BARTELS D., 2002. Drought and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant Cell Env.*, 25 : 141-151.
- RIEUL A., 2000. Guide pratique d'irrigation : L'eau, le sol et le climat. Des capteurs pour demain : outils de contrôle de l'état hydrique du végétal. 79-88.
- RIZZA F., BADECK F.W., CATTIVELLI L., LIDESRI O., DI FONSO N., STANCA A.M. 2004. Use of water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigation conditions. *Crop Sci.* 44: 2127-2137.
- SEKI M., NARUSAKA M., ABE H., KASUGA M., YAMAGUCHI-SHINOZAKI K., CARNINCI P., HAYASHIZAKI Y., SHINOZAKI K., 2001. Monitoring the expression pattern of 1300 Arabidopsis genes under drought and cold stresses using full-length cDNA microarray. *Plant Cell.*, 13: 61-72.
- SENHADRI-MAAMRI F., RAHAL-BOUZIANE H., ABDELGUERFI A. et RAHMANI D.H., 1992. Etude biométrique des gousses et des graines de populations de deux générations de *Medicago truncatula* Gaert. *Opt.Med.*, 249-253
- SIAXHANE M 1984. Effet du déficit hydrique sur quelques espèces de luzerne annuelles. Thèse. Ing. agr. INA. El Harrach, 130 p.
- SOLOMON K. F. and LABUSCHAGNE M.T., 2003. Variation in water use and transpiration efficiency among durum wheat genotypes grown under moisture stress and non-stress conditions. *Journal of Agricultural Science*, 141: 31–41.
- SOLTANI A., HAMMER G.L., TORABI B., ROBERTSON M.J., ZEINALI E.; 2006. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. *Field Crops Research*, 99: 1-13.
- STODDARD1 F.L., BALKO C., ERSKINE W., KHAN H.R., LINK W. ET SARKER A., 2006. Screening techniques and sources of resistance to abiotic stresses in cool-season food legumes. *Euphytica*, 147: 167–186.
- TEFIANI A., 1985. Effet du régime hydrique et de la fertilization phosphate sur la luzerne pérenne *M. sativa* L. These Ing. INA El HArrach, 55 p.
- TIERCELIN P., 2006. Traite d'irrigation : Connaissance de base des systèmes : sol, plante, athmosphère. 47-155. 215 p.
- TURNER N.C., 1997. Further progress in crop water relation. *Adv Agron.*, 58: 293-338.
- UMEZAWA T., FUJITA M., FUJITA Y., YAMAGUCHI-SHINOZAKI K. and SHINOZAKI K., 2006. Engineering drought tolerance in plants: discovering and tailoring genes to unlock the future. *Current Opinion in Plant Biotechnology*, 17: 113–122.
- VINOCUR B., ALTMAN A., 2005. Recent advance in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. *Current Opinion in Biotechnology*, 16: 123–132.
- YAHIAOUI S et ABDELGUERFI A., 1995. Comportement et phénologie d'une espèce annuelle de luzerne : *Medicago orbicularis* (L.) Bart. *Opt. Médit.*, 25-28.
- YOUNG N.D. and UDVARDI M., 2009. Translating *Medicago truncatula* genomics to crop legumes. Genome studies and molecular genetics. *Current Opinion in Plant Biology*, 12:193–201.

ZHAO B., KONDO M., MAEDA M., OZAKI Y., ZHANG J., 2004. Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in two cultivars of upland rice during different developmental stages under three water regimes. *Plant and Soil* **261**: 61–75.

ZHU H., CHOI H.K., COOK D.R., SHOEMAKER R.C., 2005. Bridging Model and Crop Legumes through Comparative Genomics. *Plant Physiology*, 137: 1189–1196.

ANNEXES

ANNEXE I : ANOVA à un seul facteur étudié chez la modalité 'T'.

Variables dépendantes analysées (11 variables)												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Variable dépendante: FFA												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
2. Variable dépendante: FFC												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
3. Variable dépendante: FFD												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
4. Variable dépendante: FFE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
5. Variable dépendante: FFG												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
6. Variable dépendante: FFH												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
7. Variable dépendante: FFI												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
8. Variable dépendante: FFJ												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
9. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
10. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
11. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
12. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
13. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
14. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												
15. Variable dépendante: PSE												
Int.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BDP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Constat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cliquez ici pour afficher les données												

ANNEXE II : Moyennes des consommations hydriques mesurés chez modalité 'T' (51apports).

DATE S	APPORTS	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	
18/01/2011	pre-irrigation	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR	
20/01/2011	ETM1	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	
27/01/2011	ETM2	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	
02/02/2011	ETM3	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	
09/02/2011	ETM4	440,0	522,0	422,0	450,0	472,0	420,0	522,0	440,0	550,0	500,0	472,0	480,0	510,0	
16/02/2011	ETM5	481,7	511,3	491,7	496,7	507,7	482,3	501,7	491,0	488,3	490,0	472,0	486,7	492,3	DNS
20/02/2011	ETM6	500,0	510,7	502,0	508,0	510,3	502,3	504,7	516,0	512,3	517,7	507,7	507,3	518,7	DNS
23/02/2011	ETM7	132,7	132,3	137,0	136,3	138,0	131,0	141,3	134,3	132,7	134,7	132,0	128,7	139,3	DNS
27/02/2011	ETM8	366,3	373,0	341,3	344,3	374,0	339,7	368,3	349,0	349,0	370,0	359,3	352,3	370,7	DNS
02/03/2011	ETM9	131,7	132,0	131,7	132,0	132,7	122,3	137,0	122,7	122,3	124,0	124,3	122,7	124,3	DNS
06/03/2011	ETM10	424,0	417,7	402,7	429,0	422,0	386,3	422,0	402,7	419,0	422,7	420,0	402,0	422,0	DNS
10/03/2011	ETM11	476,3	449,7	436,0	452,7	484,0	432,7	442,3	428,7	422,3	426,3	434,3	429,0	449,7	DNS
13/03/2011	ETM12	415,7	408,3	406,0	406,3	422,0	349,0	407,0	323,0	392,7	370,0	340,0	375,7	392,0	DNS
17/03/2011	ETM13	622,7	566,7	541,0	552,7	602,7	522,0	562,7	509,0	522,0	543,0	471,3	532,7	540,0	DNS
20/03/2011	ETM14	527,7	487,0	457,3	474,7	482,3	424,3	424,3	392,3	416,3	424,3	390,0	420,7	442,7	DNS
23/03/2011	ETM15	500,3	409,3	360,7	312,3	228,0	361,7	336,3	292,7	329,3	327,3	296,3	329,0	342,7	DNS
24/03/2011	ETM16	322,3	311,0	372,0	242,3	329,7	229,0	274,0	248,0	246,0	228,0	242,3	318,0	278,7	DNS
26/03/2011	ETM17	382,0	462,0	400,3	327,0	442,3	391,7	398,3	302,0	322,3	341,0	316,0	362,3	322,0	DNS
27/03/2011	ETM18	526,7	438,0	328,0	319,3	479,0	329,0	342,7	230,7	314,7	309,3	302,0	322,7	321,7	DNS
29/03/2011	ETM19	688,7	620,7	514,0	492,7	882,3	502,3	529,0	444,7	486,7	222,0	468,3	508,3	529,0	DNS
31/03/2011	ETM20	322,7	226,7	222,7	192,7	228,3	226,3	219,0	178,7	202,0	192,0	182,7	221,7	242,3	DNS
02/04/2011	ETM21	1072,3	522,0	612,3	629,0	1118,7	710,7	731,3	621,3	622,3	689,3	647,3	689,3	731,0	DNS
03/04/2011	ETM22	428,0	347,7	318,7	262,7	488,3	392,0	300,7	249,3	279,3	282,3	267,3	298,0	327,7	DNS
04/04/2011	ETM23	522,0	528,0	567,0	670,0	622,0	722,0	672,0	542,0	502,0	600,0	677,0	712,0	800,0	DNS
06/04/2011	ETM24	620,7	562,7	480,7	379,0	661,3	400,3	420,0	306,0	326,0	328,0	372,0	391,7	429,3	DNS
07/04/2011	ETM25	709,0	642,3	428,0	392,7	782,3	410,0	424,3	322,3	322,7	418,7	412,0	426,0	429,3	DNS
08/04/2011	ETM26	712,0	599,3	447,0	402,3	809,3	422,7	504,0	320,0	381,0	422,3	422,7	492,7	510,0	DNS
10/04/2011	ETM27	772,0	822,3	828,0	829,7	684,0	784,0	822,3	772,7	724,3	540,7	866,0	794,3	819,0	DNS
11/04/2011	ETM28	267,3	284,3	240,0	429,0	767,0	510,0	244,3	474,3	422,0	320,7	271,7	480,0	266,3	DNS
12/04/2011	ETM29	271,3	240,0	428,0	402,3	622,3	344,3	462,3	226,7	329,3	427,7	422,3	372,7	442,3	DNS
13/04/2011	ETM30	282,7	279,0	221,0	172,3	226,3	122,0	221,3	129,0	162,0	108,7	122,0	164,7	199,0	DNS
14/04/2011	ETM31	820,7	608,0	562,3	549,7	922,3	478,0	640,3	492,7	469,0	581,0	627,3	529,0	592,3	DNS
15/04/2011	ETM32	1092,3	992,0	822,0	962,0	1127,7	840,0	816,0	880,0	622,0	902,0	760,0	900,0	964,0	DNS
17/04/2011	ETM33	819,3	846,0	742,3	726,0	827,0	729,0	769,0	702,0	682,3	774,3	812,3	622,3	721,0	DNS
18/04/2011	ETM34	1102,3	1032,3	729,3	724,0	1146,7	742,3	778,0	627,3	692,3	789,3	781,0	980,0	728,3	DNS
20/04/2011	ETM35	728,0	514,0	486,0	488,0	628,3	474,0	540,3	471,0	447,0	521,0	572,3	420,3	496,3	DNS
22/04/2011	ETM36	1172,3	1060,3	1002,3	926,0	1216,7	1022,0	1022,7	978,0	1002,3	1068,3	1002,0	1017,0	962,0	DNS
24/04/2011	ETM37	500,0	720,0	722,0	684,0	862,0	709,0	722,0	700,0	728,0	764,0	697,0	726,0	619,0	DNS
26/04/2011	ETM38	619,0	490,0	322,0	362,0	662,0	622,0	622,0	546,0	679,0	680,0	691,0	447,0	401,0	DNS
28/04/2011	ETM39	247,0	402,0	610,0	610,0	900,0	722,0	678,0	681,0	678,0	700,0	711,0	584,0	422,0	DNS
30/04/2011	ETM40	849,0	772,0	911,0	812,0	1022,3	822,0	916,0	842,0	827,0	924,0	808,0	900,0	762,0	DNS
01/05/2011	ETM41	602,0	222,0	444,0	645,0	392,0	271,0	221,0	220,0	272,0	320,0	222,0	622,0	367,0	DNS
04/05/2011	ETM42	1042,3	781,0	1020,3	998,0	1067,7	1072,0	1062,7	1007,7	1022,3	1078,3	1022,0	992,0	1022,3	DNS
06/05/2011	ETM43	972,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	DNS
07/05/2011	ETM44	1112,3	620,0	1121,7	1127,7	1074,7	1162,0	1148,7	1102,3	1110,7	1172,3	1128,0	1102,0	1107,7	DNS
08/05/2011	ETM45	322,0	702,0	922,0	470,0	990,0	862,0	942,0	862,0	920,0	822,0	822,0	822,0	702,0	DNS
09/05/2011	ETM46	272,0	472,0	290,0	222,0	222,0	272,0	310,0	298,0	312,0	222,0	222,0	312,0		
11/05/2011	ETM47	1122,3	272,0	882,0	1104,7	792,0	1120,0	1040,7	1122,3	1072,3	1120,7	1040,0	1110,0	1022,3	DNS
14/05/2011	ETM48	1170,3	382,0	970,0	1092,3	1002,3	1042,0	1102,3	1088,3	1090,3	1100,7	1110,0	840,0	1040,7	DNS
16/05/2011	ETM49	584,0	272,0	422,0	520,0	362,0	740,0	422,0	220,0	220,0	660,0	222,0	222,0	222,0	DNS
18/05/2011	ETM50	620,0	342,0	462,0	392,0	727,0	412,0	647,0	478,0	310,0	320,0	340,0	322,0		
20/05/2011	ETM51	1042,3	980,0	712,0	922,0	1022,0	872,0	1020,3	782,0	1120,7	782,0	880,0	912,0		

DNS : différences statistiquement non significative
 DS : différences significatives
 CR : apport à la capacité de rétention du port

ANNEXE III : ANOVA de la consommation hydrique de la modalité 's' durant les trois cycle de stress.

Variables dépendantes analysées (8 variables)		1		3		4	
		WU cycle1		WU cycle2		Cumul WU	
		TxF1		TxF2		TxF Moy	
1. Variable Dépendante: WU cycle1							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	11797,92426	983,16037	81,93003	3,38	0,0002	
BLOCS	24	17415,5476	725,64782	60,47065	2,48	0,0002	
Error	24	45829,3074	1909,55656	159,14823	6,37	0,0002	
Corrected Total	60	17812,82892	741,46455	61,78872	2,51	0,0002	
LCNT	L1	L10	L11	L12	L13	L14	L15
MSD	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33
EFF	A	A	BA	BAC	BAC	BAC	BAC
CoeffVar	Moyenne		1207,541				
2. Variable Dépendante: WU cycle2							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	4212,30202	351,02502	29,25208	1,19	0,0002	
BLOCS	24	815,86694	34,03612	2,83634	0,11	0,0002	
Error	24	45812,5864	1908,85985	159,14823	6,37	0,0002	
Corrected Total	60	18924,7549	783,67099	65,30508	2,61	0,0002	
LCNT	L10	L10	L10	L11	L11	L12	L12
MSD	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33
EFF	A	A	A	A	BA	BA	BA
CoeffVar	Moyenne		1208,201				
3. Variable Dépendante: WU cycle3							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	6723,28102	560,27335	46,68945	1,87	0,0002	
BLOCS	24	12894,4426	537,26844	44,77237	1,81	0,0002	
Error	24	45829,3074	1909,55656	159,14823	6,37	0,0002	
Corrected Total	60	17807,02602	741,76418	61,81368	2,52	0,0002	
LCNT	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2
MSD	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33	1297,33
EFF	A	A	A	A	BA	BA	BA
CoeffVar	Moyenne		1202,581				
4. Variable Dépendante: Cumul WU							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	18019,9202	1501,66002	125,13834	5,01	0,0002	
BLOCS	24	48018,842	2000,78342	166,71762	6,67	0,0002	
Error	24	45812,5864	1908,85985	159,14823	6,37	0,0002	
Corrected Total	60	48019,9202	2000,82002	166,73500	6,67	0,0002	
LCNT	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2
MSD	3872,00	3700,00	3775,67	3733,00	3724,00	3682,33	3672,67
EFF	A	A	A	A	A	A	A
CoeffVar	Moyenne		3708,138				
5. Variable Dépendante: TxF1							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	2410,80017	200,90001	16,74167	0,67	0,0003	
BLOCS	24	4,9114407	0,2046417	0,01689	0,0007	0,0003	
Error	24	15815,40038	658,97502	54,54042	2,18	0,0003	
Corrected Total	60	6364,15562	526,37519	43,86466	1,74	0,0003	
LCNT	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2
MSD	199,79	199,79	199,79	199,79	199,79	199,79	199,79
EFF	A	A	A	A	BA	BA	BA
CoeffVar	Moyenne		191,826				
6. Variable Dépendante: TxF2							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	2001,20813	166,76868	13,89739	0,55	0,0003	
BLOCS	24	214,20814	8,92534	0,74378	0,03	0,0003	
Error	24	45812,5864	1908,85985	159,14823	6,37	0,0003	
Corrected Total	60	4819,92467	402,35686	33,52977	1,34	0,0003	
LCNT	L10	L10	L10	L11	L11	L12	L12
MSD	1667,67	1667,67	1667,67	1667,67	1667,67	1667,67	1667,67
EFF	A	A	A	A	A	A	A
CoeffVar	Moyenne		1664,493				
7. Variable Dépendante: TxF3							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	4202,0202	350,16835	29,18236	1,17	0,0042	
BLOCS	24	815,86694	34,03612	2,83634	0,11	0,0042	
Error	24	45812,5864	1908,85985	159,14823	6,37	0,0042	
Corrected Total	60	45199,4726	1902,06431	158,50536	6,33	0,0042	
LCNT	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2
MSD	351,83	351,83	351,83	351,83	351,83	351,83	351,83
EFF	A	A	A	A	BA	BA	BA
CoeffVar	Moyenne		354,191				
8. Variable Dépendante: TxF Moy							
Source	BDL	Somme de carrés		Carré moyen		Valeur F	
LIGNÉES	12	4202,0202	350,16835	29,18236	1,17	0,0042	
BLOCS	24	815,86694	34,03612	2,83634	0,11	0,0042	
Error	24	45812,5864	1908,85985	159,14823	6,37	0,0042	
Corrected Total	60	45199,4726	1902,06431	158,50536	6,33	0,0042	
LCNT	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2
MSD	351,83	351,83	351,83	351,83	351,83	351,83	351,83
EFF	A	A	A	A	A	A	A
CoeffVar	Moyenne		353,826				

ANNEXE IV : ANOVA a deux (2) facteurs étudiés (lignées et traitements).

ANNAXE V : ANOVA des DRI des 29 caractères étudiés.

																		CV	ANOVA
HTF	0,79	0,77	0,76	0,74	0,68	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63	0,62	0,61	0,58					16,50	DNS
	L2	L6	L13	L4	L1	L8	L7	L11	L3	L5	L12	L9	L10						
LEN	0,95	0,9	0,84	0,82	0,82	0,82	0,81	0,79	0,78	0,77	0,77	0,73	0,72					16,42	DNS
	L2	L13	L1	L5	L12	L4	L7	L11	L6	L3	L10	L9	L3						
NR1	1,16	1,05	1,02	1	0,91	0,88	0,88	0,86	0,8	0,8	0,79	0,79	0,76					16,35	DNS
	L1	L8	L13	L5	L9	L6	L2	L10	L4	L7	L12	L11	L3						
NRH	1,3	1,1	1,03	1	0,98	0,97	0,97	0,95	0,94	0,94	0,91	0,79	0,73					12,10	DNS
	L4	L3	L9	L11	L5	L13	L6	L8	L1	L7	L12	L10	L2						
NFT	0,91	0,9	0,88	0,85	0,85	0,82	0,81	0,81	0,81	0,8	0,77	0,76	0,76					7,07	DS
	L4	L6	L3	L13	L3	L2	L9	L1	L11	L7	L5	L12	L10						
NFS	4,64	4,42	3,88	3,7	3,25	2,52	2,51	2,26	2,23	2,23	1,98	1,93	1,28					44,24	DS
	L6	L3	L2	L1	L5	L9	L10	L11	L12	L7	L4	L13	L8						
TcSF	5,11	4,95	4,92	4,51	4,26	3,33	3,05	2,97	2,79	2,76	2,25	2,18	1,31					45,52	DS
	L6	L2	L3	L1	L5	L10	L9	L12	L11	L7	L13	L4	L8						
NFPM	1,19	1,13	1,09	1,06	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,98	0,97	0,92	0,9					11,81	DNS
	L3	L4	L12	L3	L2	L9	L13	L11	L6	L7	L10	L5	L1						
TcAv	4,95	4,86	3,21	2,649	2,29	2,03	1,92	1,89	1,87	1,84	1,48	1,38	0,99					74,76	DNS
	L11	L4	L8	L2	L10	L7	L1	L6	L13	L3	L5	L12	L9						
PFA	0,46	0,44	0,42	0,42	0,4	0,4	0,39	0,38	0,35	0,35	0,32	0,3	0,26					16,04	DNS
	L13	L8	L3	L7	L6	L4	L2	L10	L9	L5	L11	L12	L1						
PSA	0,75	0,7	0,69	0,61	0,59	0,59	0,56	0,55	0,53	0,46	0,45	0,4	0,39					19,02	DNS
	L10	L8	L9	L7	L4	L3	L13	L6	L1	L2	L11	L5	L12						
TMSA	2,03	2	1,97	1,64	1,49	1,45	1,4	1,38	1,38	1,3	1,22	1,2	1,16					9,68	DNS
	L1	L10	L9	L8	L4	L7	L11	L3	L6	L12	L13	L2	L5						
PFR	0,83	0,76	0,64	0,59	0,57	0,55	0,54	0,53	0,53	0,53	0,49	0,48	0,47					19,61	DNS
	L12	L10	L7	L6	L13	L4	L2	L8	L1	L3	L9	L5	L11						
PSR	0,8	0,74	0,72	0,67	0,63	0,61	0,56	0,55	0,55	0,52	0,51	0,5	0,43					17,99	DNS
	L12	L7	L8	L10	L6	L2	L1	L13	L11	L9	L4	L3	L5						
TMSR	1,4	1,2	1,16	1,16	1,08	1,08	1,08	0,98	0,96	0,95	0,95	0,9	0,89					21,30	DNS
	L8	L11	L2	L7	L1	L9	L6	L12	L4	L3	L13	L5	L10						
PFT	0,48	0,45	0,43	0,44	0,43	0,43	0,41	0,38	0,38	0,35	0,35	0,34	0,3					14,16	DNS
	L13	L8	L7	L10	L6	L3	L4	L2	L9	L5	L12	L11	L1						
PST	0,74	0,7	0,67	0,62	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,46	0,44	0,41	0,39					15,73	DNS
	L10	L8	L9	L7	L6	L1	L3	L13	L4	L11	L2	L12	L5						
TMS T	1,82	1,77	1,7	1,57	1,38	1,35	1,32	1,3	1,29	1,16	1,15	1,14	1,1					8,91	DNS
	L1	L9	L10	L8	L7	L11	L4	L6	L3	L12	L2	L13	L5						
WUEA	1,2	0,98	0,98	0,92	0,91	0,85	0,83	0,8	0,73	0,7	0,65	0,65	0,6					18,51	DNS
	L10	L8	L9	L7	L3	L4	L1	L6	L13	L11	L12	L2	L5						
WUET	1,15	0,98	0,94	0,94	0,87	0,86	0,81	0,78	0,72	0,71	0,68	0,62	0,59					16,04	DNS
	L10	L8	L9	L7	L1	L3	L6	L4	L11	L13	L12	L2	L5						
NGsB0B1	0,83	0,67	0,67	0,66	0,64	0,6	0,59	0,55	0,52	0,47	0,46	0,43	0,43					29,75	DNS
	L6	L2	L4	L9	L5	L7	L12	L3	L8	L13	L11	L1	L10						
NGsP	0,86	0,84	0,73	0,64	0,63	0,63	0,6	0,58	0,53	0,51	0,5	0,48	0,46					21,23	DNS
	L1	L6	L4	L3	L9	L7	L5	L8	L2	L12	L13	L11	L10						
PGsP	0,95	0,89	0,81	0,76	0,76	0,75	0,65	0,64	0,62	0,6	0,59	0,55	0,41					21,13	DNS
	L4	L6	L1	L3	L3	L9	L7	L11	L13	L5	L10	L2	L12						
P30G	1,51	1,39	1,32	1,26	1,26	1,23	1,18	1,15	1,14	1,12	1,05	0,92	0,91					10,54	DNS
	L13	L11	L4	L10	L8	L2	L3	L9	L7	L6	L12	L1	L5						
NGs0G	1,24	1,08	1,06	1,06	1,01	1	0,99	0,97	0,94	0,93	0,92	0,89	0,87					9,99	DNS
	L8	L6	L12	L13	L7	L10	L9	L11	L5	L2	L4	L3	L1						
PGs0G	1,3	1,26	1,14	1,08	1,07	1,06	1,04	1,04	1,02	1,01	0,94	0,89	0,75					13,99	DNS
	L13	L8	L6	L11	L4	L12	L10	L2	L7	L9	L5	L3	L1						
P1Gr	1,23	1,16	1,12	1,11	1,05	1,04	1,02	1,01	1,01	1	1	0,98	0,86					9,19	DNS
	L13	L4	L2	L11	L6	L10	L8	L7	L9	L12	L3	L5	L1						
NGsP	0,91	0,88	0,72	0,67	0,63	0,63	0,57	0,55	0,54	0,52	0,49	0,47	0,46					24,21	DNS
	L6	L1	L3	L4	L9	L7	L3	L5	L12	L13	L2	L10	L11						
PGsP	0,96	0,78	0,75	0,74	0,65	0,64	0,64	0,58	0,56	0,55	0,53	0,51	0,49					27,80	DS
	L6	L4	L1	L8	L13	L7	L9	L5	L3	L2	L12	L11	L10						

ANNEXE VI : LES CORRELATIONS.

