

***Effets du stress hydrique appliqué à  
différentes phases phénologiques sur les  
composantes du rendement de quatre  
légumineuses alimentaires à grosses  
graines***

**Par : Mouhouche Brahim**

Directeur de thèse : M. Halitim A. Professeur Université de Batna  
Codirecteur de thèse : Mme. Ruget F. Maître de recherche INRA d'Avignon  
Soutenue publiquement le 13/10/2001

Devant le Jury composé de: Président : M. Bouznad Z. Professeur INA - El-Harrach Examineurs : M.  
Benlaribi M. Professeur Université de Constantine M. Aidaoui A. Maître de Conférence INA -  
El-Harrach M. Messahel M. Professeur ENSH de Blida



# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Résumé .  | 1  |
| Abstract . .  | 3  |
| ص . .   | 5  |
| Liste des abréviations .  | 7  |
| Avant-propos .  | 11 |
| Remerciements . .   | 13 |
| INTRODUCTION .  | 17 |
| 1. La production de légumineuses à grosses graines en Algérie .                             | 17 |
| 2. Résumé bibliographique .   | 20 |
| 3. Présentation des expérimentations .  | 21 |
| 4. Plan du document . .   | 22 |
| PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE .   | 25 |
| A. Classification botanique, répartition géographique, exigences. . .                       | 25 |
| 1. Classification botanique des légumineuses alimentaires . .                               | 25 |
| 2. Origines et répartition géographique des légumineuses alimentaires .                     | 26 |
| 3. Exigences des légumineuses alimentaires . .  | 27 |
| B. L'eau dans la plante . .   | 32 |
| 1. Rôle de l'eau dans la plante .   | 32 |
| 2. Contenu en eau de la plante, consommation d'eau . .                                      | 33 |
| 3. Définitions du stress hydrique . .   | 33 |
| 4. Le concept de résistance des plantes à la sécheresse .                                   | 34 |
| 5. Les mécanismes de résistance des plantes à la sécheresse : les adaptations . .           | 35 |
| 6. Caractérisation de l'état hydrique d'une plante : mesures et indices .                   | 36 |
| 7. Bases physiologiques de la modification de l'activité de la plante par la sécheresse . . | 40 |
| C. Effets des stress hydriques sur la production des cultures .                             | 42 |

|  |           |
|--|-----------|
| 1. Cas des plantes en zone aride : illustration extrême des adaptations au stress .          | 42        |
| 2. Développement : modifications des durées de stade, sensibilité dépendant des stades .     | 43        |
| 3. Croissance : production de matière sèche, organes de production, organes de stockage .    | 47        |
| 4. Nodulation et stress hydrique .   | 57        |
| 5. Efficience d'utilisation de l'eau, valorisation d'un apport supplémentaire .              | 58        |
| 6. Qualité : récolte en vert, récolte en sec (teneur en protéines, qualité germinative) .    | 59        |
| 7. Comparaisons entre variétés ou entre espèces : critères de résistance à la sécheresse . . | 60        |
| 8. Conclusion . .  | 62        |
| <b>DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET METHODES .</b>  | <b>65</b> |
| <b>A. Essai sous serre (méthode de marquage des organes fructifères) .</b>                   | <b>66</b> |
| 1. Conduite de la culture, date d'application du stress .                                    | 66        |
| 2. Etude du milieu et de l'environnement du site expérimental .                              | 67        |
| 3. Mode d'installation du stress hydrique et calcul des irrigations .                        | 67        |
| 4. Détermination du taux de tarissement de l'eau du sol . .                                  | 69        |
| 6. Dispositif expérimental . .   | 71        |
| <b>B. Essai EN plein champ (étude comparative de quatre LAGG) .</b>                          | <b>73</b> |
| Conduite des cultures et sites expérimentaux . .   | 73        |
| Etude du milieu et de l'environnement des sites expérimentaux . .                            | 74        |
| 3. Pilotage et contrôle des irrigations de complément .                                      | 76        |
| 4. Dispositif expérimental . .   | 77        |
| <b>C. Observations, calculs d'indices, analyse des résultats. .</b>                          | <b>78</b> |
| Marquage des organes fructifères . .   | 78        |
| 2. Observations, mesures, calculs d'indices. . .   | 80        |
| 3. Analyses statistiques .   | 85        |
| <b>TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION .</b>  | <b>87</b> |
| <b>A. ESSAI SOUS SERRE .</b>   | <b>87</b> |

|  |            |
|--|------------|
| 1. Le phénomène de chevauchement des phases phénologiques . .                      | 87         |
| 2. Effet du stress hydrique sur les composantes du rendement exprimées en nombre . | 89         |
| 3. Les composantes du rendement exprimées en poids . .                             | 97         |
| 4. Interaction entre les composantes du rendement .                                | 103        |
| 5. Discussion et conclusion .  | 111        |
| <b>B. ESSAI EN PLEIN CHAMP . .</b>   | <b>114</b> |
| 1. Effet du régime hydrique sur les composantes du rendement . .                   | 115        |
| 2. Effet du régime hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau . .            | 124        |
| 3. Effet du régime hydrique sur l'indice de réponse à la sécheresse . .            | 127        |
| 4. Discussion .  | 128        |
| <b>Conclusion générale .</b>   | <b>131</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE . .</b>   | <b>137</b> |
| <b>ANNEXES .</b>   | <b>151</b> |
| I. Analyses de variance (annexes a1 – s3) . .                                      | 151        |
| A/ ESSAI SOUS serre (annexes a1 – n3) .  | 151        |
| B/ ESSAI EN PLEIN CHAMP (annexes o1 – s3) . .                                      | 154        |
| II. MOYENNES DES VALEURS OBSERVEES DES VARIABLES ETUDIEES (annexes t1 - t9) .      | 156        |
| 1. Essais sous serre 1992, 93 et 94 : (annexes t1 à t6) .                          | 157        |
| 2. Essai en plein champ, 1995 (annexes t7 à t9) . .                                | 162        |



## Résumé

Les légumineuses à grosses graines constituent un élément essentiel de l'alimentation humaine, particulièrement en Algérie. Leur sensibilité à la sécheresse est connue et conduit à de nombreux manques de production. Le but de notre travail est d'identifier les périodes où la production est le plus affectée par la sécheresse et de confirmer que des apports d'eau aux mêmes périodes sont les plus efficaces.

Nous avons étudié durant quatre ans l'effet de régimes hydriques différents appliqués à des phases phénologiques différentes de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines (haricot, pois, pois chiche et féverole), en utilisant systématiquement la méthode de marquage individuel des organes fructifères. Ces expérimentations nous permettent de définir les phases phénologiques les plus sensibles à des régimes hydriques différents (stress hydrique et irrigation de complément), de quantifier les effets de ces régimes hydriques sur les principales composantes du rendement, l'efficacité d'utilisation de l'eau, l'indice de réponse à la sécheresse et enfin d'étudier les phénomènes de compensation ou d'interaction entre les composantes du rendement des quatre légumineuses alimentaires.

Le marquage individuel des organes fructifères permet de se libérer des confusions introduites par la présence simultanée d'organes fructifères à des stades différents, couramment appelé le chevauchement des organes fructifères. Ainsi, on peut déterminer la probabilité et la dynamique d'avortement des organes fructifères durant la période de reproduction et analyser l'effet du stress hydrique sur les différentes phases phénologiques sur une période très courte avec un pas de temps de 3 à 5 jours, contrairement à la méthode classique qui prend en considération l'effet moyen du stress sur l'ensemble des organes fructifères ayant subi le stress en étant à des phases phénologiques différentes, donc à des degrés de sensibilité différents.

Les résultats obtenus montrent : i. l'effet inverse de l'irrigation de complément par rapport au stress appliqué à une même phase phénologique. ii. la grande sensibilité de la phase florale et post-florale (nouaison – début grossissement des graines). Le rendement final dépend plus du nombre de gousses et du poids des graines par plante, que du poids moyen de la graine ou du poids et du nombre de graines par gousse. iii. le fait que les composantes du rendement exprimées en nombre et en poids se décident à des phases différentes, les nombres sont déterminés durant la phase florale et immédiatement post-florale, tandis que les poids sont déterminés durant la phase de grossissement des graines. iiiii. le fait que l'eau d'irrigation est mieux valorisée lorsqu'elle est apportée durant les phases les plus sensibles au manque d'eau. iiiiii le fait que la féverole et le pois valorisent mieux l'eau d'irrigation que le haricot et le pois chiche.

**Mots clés** : stress hydrique, phases phénologiques, composantes du rendement, légumineuses alimentaires, haricot, *Phaseolus vulgaris*, pois *Pisum sativum*, féverole, *Vicia faba*, pois chiche, *Cicer arietinum*, efficacité d'irrigation, irrigation de complément, régime hydrique.



## Abstract

The food legumes plants with large seeds are an essential element for the human consumption, particularly in Algeria. Their high sensitivity to the water stress is known, that causes variations of the production.

Our expérience contribute to identify the periods when the production is affected by the water stress and to confirm that a positive contribution of additional irrigation applied on the same sensitives periods.

We studied during four years the effect of different hydrous modes applied during different phenological phases of four food legumes plants with large seeds (bean, pea, chickpea and field bean). We systematically used the method of individual marking of the fruit-bearing.

These experiments enable us to define the phenological phases most sensitive to different hydrous modes (water stress and additional irrigation) and to quantify the effects of these hydrous modes on the main components, the water use efficiency, the index of response to the dryness and finally to study the phenomena of compensation or interaction between the yield components of four food legumes plant.

The individual marking of the fruit-bearing makes it possible to avoid the risks of confusions caused by the presence at the same time of fruit-bearing at different stages, determine the probability and the abortion dynamics of the fruit-bearing during the reproduction period and analyze the effect of the water stress applied at different phenological phases with a very short period in time (3 to 5 days), contrary to the traditional method which takes the average effect of the stress on the whole of the fruit-bearing having undergone the stress while being with different phenological phases, therefore with different degrees of sensitivity to water stress.

The results obtained show: i - The opposite effect of additional irrigation compared to the stress applied to the same phenological phase. ii - High sensitivity of the floral and post-floral phase. The final production depends more of the number of pods and the weight of seeds by plant, than that average weight of one seed or weight and number of seeds per pod. iii - The yield components expressed by a number or weight are decided on different phases. The numbers are given during the floral and immediately post-floral phase, while the weights are given during the phase of enlargement seeds. iv - The water use efficiency is better when the irrigation is given to the most sensitive phenological phase. v - The field bean and the pea had a better water use efficiency than bean and chickpea.

**Key words:** Water stress, phenological phases, yield components, food legumes, bean, *Phaseolus vulgaris*, pea *Pisum sativum*, field bean, *Vicia faba*, chickpea, *Cicer arietinum*, water use efficiency, additional irrigation, hydrous mode.



## ص خلم

- كثير الحبوب الحقة الغذائية مع أهم العناصر السنوية للرجبة الغذائية اليومية في الجزائر.
- إن حسامية هذه المعاملات للإجهاد المعني تؤدي في معظم الأحيان إلى انخفاض مستوى الإنتاج، خاصة عندما يحدث الجفاف في مرحلة الإزهار وبنزلة ثمر العنقة.
- تمت تجزئتها إلى تحت المراحل، لأنشور حسامية للإجهاد المعني، والتأكد على أهمية الري التكميلي في هذه المراحل قصد التخفيف من حدة الجفاف، كما تسمح بتقييم مدى تأثير الإجهاد المعني على أهم مكونات الثمر ووزنه وخصوبته مؤخره، خاصة نسبة الحبوب والإزهار ورائحة الثمرة الكمال الذي وجدته، ما بين مكونات الثمر ووزنه الكمال المأخوذ له ووزنه.
- هاتك دراسات أربعة سنوات، ملتقنا فيها عدة أنظمة الري قصد تقييم تأثيره للإجهاد المعني على الفاصولياء (Pisum sativum) من سنة 1992 إلى 1994. كما كلفنا في سنة 1995 بزيادة الري للريادة للريادة الأربع من 40 إلى 60 لتر/إلاء (Pisum sativum) الإلاء (Pisum sativum) الحصص (Pisum sativum) و الفول (Pisum sativum) في سنة 1995، وذلك من أجل تقييم تأثيره على الإنتاجية وخصوبته ورائحة الثمر ووزنه الكمال المأخوذ له ووزنه.
- تجربتنا لتتبع لمصطلح عينا:
- الري الكمال (40 لتر/إلاء) على المأخوذ: أما زيادة مع الإلاء (60 لتر/إلاء).
  - الحساسية للري في مرحلة الإلاء وري الإلاء، كما كلفنا للريادة للريادة (الإلاء) وري (الحبوب) ووزن الحبوب لثمة، إضافة أيضا يتغير هذا التأثير بشكل جدا بالنسبة لعدد ووزن الحبة الواحدة أو عند الحبات لكل حبة.
  - الحبوب مكونات الثمرة (h) وري يكون في مرحلة الإلاء وري (60 لتر/إلاء) الكمال أو العوزة في مرحلة تطوير العنقات وتعر حباته.
  - أن نظام المعاملات الري كصهدف للمراحل أنشور حسامية للإجهاد المعني أو الري التكميلي.
  - أن الحبوب الكمال وري (40 لتر/إلاء) وري (60 لتر/إلاء) المأخوذ له ووزنه الكمال المأخوذ له ووزنه.
  - للحبات الحسامية: الإجهاد المعني، مراحل التعر، مكونات العوزة، الحبوب الحقة الغذائية، الفاصولياء، الإلاء، الفول، الحصص، ثقافة المصطلح، مياه الري، الري التكميلي، أنظمة الري.



---

## Liste des abréviations

$\theta$  : humidité du sol (%)

$\Psi$  : potentiel de l'eau dans la plante

- **ABA** : Acide abscissique
- **ADP** : acide dihydrophaseique
- **ANR** : activité nitrate réductase
- **CWSI** : déficit de saturation en humidité de l'air
- **DSEF** : déficit de saturation en eau des feuilles
- **DSF**
- **DSH** : déficit de saturation hydrique
- **DV**: phase de développement végétatif
- **Dw** : poids sec de la feuille (g)
- **ENSA** : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie
- **ER** : eau relative
- **Et** : quantité d'eau d'une plante en état de turgescence maximale à un moment donné
- **ETM** : régime conduit en évapotranspiration maximale (mm ou en m<sup>3</sup>/ha) de la période considéré
- **ETR** : évapotranspiration réelle (mm ou en m<sup>3</sup>/ha) de la période considéré
- **ETR/ETM** : taux de disponibilité en eau ou taux de couverture des besoins en eau de la culture
- **EUE** : efficacité d'utilisation de l'eau
- **FL**: phase floraison
- **Fw** : poids frais de la feuille (g)
- **GG**: phase de grossissement des graines
- **Go** : gousse
- **Gr** : graine
- **IF** : indice foliaire (LAI)
- **INA** : Institut National Agronomique
- **INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique
- **IR** : indice de récolte
- **IRS** : indice de réponse à la sécheresse

- ITCF
- **ITCMI** : Institut Technique des Cultures maraîchères et industrielles
- **ITGC** : institut technique des grandes cultures
- **LAGG** : légumineuses alimentaires à grosses graines
- **LAI** : leaf area index (IF)
- **MST** : matière sèche totale
- **N** : nombre
- **NGo/m<sup>2</sup>** : **nombre de gousses par m<sup>2</sup>**
- **NGo/Pt** : nombre de gousses par plante
- **NGr** : nombre de graines
- **NGr/Go** : nombre de graines par gousse
- **NGr/Pt** : **nombre de graines par plante**
- **NGr/Pt** : nombre de graines par plante
- **OAIC** : Office Algérien Interprofessionnel des Céréales
- **P** : poids
- **p1**: phase bouton floral
- **p2**: phase fleur épanouie
- **p3**: phase nouaison (gousse < 10 mm de long)
- **p4**: phase de début d'élongation de la gousses
- **p5**: phase de fin d'élongation de la gousse
- **p6**: phase de début de remplissage de la gousse (début de grossissement de la graine)
- **p7**: phase de fin de remplissage de la gousse (fin de grossissement de la graine)
- **PGo/Pt** : poids des gousses par plante (g)
- **PGr/Go** : poids des graines par gousse
- **PGr/Pt** : poids des graines par plante
- **Pm** : potentiel matricie
- **PMGo** : poids moyen de la gousse (g)
- **PMGr** : poids moyen de la graine (g)
- **Po** : potentiel osmotique
- **Pt** : plante
- **pt** : potentiel hydrostatique ou potentiel de turgescence
- **Rns** : rendement moyen du génotype non stressé
- **Rs** : rendement moyen du génotype stressé
- **RU** : réserve utile en eau du sol (% par rapport au sol sec)

- 
- **RWC** : relative water content
  - **SDD** : stress degree day
  - **SEC**: régime pluvial (sans irrigation durant tout le cycle)
  - **TERF** : teneur en eau relative des feuilles
  - **TR** : relative turgidity
  - **Tw** : poids à l'état de turgescence de la feuille (g)



## Avant-propos

En Algérie, la consommation des légumineuses alimentaires ne cesse d'augmenter depuis les années soixante. L'accroissement démographique et l'amélioration du niveau de vie depuis l'indépendance a provoqué une demande croissante de produits alimentaires complémentaires aux céréales consommées sous différentes formes.

L'Algérie qui était un pays exportateur de légumineuses alimentaires, particulièrement de fève et de pois chiche est devenu l'un des pays importateurs particulièrement de haricot, de pois et de lentille.

Bien que les légumineuses soient facilement cultivables sous différentes conditions pédoclimatiques, leur production est restée stationnaire, elle a même régressé pour le haricot et la lentille. Cette régression est provoquée, non seulement par la diminution des surfaces emblavées mais aussi par une diminution du rendement.

Cette diminution est le résultat du non-respect des principales opérations de l'itinéraire technique et des méfaits des aléas climatiques, particulièrement les effets dépressifs de la sécheresse résultant du manque et/ou de la mauvaise répartition des précipitations durant le cycle végétatif de la plupart des cultures de légumineuses alimentaires.

En effet, à l'exception de la culture de fève, les semis sont pratiqués à partir du mois de février, voir même en mars et avril pour le haricot. Pourtant, les récents résultats de recherche montrent que les semis précoces sont plus productifs, particulièrement dans les zones non gélives.

En culture pluviale les semis tardifs rendent les cultures plus sujettes au déficit hydrique terminal, notamment durant les années à printemps sec et dans des sols peu profonds ou à faible capacité de rétention en eau.

Ce constat nous a conduits depuis 1983 à nous poser une question simple que les agronomes se posent au moins une fois dans leur vie: comment réhabiliter une culture en essayant de comprendre le rôle d'un ou plusieurs facteurs limitant une culture donnée.

En ce qui nous concerne, nous considérons que dans les zones de production de légumineuses (qui sont pratiquement les mêmes que celles des céréales), la pratique de la culture pluviale reste la plus économique à condition que le déficit hydrique soit corrigé dans la mesure du possible par une irrigation de complément lorsque celle-ci s'avère nécessaire.

Ceci implique la maîtrise de la réponse de la culture au stress hydrique qui risque d'apparaître à des phases phénologiques différentes durant le cycle végétatif de la culture, afin de mieux valoriser le minimum d'eau apportée sous forme d'irrigation de complément en ciblant les phases phénologiques les plus sensibles, donc celles qui valorisent mieux l'eau d'irrigation.

Ainsi, durant la période de 1983 à 1991, nous avons réalisé plusieurs essais dans lesquels nous avons abordé les effets du stress hydrique sous ses différentes formes.

Néanmoins, le phénomène de chevauchement, c'est à dire la présence simultanée durant la période de reproduction d'organes fructifères à des phases phénologiques différentes ne nous a pas permis de définir avec un maximum de précision le degré de sensibilité au stress hydrique des différentes phases phénologiques (de la phase bouton floral à la maturité physiologique des gousses).

Afin de contourner ce problème, nous avons opté pour la méthode de marquage des organes fructifères qui consiste à marquer systématiquement chaque organe au moment du début du stress pour les trois essais sous serre et au moment du début de l'irrigation de complément pour l'essai en plein champ.

Ainsi, durant la période de 1992 à 1994, nous avons réalisé trois essais sous serre dans lesquels nous avons étudié les effets du stress hydrique appliqué à sept phases phénologiques de la période de reproduction sur les composantes du rendement du haricot nain (*Phaseolus vulgaris* L.) variété Coco de Prague.

Afin de généraliser nos résultats obtenus sous serre, nous avons réalisé en 1995 un essai en plein champ dans lequel nous avons étudié le comportement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines (haricot, pois, pois chiche et fève) vis à vis d'une irrigation de complément apportée à des phases phénologiques différentes du cycle végétatif de chaque espèce.

MOUHOUCHE Brahim

## Remerciements

Au terme de quatorze années de recherche sur les effets du stress hydrique et les irrigations de complément sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines, je tiens à remercier tous ceux et toutes celles qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de nos expérimentations et à la finalisation de ce modeste document.

A cet effet, je remercie Monsieur Charles BALDY directeur de recherche à l'INRA de Montpellier qui a été en quelque sorte l'instigateur de nos travaux de recherche sur les contraintes hydriques et leurs effets sur la production des légumineuses alimentaires à grosses graines.

M. BALDY m'a accueilli durant plusieurs années dans son laboratoire des plantes sous stress environnementaux (ex LECSA) de Montpellier. Il m'a permis aussi de connaître les spécialistes des légumineuses alimentaires et du stress hydrique à l'INRA et l'ENSA de Montpellier. Ces rencontres m'ont permis d'approfondir et parfois de réorienter mes activités de recherche. A cet effet, je citerais M. Jaques WERY et Olivier TURC qui ont bien voulu me recevoir à plusieurs reprises dans leur laboratoire respectif à l'ENSA et à l'INRA de Montpellier, qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.

Mes vifs remerciements et ma grande reconnaissance s'adressent à Madame Françoise RUGET qui a bien voulu me tendre la main en 1994 pour diriger mes travaux de recherches sur proposition de M. BALDY sorti en retraite. Ainsi depuis 1994 à ce jour Françoise m'a accueilli pour mes nombreux stages et surtout durant mes années de détachement. Elle m'a toujours facilité mes séjours en France par ses aides multiformes, que ce soit pour l'encadrement et la finalisation de ma thèse, pour l'hébergement au foyer du Domaine St Paul et pour toutes les démarches administratives internes et externes à la station de l'INRA d'Avignon. Je dirais, à ce sujet et sans exagérer que Françoise a fait plus qu'il n'en faut pour que mes séjours soient les moins pénibles possibles. Je ne pourrai pas passer sous silence les efforts qu'elle a fournis pour que je puisse publier avec sa collaboration un article dans la revue Agronomie. Elle m'a permis de réaliser ainsi un vœu, plutôt un rêve si cher à tout chercheur et/ou enseignant.

Je remercie aussi Monsieur HALITIM Amor d'avoir bien voulu m'accompagner depuis 1997 dans mon aventure en qualité de nouveau directeur de recherche coté algérien en remplaçant Monsieur ZERAIA Lamri, qui était jusque là mon directeur de thèse, mais malheureusement depuis son départ précipité d'Algérie en 1994, je n'ai jamais pu avoir de ses nouvelles que jusqu'à la fin de 1999.

Malgré le temps relativement court que j'ai eu à travailler avec M. HALITIM, je reconnais sincèrement sa très grande compétence en matière de rédaction et de mise en forme que ce soit pour la thèse elle-même ou la publication de l'article publié dans la revue Agronomie.

Ainsi, les séances de travail qu'il m'a consacré lors de son passage à Avignon dans le cadre de la concertation avec Madame RUGET et mes nombreuses rencontres que j'ai eu avec lui à l'INA m'ont été d'une grande utilité, particulièrement en ce qui concerne le style de présentation et l'interprétation des données.

Le lecteur constatera, malheureusement que M. HALITIM n'est pas cité en tant que coauteur à cause du fait que l'article a été déposé en 1996 juste avant son officialisation en tant que nouveau directeur de thèse, j'en suis sûr que M. HALITIM comprendra ma situation à ce moment là, je le remercie infiniment pour son aide précieuse.

Je remercie messieurs BOUZNAD, BENLARIBI, AIDAOUI et MESSAHEL qui ont accepté de faire partie du jury et ont ainsi contribué à améliorer le contenu de ce document par leurs critiques très constructives qui me permettront sans aucun doute d'apporter la touche finale à ma thèse.

Il me reste l'agréable devoir de remercier Messieurs Bernard SEGUIN et Richard DELECOLE directeurs de recherche et directeurs de la station de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon pour toutes leurs assistances, leurs aides et leurs encouragements durant tout mon séjour en Avignon. Je reconnais, sincèrement qu'ils ont l'art et la manière de mettre les gents à l'aise dans les moments un peu difficiles. Qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude et ma reconnaissance la plus grande.

Je remercie aussi tout le personnel de la station de bioclimatologie, y compris ceux qui nous ont quittés subitement, pour leur accueil chaleureux et amical qui m'a permis de m'intégrer dès les premiers jours de mon séjour en Avignon. Je préfère ne pas m'aventurer à citer de noms car je suis convaincu d'en oublier certains. Que chacun se reconnaisse dans ces quelques lignes. Néanmoins, je voudrais que Madame Claude RIAS responsable de la bibliothèque de la station de bioclimatologie sache que je lui dois énormément car sans son aide je n'aurais certainement pas pu réaliser mon travail bibliographique comme je l'ai fait. Elle a toujours fait en sorte que je puisse aboutir à la référence bibliographique recherchée. Je la remercie vivement.

Mon séjour au foyer du Domaine St Paul m'a été d'une très grande utilité dans la réalisation et l'accomplissement de mon programme de travail durant mon séjour en France. En effet la proximité du foyer, du restaurant et de la station de bioclimatologie m'a évité toutes les contraintes de transport quotidien et d'éloignement par rapport à mon poste de travail. Que tout le personnel du service des moyens généraux de l'INRA d'Avignon, en particulier Monsieur le directeur, Madame Tacchini et Madame Marcon trouvent ici ma profonde reconnaissance et je les remercie du fond du cœur.

Comme le plus gros de mes travaux de recherche a été fait en Algérie, je me dois de remercier tous ceux qui m'ont permis de réaliser mes travaux de recherche relativement dans de bonnes conditions, selon les moyens dont ils disposent.

A ce sujet, je remercie Monsieur HAMADACHE directeur de la station ITGC de Oued Smar et ses collaborateurs qui m'ont permis à plusieurs reprises de réaliser mes expérimentations de plein champ. Ils ont souvent mis à ma disposition tous les moyens matériels et humains nécessaires à une bonne conduite de mes expérimentations.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur le directeur et le personnel de la station de l'Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles (ITCMI) de Staoueli qui m'ont permis de réaliser mes deux premiers essais sur la culture du haricot en 1983.

C'est grâce à ces deux essais, particulièrement à celui conduit en compartiment à simulation d'atmosphère que j'ai pu attraper le virus du genre *Phaseolus* et après, celui des autres légumineuses alimentaires à grosses graines (*Cicer*, *Vicia*, *Pisum* et à un degré moindre le genre *Vigna*). En effet, depuis 1983, je n'ai jamais pu quitter le monde des légumineuses alimentaires à grosses graines, sauf pour aller parfois empiéter sur les plates-bandes du monde des céréales, qui se complètent mutuellement dans la ration alimentaire du citoyen algérien.

C'est aussi plus qu'un devoir pour moi de reconnaître que j'ai pu bénéficier de l'Institut National Agronomique (INA), mon port d'attache de plusieurs avantages, qui m'ont permis d'aboutir à la finalisation de ma thèse, que ce soit pour la réalisation de mes expérimentations à l'intérieur ou à l'extérieur de l'INA, pour les nombreux stages et congés scientifiques dont j'ai bénéficié et surtout des quinze mois de détachement à l'INRA d'Avignon. En effet, mes nombreux voyages m'ont permis de rencontrer beaucoup de personnes qui m'ont souvent orienté

dans la finalisation de ma thèse. Que tous les directeurs et le personnel administratif de l'INA trouvent ici ma reconnaissance et ma gratitude.

Je dois reconnaître aussi que les avantages dont j'ai bénéficié sont en quelque sorte des sacrifices consentis par mes collègues enseignants du département de Génie Rural, des membres du Conseil Scientifique et des différents Responsables du Département de Génie Rural qui se sont succédés ces dernières années. Je les remercie du fond du cœur pour leur compréhension.

Je remercie aussi mon ami et mon compagnon de lutte contre les différentes formes du stress hydrique et ses méfaits sur le genre *Phaseolus* et *Vigna*, Abd-El-Kader EDDOUD qui ne va pas tarder à devenir monsieur haricot comme certains de ses prédécesseurs. Il devient un vrai mordu du stress hydrique qui rend la vie dure aux pauvres *Phaseolus* au point où les importations de l'Algérie en haricot sec sont de l'ordre de 99% par rapport aux besoins nationaux.

Si je remercie Abd-El-Kader, ce n'est pas seulement parce qu'il est mon compagnon mais c'est surtout parce qu'il m'a toujours prêté main forte dans tout ce qui touche au monde de l'informatique, particulièrement tout ce qui a trait aux analyses statistiques, qu'il trouve ici mes remerciements les plus amicaux.

Il serait injuste de ma part de passer sous silence l'intérêt que je porte à tous les travaux de recherche que j'ai pu effectuer avec tous les étudiants de graduation et de post-graduation qui ont vécu avec moi, chacun à sa manière, les aventures du stress hydrique et ses méfaits sur les légumineuses alimentaires, particulièrement les genres *Phaseolus*, *Vicia*, *Cicer* et *Pisum* conduits en plein champ, sous serre plastique ou sous serre en verre et en conteneurs. Je reconnais qu'ils ont beaucoup contribué à la réussite des pénibles et longues opérations de marquage ou d'étiquetage des organes fructifères qui sont les caractéristiques principales de notre méthode de travail qui consiste à marquer tous les organes fructifères avant et/ou après l'application du stress hydrique pour les essais conduits sous serre et au moment de l'apport de l'irrigation de complément pour les essais conduits en plein champ.

J'espère que les étudiants que j'ai encadrés depuis 1979 ou que j'encadre actuellement me pardonnent mes nombreux sauts d'humeur. Qu'ils sachent sincèrement que leurs intérêts sont toujours en jeux lorsqu'il m'arrive de m'emporter.

C'est par pure pudeur que je n'ai pas fait allusion à ma famille au sens large du terme, et à ma petite famille, en particulier. Ainsi, je leur ai réservé en quelque sorte le mot de la fin car les sacrifices qu'ils ont consentis pour m'encourager et me soutenir dans tout ce que j'ai entrepris de faire ces dernières années sont difficiles à estimer, particulièrement durant mes absences répétées et parfois longues.

A cet effet, j'exprime ma profonde reconnaissance à tous les membres de ma grande famille, mes parents, mes oncles et surtout à mon grand frère pour tous ses encouragements et son soutien permanent et sans limite pour que je puisse continuer mes études secondaires et universitaires.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à tous les membres de ma petite famille, mes enfants et surtout ma femme pour les multiples sacrifices qu'ils ont consentis, particulièrement durant ces dernières années durant lesquelles j'ai été trop absorbé par mes travaux de recherche.

Je suis plus que conscient que sans leurs encouragements et leur soutien permanent, ma thèse n'aurait jamais vu le jour.

Ceci s'est fait sans nulle doute au dépens de chacun des membres de ma petite famille, particulièrement ma femme qui a supporté les contraintes de toute nature en assumant en plus de son rôle le rôle qui m'est dévolu en tant que père.

Que chacun des membres de ma famille trouve en ces quelques lignes l'expression de ma

très grande reconnaissance et surtout mon respect le plus profond.

Brahim

# INTRODUCTION

## 1. La production de légumineuses à grosses graines en Algérie

En Algérie, la mauvaise répartition des précipitations dans l'espace et dans le temps représente le principal facteur de limitation des niveaux du rendement des cultures de légumineuses alimentaires à grosses graines (LAGG) conduites en culture pluviale (haricot, pois chiche, fève et pois). Mis à part la zone de l'extrême Nord-est de l'Algérie, durant leur cycle végétatif, toutes ces cultures subissent un déficit hydrique variable en fonction de la quantité et de la répartition des précipitations annuelles propres à chaque zone de culture.

En année sèche, des surfaces considérables sont déclarées non productives, ce qui provoque des fluctuations inter-annuelles des surfaces emblavées (fig. 1a).

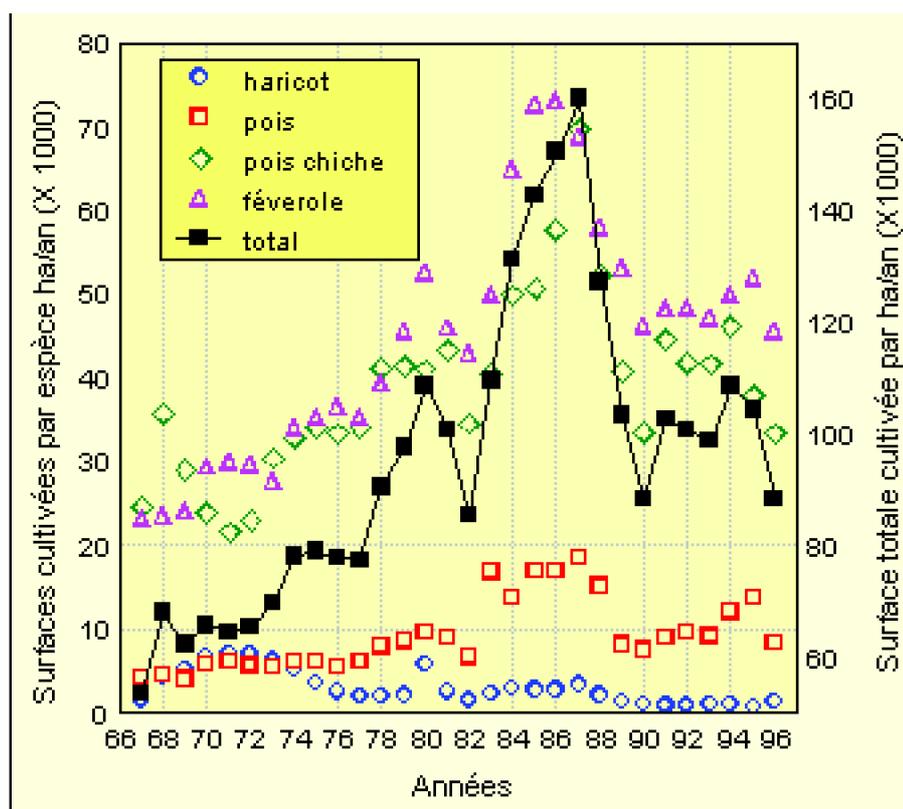


Figure 1a : Evolution des surfaces cultivées annuellement

Durant les 30 dernières années, la surface totale des LAGG a fluctué entre 53 000 ha en 1967 et 160 000 ha en 1987, avec une moyenne inter-annuelle de 100 000 ha.

La moyenne inter-annuelle de la production est de 500 000 quintaux toutes espèces confondues, soit une moyenne nationale de 5 q/ha. Cette moyenne cache de grandes disparités entre les années (2.51q/ha en 1988 et 7.53 q/ha en 1996) et entre les principales espèces (de 2.79 q/ha pour la lentille à 4.88 q/ha pour la fève et la féverole) (ITGC, 1998). Selon la même source, en année favorable, les rendements peuvent pratiquement doubler (6.03 et 6.19 q/ha pour la lentille et le pois chiche en 1991 et 7.53 q/ha pour la fève et la féverole en 1996). Le reste des surfaces non déclassées chaque année connaît des rendements faibles qui sont souvent à la limite du seuil de rentabilité économique (fig. 1b). Selon la F.A.O. (1987), l'Algérie a enregistré les rendements les plus faibles parmi les pays producteurs de pois chiche avec 362 et 263 kg/ha, respectivement pour les périodes de 1979-81 et 1984-86, ce qui représente 15.9% du rendement obtenu en Egypte et 37.7% par rapport au rendement moyen des pays producteurs de pois chiche durant la période de 1984 à 1986.

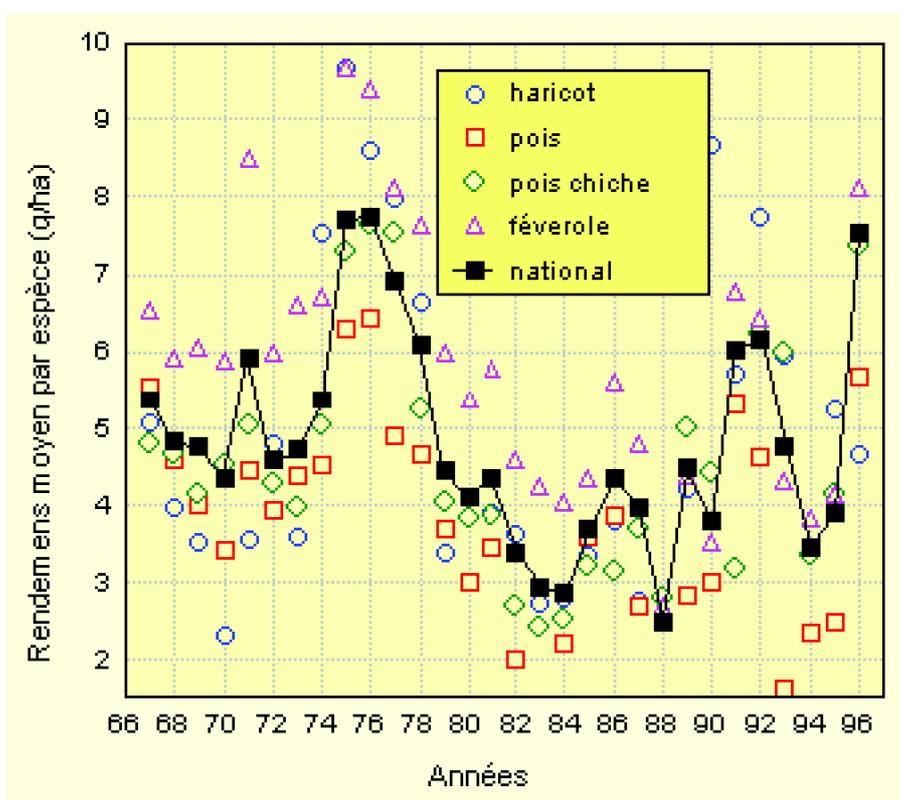


Figure 1b : Evolution des rendements (q/ha)

Cette situation rend, dans certains cas, les agriculteurs hostiles à l'introduction des légumineuses alimentaires dans leur assolement.

Afin de diagnostiquer les principaux problèmes qui peuvent entraver la relance des cultures de LAGG, nous avons réalisé une enquête auprès des agriculteurs. Cette étude a révélé que l'eau représente le facteur le plus limitant pour la production de légumes secs conduits en culture pluviale (Mouhouche et al. 1998), ceci en raison de sa mauvaise répartition dans l'année ou par la faiblesse des ressources en eau pour l'irrigation de complément. Ainsi, pour que ces cultures soient menées à bien, elles nécessitent des quantités très importantes d'eau d'irrigation, que ce soit un complément pour les cultures de plein champ ou une irrigation intégrale pour les cultures sous serre et les zones à faible pluviométrie.

En l'absence de ces quantités d'eau, ces cultures 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 d'obtenir des rendements compétitifs avec les autres cultures légumières et même avec les céréales. En effet, les céréales sont souvent moins sensibles au stress de printemps car elles ont déjà bénéficié des pluies hivernales. Selon ITGC (1998), durant la période de 1980-96 les cultures de céréales ont connu une amélioration de 6.21%, alors que les légumineuses alimentaires ont régressé de 49%.

De plus, l'irrigation de complément (ou d'appoint) pour les légumineuses alimentaires de plein champ représente une nouveauté dans le déroulement de l'itinéraire technique. De ce fait, elle est difficilement acceptée par la plupart des agriculteurs. En effet, ces

derniers considèrent que l'irrigation des LAGG implique automatiquement la vente de la récolte en tant que légume frais, à cause du surcoût engendré par l'irrigation. Ainsi, dans la wilaya de Biskra, ces dernières années, les 5000 à 7000 ha de fève cultivés annuellement sont destinés à la consommation de gousses tendres ou à écosser.

De ce fait, le marché local est relativement bien alimenté en LAGG récoltés à l'état frais à consommer sous forme de gousses, en filet ou à écosser. Au contraire, les graines à l'état sec se font de plus en plus rares, elles atteignent des prix qui dépassent l'imagination (à titre d'exemple, en 1995, le prix du kilogramme de pois chiche a varié de 105 à 110 DA). Ceci est dû à une instabilité de la production nationale des légumineuses qui a fluctué entre 331 000 quintaux en 1982 et 754 000 quintaux en 1996, soit 228%. Les collectes enregistrées par l'OAIC pour l'année 1996 ne représentent que 49 000 quintaux, dont 11 000 collectés en tant que semences.

Pour une consommation annuelle moyenne de 1.5 M (millions) de quintaux, le taux de couverture des besoins pour les quatre légumineuses alimentaires à grosses graines durant la période de 1995 à 1998 varie selon les espèces. Ainsi la couverture des besoins est assurée, pratiquement à 100% pour le genre *Vicia* (Fèves et féveroles), alors que ce taux ne représente que moins de 1% pour le genre *Phaseolus* (tous les haricots confondus). La production nationale en pois sec et pois chiche représente, respectivement 20 et 36%.

## 2. Résumé bibliographique

Les recherches sur l'influence du stress hydrique sur la production des légumineuses montrent que toute restriction hydrique se traduit par une baisse des productions de matière sèche totale, des gousses et des graines en nombre et en poids. Cette baisse dépend de l'intensité, de la durée et de la fréquence du stress. Mais les effets dépressifs d'un stress hydrique dépendent aussi de la faculté de l'espèce à résister à la sécheresse au sens large du terme. Cette faculté sera caractérisée par l'indice de réponse à la sécheresse (IRS), calculé dans chaque situation.

La situation de stress conduit inévitablement à une baisse du niveau de valorisation de l'eau de pluie et des irrigations de complément.

Les LAGG se caractérisent par une période de reproduction relativement longue par rapport à l'ensemble du cycle, elle peut s'étaler sur 25 à 35 jours, ce qui représente pour le haricot 35% à 45% de la durée totale du cycle (White et al, 1990; Pena Cabriales et Castellanos, 1993), mais surtout un cycle court par rapport aux grandes cultures.

Par ailleurs, l'étalement de la période de reproduction entraîne le chevauchement de plusieurs phases phénologiques. Ceci rend difficile la caractérisation de la sensibilité au stress hydrique des différentes phases. En effet, en cas de stress durant le stade dit de floraison les résultats obtenus ne représentent en réalité que l'effet moyen subi par les organes fructifères quelle que soit leur phase phénologique au moment du stress.

Afin de s'affranchir du phénomène de chevauchement, nous avons procédé à un

---

marquage systématique des organes fructifères au début du stress pour l'essai sous serre et au début de la période d'irrigation de complément pour l'essai en plein champ.

Le problème du chevauchement des phases phénologiques des légumineuses alimentaires a été soulevé par différents auteurs, en particulier, Wery et Turc (1990) chez le pois-chiche, Deumier (1990), Ney et al (1994) chez le pois, Laurent (1992), et Mouhouche (1994), Mouhouche et al. (1998) chez le haricot.

La phase d'application du stress durant la période de reproduction revêt une importance capitale pour l'élaboration des différentes composantes du rendement (Acosta Gallegos et Shibata, 1989). Ainsi, un stress appliqué pendant la phase de développement végétatif n'a souvent aucun effet sur le rendement du haricot (Pena-Cabriales et Castellanos, 1993). Certains auteurs considèrent qu'un apport d'eau pendant cette période est beaucoup plus néfaste que bénéfique, parce que l'enracinement reste plus superficiel (Vieira da Silva, 1967; 1973 ; Daunay, 1985 ; Laurent, 1992).

Appliqué durant la période florale et pré-florale, le stress hydrique agit principalement sur le nombre de gousses par plante (NGo/Pt) ou par  $m^2$  (Tabbada et Flores, 1982; Floor Drees, 1984; Petersen, 1985; Mouhouche, 1994; Mouhouche et al., 1998 ; Sangakkara, 1994) et de graines par plante (NGr/Pt) ou par  $m^2$  (Valdir et al, 1991; Pena-Cabriales et Castellanos, 1993). Cette action est due surtout à une chute importante des organes fructifères. Ceci a été démontré chez le soja (Bouniols et al, 1982) et chez le haricot (Bouwkamp et Summers, 1982; Tabbada et Flores, 1982). Le stress peut provoquer aussi un raccourcissement de la période d'éclosion de fleurs nouvelles chez le haricot (Sangakkara, 1994) et chez le pois (Deumier, 1990; Ney et al, 1994).

La sensibilité des composantes du rendement au stress hydrique est variable. La production de gousses par plante, qui dépend du taux d'avortement, représente la composante prépondérante pour l'élaboration du rendement des légumineuses alimentaires. Ainsi, chez le *Vigna*, Kuhad et al (1990) obtiennent une réduction du nombre de gousses par plante (NGo/Pt) 5 à 7 fois plus importante que le poids moyen de la graine. Chez le haricot, de Magalhaes et Millar (1978) obtiennent une réduction de 31% pour le NGo et seulement, 18% pour le nombre de graines par plante (NGr/Pt).

Le stress hydrique conditionne la production, non seulement des gousses, mais aussi du nombre de graines par gousse (NGr/Go), ce dernier étant relativement moins sensible que le NGo, que ce soit chez le soja (Vidal et al, 1981 a et b; Bouniols et al; 1982) ou chez le haricot (Petersen et Devis, 1982; Petersen, 1985, Acosta Gallegos et Shibata, 1989; Valdir et al, 1991). Au contraire, Romic et al (1994) montrent qu'une irrigation de complément durant la période de reproduction du haricot peut augmenter le nombre de gousses de 36 à 105% selon les années, ce qui revient à montrer que l'irrigation a un effet inverse du stress (ce qui semble logique).

### 3. Présentation des expérimentations

Ainsi, nos essais sous serre et en conteneur visent à mettre en relief le degré de

sensibilité au stress hydrique des différentes phases phénologiques de la période de reproduction par la méthode de marquage des organes fructifères et à quantifier les effets dépressifs d'un stress hydrique appliqué à chacune des phases sur les composantes du rendement exprimées en nombre, en poids et leur interaction.

Bien que le phénomène d'avortement des organes fructifères et de chevauchement des différentes phases phénologiques soient communs aux plantes indéterminées, nous mettons en relief l'ampleur de ces deux phénomènes pour expliquer et justifier notre choix de la méthode de marquage et son efficacité par rapport à la méthode classique pour l'étude du stress appliqué au début d'une phase phénologique c'est ce que nous appelons stress pré-phase.

L'essai en plein champ nous permet de souligner l'intérêt des irrigations de complément apportées à des phases phénologiques différentes sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires, de déterminer l'indice de réponse à la sécheresse et l'efficacité d'utilisation de l'eau (d'appoint et totale) pour chacune des quatre espèces. En d'autres termes, par l'essai plein champ, nous voulons confirmer l'effet inverse d'un apport d'eau à une phase phénologique donnée par rapport à un stress appliqué à la même phase. Les 2 expérimentations (sous serre et en plein champ) sont complémentaires, car le niveau de stress est mieux maîtrisé en culture sous abri, tandis que la culture de plein champ donne une meilleure idée de la réaction des cultures en vraie grandeur. Dans l'essai en plein champ, le marquage des organes fructifères ne concerne que les phases floraison (FL) et grossissement des graines (GG), dans lesquelles les organes fructifères ont été présents au moment de l'apport de l'irrigation de complément. Le reste des traitements (ETM, VG et SEC) ont été marqués en même temps que le traitement FL.

Bien que nous n'ayons travaillé que sur des variétés à floraison déterminée (naines), nous pensons que nos résultats peuvent être appliqués à des variétés à croissance indéterminée (grimpanes) de légumineuses et même à d'autres espèces

## **4. Plan du document**

Notre document est présenté selon la méthode classique :

- première partie : étude bibliographique ;
- deuxième partie : matériel et méthodes ;
  - méthode de marquage des organes fructifères (essai sous serre) ;
  - étude comparative de quatre légumineuses (essai en plein champ) ;
- troisième partie : résultats et interprétation ;

L'interprétation de nos résultats se subdivise en trois grands chapitres :

- le premier traite les aspects de l'effet du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement du haricot exprimées en nombre. Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans la revue *A gronomie*, 18, 3, 1998.
- dans le second chapitre, nous avons présenté un résumé sur l'effet du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement du haricot exprimées en poids.
- les résultats de l'effet simultané de l'irrigation de complément et de sa phase phénologique d'application sur quatre légumineuses alimentaires en plein champ sont étudiés dans le troisième chapitre.

Ces deux chapitres ont fait l'objet chacun d'une communication au 1<sup>er</sup> séminaire sur les légumineuses alimentaires qui s'est tenu à Hammam Bouhdjar (wilaya de Témouchent) du 10 au 12 mai 1998.

Nous terminons notre document par une conclusion générale et des perspectives.

En résumé, l'originalité de notre méthode de travail réside dans le fait que l'effet du stress hydrique est analysé en fonction du stade (réel) dans lequel se trouve l'organe fructifère au moment du stress, parce que le stade de chaque organe est observé individuellement. Par ailleurs, nous avons choisi de faire deux expérimentations complémentaires : l'une sous serre et en conteneur (avec suspension des apports d'eau systématiques), l'autre en plein champ avec ou sans irrigation de complément. Le marquage individuel des organes fructifères permet de connaître précisément la phase phénologique à laquelle appartient l'organe fructifère en question au moment de l'application du stress ou de l'irrigation de complément. En effet, la floraison des légumineuses est telle qu'une multitude d'organes fructifères appartenant à des phases phénologiques différentes sont présentes simultanément (Deumier, 1988, 1990 ; Deumier et al. 1991 ; Ney et al., 1994). Nous montrerons que ces organes qui sont à des stades de développement plus ou moins avancés ont une sensibilité différente au stress hydrique ou à l'irrigation.



# PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## A. Classification botanique, répartition géographique, exigences.

### 1. Classification botanique des légumineuses alimentaires

---

D'un point de vue botanique et biochimique, les légumineuses alimentaires à grosses graines se classent comme suit :

- sous embranchement Angiospermae
- classe Dicotyledonae
- famille Fabaceae
- sous famille Papilionideae
- genres *Phaseolus* (haricot)
- *Pisum* (pois)

- *Cicer* (pois chiche) *Vicia* (fève et féverole)
- espèces *Phaseolus vulgaris*
- *Pisum sativum*
- *Cicer arietinum*
- *Vicia faba*

## **2. Origines et répartition géographique des légumineuses alimentaires**

---

### **2.1. Le genre *Phaseolus***

Le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) est originaire d'Amérique du Sud. Actuellement, sa forme sauvage se répartit dans l'aire géographique comprise entre la zone Ouest du Mexique et la zone Nord Ouest de l'Argentine (Khairallah et al. 1990). Plus précisément, selon une enquête réalisée par Farats (1989), le haricot commun serait originaire d'Amérique Centrale. Enfin, selon Heiser (1965) cité par Caramigeas (1986) le haricot peut être le résultat d'une domestication indépendante de *Phaseolus arborigeus* Burkhardt, espèce voisine qui existe à l'état sauvage dans cette région.

Selon Petersen (1985) le *Phaseolus acutifolius* (teparty bean) constituait un important aliment durant la période préhistorique du Sud Ouest de l'Amérique du Nord. Il précise aussi que ce type de haricot est natif de la zone se situant entre l'Arizona et l'Ouest du Texas.

La datation au carbone 14 de la plus ancienne culture de haricot provient de la grotte du Coxatlan de la vallée Tehuacan au Mexique (Hallard, 1982) ; la domestication du haricot remonte à plus de 7000 ans avant notre ère dans la vallée de Tehuacan au Mexique et au Pérou. Une gousse non calcinée a permis de situer cette culture à 4975 ans avant J.C. ± 200 ans, selon Caramigeas (1986). Ces deux auteurs s'accordent pour dire que le haricot a été introduit en Europe, puis en Afrique au XVI<sup>ème</sup> siècle par les Espagnols et les Portugais.

Le genre *Phaseolus* d'origine néo tropicale est très adapté aux zones tropicales d'altitude. Il est cultivé sur les hauts plateaux du nouveau monde, du Sud du Pérou jusqu'au Nord Ouest du Mexique.

Actuellement, *Phaseolus vulgaris* est largement cultivé dans la plupart des zones tropicales, subtropicales et en zones tempérées (Caramigeas, 1986).

Le genre *Phaseolus* est subdivisé en deux grands groupes de cultivars, selon le poids des grains (Sexton 1994 ; 1997) :

- un groupe de variétés de plaine, parmi lesquelles on trouve des variétés brésiliennes (Carioca, Rio Tibagi etc.), d'Amérique Centrale (grains noirs) et mexicaines (Flor de Maya, Pinto etc.). Elles sont nommées groupe méso-américain et sont assez résistantes à la sécheresse ;

un groupe de cultivars andins, qui se caractérisent par des grains de grande taille, une sensibilité à la photopériode et une grande résistance aux basses températures. Leur rendement potentiel est plus bas que le groupe méso-américain. Ils sont bien adaptés aux conditions d'altitude où ils sont souvent cultivés (Europe, USA, Canada).

“ Le nom de *Phaseolus* vient de Phaselus, nom donné par Virgile et dérivé du grec Phaselos qui signifie chaloupe, par allusion à la forme des gousses ”, mais cette légumineuse contrairement à d'autres (pois, fève et pois chiche) n'était pas connue dans le bassin Méditerranéen pendant l'Antiquité.

## 2.2. Le genre *Cicer*

Selon Sinha (1980), le genre *Cicer* peut avoir plusieurs centres d'origine. Le plus probable correspond au centre indien qui s'étend du Nord-Ouest de l'Inde au Pakistan et l'Afghanistan, le centre proche oriental qui comprend l'Iran, le Caucase, et le centre méditerranéen qui englobe la Turquie, la Grèce et le Liban. Le genre *Cicer* est largement répandu dans le bassin Méditerranéen, en Afrique, en Asie et au Mexique.

## 2.3. Le genre *Vicia*

Le genre *Vicia faba* sous ses différentes formes est cultivé depuis le Néolithique dans une ère géographique très large qui s'étale de la Chine jusqu'en Afrique.

La fève est l'une des légumineuses les plus anciennement cultivées “Elle est citée dans la Bible comme étant d'un usage fréquent pour les offrandes funéraires” (Laumonier, 1979). Elle se développe bien dans les régions subtropicales à hiver frais. Les régions éco géographiques de production de fève et de féverole correspondent aux pays d'Extrême Orient, de l'Ouest asiatique, l'Est de l'Afrique et de l'Amérique (Saxena, 1993).

## 2.4. Le genre *Pisum*

Hédrick, cité par Laumonier (1979) affirme que la culture du pois était pratiquée par les Grecs et les Romains, mais dans les textes, sa description a souvent été confondue avec celles du pois chiche, de la lentille et, pour les plus récents, du haricot. Son origine est probablement européenne ou de l'Ouest de l'Asie.

# 3. Exigences des légumineuses alimentaires

---

## 3.1. Les exigences climatiques

### 3.1.1. Le genre *Phaseolus*

Le genre *Phaseolus* est très sensible au gel (Caramigeas, 1986). Il est plus tolérant aux hautes qu'aux basses températures, néanmoins, les températures supérieures à 27 - 30°C provoquent la chute des organes fructifères, particulièrement les fleurs. Ceci est

probablement dû à une mauvaise germination du pollen provoquée par une dessiccation prématurée. Les résultats obtenus par Bouwkamp et Summers (1982) montrent qu'au-delà de 30°C la germination du pollen est inhibée, et que la température optimale de reproduction du haricot est de 24°C le jour et 20°C la nuit. De plus, les températures basses (6 à 8°C) provoquent une baisse de la germination du pollen de 35 à 55% par rapport au témoin, ceci aura pour conséquence une diminution de la fertilité des gousses.

Originaire des régions tropicales et d'altitude, le genre *Phaseolus* exige une humidité de l'air relativement élevée, particulièrement pendant la période de reproduction. Néanmoins, un excès de pluie provoque un avortement plus élevé des organes fructifères avant la nouaison et une pourriture des gousses après nouaison, particulièrement pour *Phaseolus lunatus* et *Phaseolus vulgaris*.

Un stress hydrique combiné à un stress de basse température est plus dangereux qu'un stress hydrique seul. En effet, selon les résultats obtenus par Pardossi et al. (1992) sur haricot, le froid bloque la réhydratation des tissus de la plante après irrigation. Ainsi, durant la période printanière, dans les Hauts plateaux le stress hydrique serait beaucoup plus à craindre à cause du froid hivernal et printanier.

La plupart des cultivars à port érigé et la moitié de ceux à port rampant sont peu sensibles à la durée du jour, l'autre moitié des cultivars à port rampant est dite à jours courts et à maturité plus tardive (Caramigeas, 1986).

### **3.1.2. Le genre *Cicer***

Les exigences du pois chiche semblent être moins importantes que celles des autres légumineuses alimentaires, particulièrement pour sa résistance au stress hydrique (Lecoeur et al. 1992). Néanmoins, son implantation à travers le monde correspond aux zones géographiques à climat méditerranéen à hivers froids et humides et des étés doux.

Selon ITCF (1988), le pois chiche a une bonne adaptation au déficit hydrique et aux fortes températures. Néanmoins, Saxena (1984), Van Rheenen et al. (1990) considèrent que les températures élevées et le stress hydrique représentent les facteurs climatiques les plus limitants durant la période de reproduction. Les résultats contradictoires concernant la sensibilité du pois chiche aux températures élevées sont probablement dus à la période d'application du stress et de la composante étudiée.

Un consensus semble se dégager pour l'intérêt des semis précoces pour lutter contre les risques de stress thermiques et hydriques de fin de cycle (stress terminal). Il est à signaler que cette pratique ne peut se faire que dans des régions non gélives et pour des variétés tolérantes au froid. Par ailleurs, la résistance du pois chiche aux basses températures diminue avec le développement de la culture (de la germination jusqu'à la floraison) (van Rheenen, 1990 ; Wery, 1990), ce qui est un inconvénient pour les semis précoces dans lesquels la période de reproduction peut coïncider avec les gelées printanières.

Les semis d'automne et l'irrigation de complément peuvent permettre de doubler les rendements pour des conditions analogues de culture (Delli, 1994). Saxena et al. (1990) obtiennent des résultats similaires en culture de plein champ au Nord de la Syrie.

Dans le sud de la France, Wery (1986) considère qu'un rendement correct et régulier ne peut être obtenu que par une limitation de la contrainte hydrique. Il met en relief l'intérêt des semis précoces (fin automne début printemps) par rapport aux semis tardifs (fin hiver début printemps) qui subissent, souvent des sécheresses de fin de cycle.

### 3.1.3. Le genre *Vicia*

Le genre *Vicia* est bien adapté au climat du type Méditerranéen. Il est particulièrement sensible à la sécheresse et aux températures élevées durant la période de reproduction. Le genre *Vicia* est relativement résistant au froid, ce qui le rend plus apte à être semé en automne. Sur fève et féverole, Abdalla et Fischbeck (1978) montrent les effets néfastes des températures élevées sur les composantes du rendement, et sur la durée du cycle, qui peut diminuer de moitié. L'effet négatif de températures élevées sur le rendement peut être le résultat de l'effet de la température elle-même sur les composantes (nombre) et du raccourcissement du cycle végétatif (remplissage).

Ainsi, selon Laumonier (1979), la fève peut être cultivée dans les climats les plus divers, elle tolère les basses températures (jusqu'à  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mais elle craint les fortes chaleurs, surtout lorsqu'elles sont accompagnées de sécheresse. Mouhouche (1996) arrive aux mêmes conclusions que Wery (1986) sur l'intérêt du semis précoce, pour éviter le stress hydrique.

La sensibilité au stress hydrique de la fève est toujours aggravée par les autres stress abiotiques environnementaux, tels que les températures élevées, le manque d'assimilation de  $\text{CO}_2$  par manque d'activité photosynthétique, les fortes densités de semis. A cela, peut s'ajouter la concurrence entre les organes fructifères et les organes de croissance de la plante, particulièrement le bourgeon apical, qui se développe, souvent aux dépens des organes fructifères (Karamanos et Gimenez, 1991). Le procédé du pincement apical peut être un bon moyen pour atténuer ce phénomène de concurrence.

### 3.1.4. Le genre *Pisum*

Le pois peut être cultivé dans toutes les zones géographiques à climat tempéré et humide. Il est peu sensible aux basses températures (jusqu'à  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Par contre, il est très sensible aux températures élevées, qui provoquent une réduction de la photosynthèse, de la surface foliaire et de la durée du cycle (Guilioni et al. 1998), particulièrement celles qui coïncident avec la saison sèche. Selon Laumonier (1979) les températures élevées provoquent de fortes chutes de rendement.

Le stress hydrique arrête le processus de floraison et raccourcit le cycle végétatif (Deumier, 1990 ; Ney et al. 1994).

La durée du cycle du genre *Pisum* dépend de la somme de température (Ney et Turc, 1993).

## 3.2. Les exigences édaphiques

Les exigences édaphiques concernent essentiellement la tolérance à la salinité, car c'est un problème fréquemment rencontré pour des cultures irriguées en milieu relativement

aride.

### **3.2.1. Le genre *Phaseolus***

Le haricot peut être cultivé sur la plupart des sols, des terres meubles et sableuses aux sols lourds et argileux, ainsi que sur les sols tourbeux. Il est très sensible aux sels de sodium, de manganèse et de bore (Caramigeas, 1986).

La mise en place de la culture de haricot nécessite la préparation d'un bon lit de semence pré irrigué afin de favoriser une bonne levée sans irrigation durant la période de semis levée. Une irrigation durant cette période provoque la pourriture des graines, particulièrement, en sols lourds et mal drainés (Laurent, 1992). En conditions de laboratoire, Ledraa (1993) et Robai (1998) montrent les effets néfastes de l'excès d'eau en phase de germination levée du haricot variété S102. Selon les mêmes auteurs, ces effets sont accentués par les basses températures.

### **3.2.2. Le genre *Cicer***

Selon ICRISAT (1984), le pois chiche est bien adapté aux sols lourds rétensifs des zones semi-arides des tropiques. Il est sensible aux grandes variations de l'humidité du sol et de l'atmosphère. Selon le même auteur, sur des sols séchant, les rendements peuvent doubler si on emploie des variétés résistantes. Pour les variétés non résistantes, la culture sur un type de sol séchant exige une bonne maîtrise des irrigations de complément.

Le pois chiche se cultive dans la plupart des sols, pourvu que leur salinité et leur pH soient modérés. Pour certaines régions d'Irak et d'Iran, le problème de salinité représente un handicap majeur pour la culture du pois chiche (Delver, 1962 ; Saxena, 1984).

### **3.2.3. Le genre *Vicia***

Les fèves et les féveroles s'accommodent des terrains les plus divers, néanmoins, elles préfèrent les sols meubles et bien pourvus en humus. En culture pluviale de printemps, les fèves et les féveroles redoutent les sols légers et peu rétensifs, particulièrement dans les zones à printemps peu pluvieux, par contre, en Algérie, sous irrigation intégrale (cas de Biskra et M'sila), cette contrainte est levée. En effet, dans ces régions les semis se font à partir du mois d'août, qui permet une récolte précoce (à partir du mois de décembre).

### **3.2.4. Le genre *Pisum***

La culture du pois peut se pratiquer dans la plupart des sols, cependant, elle préfère les sols légers et frais. Un taux élevé de calcaire provoque la chlorose et une mauvaise qualité du grain. Dans les sols lourds, un défaut de drainage provoque des chutes importantes dans le rendement (Laumonier, 1979).

En résumé sur les exigences édaphiques, les légumineuses alimentaires s'accommodent généralement des conditions édaphiques les plus diverses. Néanmoins, à l'exception de la culture du pois chiche qui préfère les sols lourds et rétensifs, les autres cultures préfèrent les sols légers et bien drainés.

Les LAGG ne tolèrent pas les sols salés et à pH élevé, particulièrement pour le haricot qui est extrêmement sensible au sel.

La germination levée doit se faire dans des conditions particulières d'humidité du sol. En effet, afin d'éviter les risques de pourriture des graines avant la levée, il est préférable que les semis soient effectués dans des sols bien humidifiés mais ressuyés. D'où la nécessité d'une pré irrigation quelques jours avant le semis. De plus, il est préférable d'éviter les irrigations avant la levée des jeunes plants.

### **3.3. Besoins en eau**

#### **3.3.1. Le genre *Phaseolus***

L'eau est nécessaire, mais son excès peut être aussi néfaste que son manque. Ainsi, selon Bachchhav et al. (1993), l'excès d'eau provoqué par une fréquence d'arrosage élevée injustifiée provoque une diminution du poids des graines, du poids des gousses, de l'indice de récolte et de la qualité protéique des graines de haricot. Une pluviométrie excessive provoque la coulure et les risques de maladies. En cas d'irrigation très abondante, on assiste à une mauvaise efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (consommation de luxe). De plus, surviennent alors des problèmes liés à une situation d'ennoyage quasi-permanent : asphyxie, puis, comme en pluviométrie excessive, coulure et maladies.

Les besoins en eau du haricot pour un cycle de 75 à 120 jours (selon les saisons et les variétés) varient de 300 à 400 mm (Farats, 1989 ; Mouhouche, 1991 ; 1997). Selon les mêmes auteurs, les phases de plus grande sensibilité au manque d'eau correspondent à la période de reproduction (floraison, élongation et remplissage des gousses).

#### **3.3.2. Le genre *Cicer***

Parmi les légumineuses alimentaires à grosses graines, le pois chiche semble être le plus résistant au stress hydrique. Ainsi, son irrigation ne doit être envisagée qu'exceptionnellement en année sèche (ITCF, 1988).

Pour les cultures pluviales, une pluviométrie de 400 mm par an est nécessaire pour un bon développement de la culture (Saxena, 1984).

En culture sous irrigation de complément, selon Masood et Kuchwaha (1985), les résultats obtenus dans dix-huit localités en Inde montrent qu'un bon rendement de pois chiche nécessite deux irrigations en sol peu rétif et une seulement en sol rétif. De plus les irrigations de complément doivent correspondre à la période de floraison et de développement des gousses. Selon les mêmes auteurs, et Wery et al. (1988) des apports d'eau trop abondants provoquent un développement excessif de la biomasse végétative aux dépens de la production de graines. En Inde, dans la région de Kaliani, Mandal et al. (1986a et b) confirment la grande sensibilité du pois chiche à l'excès d'eau. Au-delà de 3 irrigations, l'efficacité d'utilisation de l'eau devient faible et même parfois négative.

#### **3.3.3. Le genre *Vicia***

Les besoins en eau de la fève sont comparables à ceux du pois chiche. Selon Loss et al. (1997) ces besoins sont estimés à 400 mm durant un cycle de 120 à 150 jours. Rengasamy et Reid (1993) estiment ces besoins à 400 à 500 mm. Selon les mêmes auteurs, en régime hydrique normal, les besoins en eau de la fève varient de 2 à 8 mm/jours, selon les phases de développement et la date de semis. La phase de grande sensibilité au stress hydrique commence à partir 65 jours après le semis (Reid, 1990), pour atteindre son maximum à 120 jours après le semis.

### **3.3.4. Le genre *Pisum***

Comparée aux autres légumineuses alimentaires, les besoins en eau d'une culture de pois sont modérés, mais un manque d'eau durant la période de reproduction peut provoquer des chutes de rendement relativement élevées.

Durant son cycle végétatif, une culture de pois nécessite environ 250 mm (ITCF, 1989 ; Deumier, 1987). En culture pluviale, le pois nécessite 2 à 4 irrigations, soit 100 à 150 mm, selon la pluviométrie de la période végétative (Deumier et al. 1991).

Il faut signaler aussi que malgré sa sensibilité au stress hydrique, le pois peut être produit en culture pluviale parce qu'il peut bénéficier des pluies de fin de l'hiver à cause de sa tolérance aux semis précoces. Ainsi, dans l'Oranie (région peu pluvieuse), d'importantes surfaces de pois sont conduites en culture pluviale, ce qui est pratiquement impossible pour la culture du haricot.

## **B. L'eau dans la plante**

### **1. Rôle de l'eau dans la plante**

---

L'eau est essentielle au fonctionnement de la plante, nous l'avons vu, puisque sa production est perturbée en cas de manque plus ou moins intense ou prolongé d'eau. Les principaux rôles de l'eau dans la plante sont, rappelons-le, de trois types :

- d'abord l'eau assure par son flux important une régulation thermique essentielle dans la plante : la transpiration consomme une énergie qui échaufferait la plante et la conduirait à la mort en l'absence d'eau.
- ce flux important s'accompagne de circulation d'eau dans la plante, qui permet le transport des éléments minéraux (sève brute) et, moins directement, des assimilats (sève élaborée) qui permettent la croissance et le remplissage des organes
- la présence d'eau maintient les cellules en état de turgescence. Il s'agit en particulier des cellules des organes en croissance, auxquels l'eau est nécessaire, et des stomates, par lesquels se font simultanément les échanges d'eau (transpiration) et de gaz ( $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ )

En résumé, l'activité physiologique d'une plante dépend des facteurs du milieu qui l'entoure. Parmi eux, l'eau joue un rôle prépondérant, puisqu'elle est le principal vecteur des échanges de la plante avec le sol et l'atmosphère : un manque d'eau provoque simultanément une diminution de l'absorption des minéraux et de la fixation du CO<sub>2</sub>, liée à la fermeture stomatique.

## 2. Contenu en eau de la plante, consommation d'eau

---

Le développement harmonieux d'une plante ne peut se réaliser que si la couverture de ses besoins hydriques est assurée durant tout son cycle végétatif. En d'autres termes, la plante doit se développer dans un sol ou un substrat qui lui assure son confort hydrique (75 à 85% de sa capacité de rétention) (Katerji et Itier 1985). L'eau n'est pas seulement un moyen presque inactif de remplissage des organes de la plante pour le maintien de son port, mais c'est aussi un moyen de transport et de dissolution des éléments nutritifs solubles entre les coiffes racinaires et la partie aérienne. L'eau joue aussi un rôle de régulateur thermique des limbes par son passage de la forme liquide en vapeur.

Dans le monde végétal, l'eau est l'élément constituant pondéral le plus important, puisqu'il représente 85 à 90% durant la période active de végétation (De Raissac, 1992) et 60 à 80% du poids frais de la plante à la sénescence (Tardieu et al. 1995 ; Cruiziat, 1995 ; Monneveux et Belhassen, 1996). Cette quantité impressionnante d'eau joue un rôle tampon entre la demande instantanée d'eau dont la plante a besoin et la quantité mise à sa disposition. Selon Robelin (1983), un plant de maïs peut consommer l'équivalent de son poids frais en eau par jour au mois de juillet en région tempérée, soit 30 à 50 tonnes d'eau par ha par jour. Cette quantité peut être multipliée par 3 en région désertique. Lorsque l'offre de la plante est inférieure à la demande climatique, on est en situation de manque d'eau, ce qui implique pour la plante un état de stress hydrique. Cependant, certaines plantes, dites isohydriques, conservent leur teneur en eau le plus longtemps possible. D'autres, anisohydriques, perdent de l'eau sans affecter trop leur métabolisme. Dans ce cas, la plante puise dans ses réserves jusqu'à un taux admissible par ses organes (Tardieu et al. 1995 ; Cabibel et Isbérie, 1997). Tardieu et al. (1995) considèrent que l'activité physiologique d'une plante vasculaire est affectée dès que la teneur en eau de ses organes diminue de 15 à 25% de sa valeur maximale selon les espèces. Lorsque la situation de déficit perdure, la plante régule sa demande par un abaissement du flux de transpiration instantané par une fermeture progressive des stomates (ajustement instantané). Cette fermeture stomatique a évidemment l'intérêt de diminuer les pertes d'eau de la plante, mais diminue aussi la fixation de CO<sub>2</sub>, donc la production et provoque un échauffement de la plante par manque de transpiration (régulation thermique de l'eau). Si la différence "offre - demande" n'est pas rétablie pendant une période relativement plus longue, la plante met en place d'autres processus qui lui permettent de mieux supporter la sécheresse et les risques liés au réchauffement des organes aériens (de Parcevaux et Perrier, 1973).

## 3. Définitions du stress hydrique

---

Les auteurs qui ont travaillé sur le stress hydrique sont nombreux, les définitions sont multiples également. Selon Bourdu (1983), "le terme stress, d'origine anglo-saxonne, évoque une série de perturbations (dommages) provoquées par des agents agresseurs du milieu". "Le stress, au sens physique du terme est une contrainte hydrique appliquée au végétal, entraînant une réponse de celui-ci" (Berger, 1973).

Passioura (1996) considère que le stress hydrique est une circonstance de manque d'eau qui provoque une baisse de la croissance, du développement et/ou la production de la plante ayant subi le stress.

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

D'un point de vue modélisation des effets du stress hydrique sur la consommation de l'eau par les cultures, "le stress hydrique est un ensemble de variables fonction de l'état hydrique de la culture ou du sol qui vont être introduites dans un modèle de fonctionnement des cultures pour réduire les principaux processus établis en conditions optimales d'alimentation hydrique" (Bonhomme et al. 1995).

Monneveux et Belhassen (1996) considèrent que dans la pratique, un stress hydrique est presque toujours accompagné par d'autres stress abiotiques tels qu'un choc thermique, une baisse excessive de l'humidité relative de l'air, une insolation ou une salinisation du sol ou du substrat. Dans ce cas, la réaction de la plante n'est pas due seulement au stress hydrique, mais à l'effet simultané de tous les stress environnementaux.

#### **4. Le concept de résistance des plantes à la sécheresse**

---

Une espèce résistante à la sécheresse doit pouvoir supporter des conditions de déficit hydrique, mais aussi valoriser toutes ses potentialités en régime hydrique normal (Vieira Da Silva, 1967). Selon le même auteur et Guehl (1995), l'adaptation d'une plante à son milieu dépend d'un bon fonctionnement stomatique qui permet un niveau élevé d'absorption de CO<sub>2</sub> et une perte d'eau sous forme de vapeur relativement faible.

Vieira-Da Silva (1967), Tan Boun Suy (1978) qualifient d'espèce résistante à la sécheresse une espèce qui présente une transpiration élevée en conditions hydriques optimales et un contrôle efficace de la transpiration en conditions de restriction hydrique. Ainsi, la résistance à la sécheresse n'est pas une simple capacité de survie à une sécheresse passagère, mais aussi une bonne capacité de production en conditions optimales.

La tolérance à la sécheresse est souvent confondue avec la notion de survie en condition de manque d'eau, d'où la confusion entre la tolérance et le xérophytisme qui est une accommodation à un développement presque normal en condition de manque d'eau quasi permanente (Passioura, 1996). Selon le même auteur, la tolérance n'implique pas un potentiel de production élevé, mais le maintien d'un minimum de production suite à un stress temporaire.

Selon Derieux (1983), un génotype est adapté à un milieu s'il permet une production de qualité en supportant les faibles contraintes du milieu sans diminution importante de la production. Selon le même auteur, d'un point de vue économique, un génotype adapté doit assurer :

- une production abondante, régulière et de qualité ;
- une minimisation des coûts de production ;
- le maintien du potentiel de l'appareil de production.

Robelin (1983) spécifie qu'en plus de l'adaptation au milieu, une plante résistante doit reprendre son activité physiologique et de croissance normale après rétablissement des conditions optimales de développement (après réhydratation). En effet, le caractère adaptatif d'une plante doit non seulement lui permettre de survivre mais aussi de se reproduire et de se pérenniser dans son environnement (Tardieu, 1996).

Selon Henkel (1961), "les plantes résistantes à la sécheresse sont celles qui présentent une aptitude à s'adapter à des conditions de sécheresse au cours de l'ontogenèse, et à croître, à se développer et à se reproduire normalement dans de telles conditions, grâce à de nombreuses propriétés intrinsèques acquises au cours du processus d'évolution sous l'influence des conditions existantes." De même, pour Turner (1979), "l'adaptation est la capacité de la plante à croître et donner des rendements satisfaisants dans des zones sujettes à des déficits hydriques périodiques".

D'un point de vue écologique, Levitt et al. (1960) considèrent l'adaptation d'une plante à la sécheresse comme une "capacité de survie durant des périodes de faible fourniture en eau".

Kramer (1980) définit la résistance à la sécheresse comme l'adaptation d'une modification héréditaire de structures ou fonctions, qui augmente la probabilité de l'organisme à survivre et se reproduire dans un environnement particulier.

## **5. Les mécanismes de résistance des plantes à la sécheresse : les adaptations**

---

Afin de lutter contre le risque de dessèchement, les plantes ont recours à des comportements qui leur permettent de survivre à des situations de déficit hydrique par des méthodes d'adaptation (Robelin, 1983 ; De Raissac, 1992) en préservant l'intégrité de leurs fonctions physiologiques et en leur assurant un état productif et de survie. Les principales méthodes d'adaptation des plantes à la sécheresse ont été présentées par Robelin (1983) et De Raissac (1992) :

- l'esquive ou évitement : dans ce cas, la plante agit sur la durée de son cycle végétatif pour échapper à la contrainte hydrique en réalisant son cycle végétatif en dehors de la période de sécheresse (Robelin, 1983 ; De Raissac, 1992 ; Winkel et Do, 1992) ;
- le maintien : les plantes adaptées aux conditions de sécheresse ont la faculté de maintenir un état hydrique interne satisfaisant en présence d'une contrainte hydrique

(Robelin, 1983 ; De Raissac, 1992) ;

- la tolérance : dans ce cas, le potentiel hydrique est réduit, mais malgré cela, la plante assure ses fonctions physiologiques.

Cette tolérance peut se faire par une adaptation morphologique à long terme par un renforcement du système racinaire en profondeur et en densité (Birand, 1961 ; Zohary, 1961 ; Vartanian, 1973 ; Vieira Da Silva, 1967, 1973 ; Daunay, 1985. Elle peut aussi se faire par réduction du LAI par chute et/ou réduction de la surface de chaque feuille (Oppenheimer, 1961 ; Zohary, 1961 ; Tardieu et al. 1995)), ou à court terme (enroulement ou orientation des limbes qui captent moins de rayonnement, donc diminution du risque de réchauffement sur maïs (de Parcevaux et Perrier ; 1973, Robelin, 1983) et sur haricot (Parsons et Howe, 1984 ; Wen-Yuan Kao et al. 1994).

## **6. Caractérisation de l'état hydrique d'une plante : mesures et indices**

---

Selon Katerji et Itier (1985) et Berger (1985), l'état hydrique d'une plante permet de caractériser son niveau de stress. Il peut être défini selon plusieurs méthodes. Parmi les plus importantes, nous retiendrons :

### **6.1. La teneur en eau de la plante**

La détermination de la quantité d'eau contenue à un instant donné dans les organes vivants de la plante par rapport au maximum possible peut s'exprimer en turgescence relative (TR) ou "relative turgidity", en déficit de saturation hydrique (DSH) ou "relative saturation deficit" et en teneur en eau relative (ER) ou "relative water content" (RWC), la dernière définition étant la plus utilisée. Elle représente le rapport de la quantité d'eau d'une plante à un moment donné du stress ( $E_s$ ) à la quantité d'eau du même échantillon en état de turgescence maximale ( $E_t$ ).

$$ER = E_s/E_t * 100$$

Cet indice est largement utilisé dans la littérature. Appliqué aux feuilles seulement, il est nommé teneur en eau relative des feuilles (TERF), défini selon l'expression suivante (Turner, 1981) :

$$TERF = [(F_w - D_w)/(T_w - D_w)] * 100$$

- TERF (RWC) : teneur en eau relative des feuilles (%)
- $F_w$ : poids frais de la feuille (g)
- $D_w$ : poids sec de la feuille (g)
- $T_w$ : poids à l'état de turgescence de la feuille (g)

Selon Parsons et Howe (1984) lorsque le genre *Phaseolus acutifolius* perd 30% de l'eau des feuilles par rapport à un témoin non stressé, son potentiel foliaire augmente de 4 à 12

bars et son potentiel osmotique de 8 à 15 bars, par contre son potentiel de turgescence baisse de 8 à 2 bars. Ainsi, Le TERF est positivement corrélé avec le potentiel foliaire et le potentiel osmotique, mais il est négativement corrélé avec le potentiel de turgescence.

Les résultats obtenus par Lecoœur et al. (1992) révèlent une très grande facilité d'adaptation du pois chiche par le maintien d'un taux d'eau relatif des feuilles (TERF) élevé (plante iso hydrique). Cette adaptation peut se maintenir jusqu'à 40 à 50 jours. Au-delà de cette période le TERF diminue rapidement.

## 6.2. Le potentiel de l'eau dans la plante

La différence de sensibilité au stress hydrique entre les deux composantes nombre de gousses ( $N_G$ ) et nombre de graines par gousse est confirmée par les figures 5a et 6b puisque pour un même déficit de son osmomètre ( $\Delta\pi/\pi_{\text{max}}$ ) la production relative des gousses ( $N_G/N_G(\text{pot})$ ) varie de 0,50 à 0,90, soit une différence maximale pour les trois années de 0,40, alors que pour  $N_G/N_G(\text{pot})$ , cette différence n'est que de 0,20.

$$\psi = P_o + p_t + P_m$$

ou :

- $P_o$  est le potentiel osmotique dû à la présence de solutés dans la cellule, essentiellement dans les vacuoles ;
- $p_t$  est le potentiel hydrostatique ou potentiel de turgescence développé par la cellule en réponse au potentiel osmotique et à la déformation élastique des parois cellulaires ;
- $P_m$  est le potentiel matriciel dû aux forces d'imbibition des colloïdes et aux forces capillaires dans les parois cellulaires.

Le potentiel hydrique d'une plante est mesuré à l'aide d'une chambre à pression ou bombe de Scholander.

## 6.3. La résistance stomatique

L'état de l'eau peut être défini par ses effets. En particulier, le stress peut être caractérisé par les échanges gazeux du limbe puisque le flux d'admission de  $\text{CO}_2$  et de perte d'eau sous forme de vapeur au niveau d'un limbe dépend du degré d'ouverture des stomates. Selon Berger (1973, 1985), les résultats obtenus par cette méthode, dite méthode pométrique, doivent être interprétés avec précaution car le stress hydrique n'est pas le seul facteur de l'environnement qui influence l'ouverture ou la fermeture des stomates. L'intensité de la lumière, l'âge de la feuille, la face observée de la feuille (densité stomatique différente) influencent l'ouverture stomatique, donc la mesure réalisée. La même hypothèse est posée par Fischer (1973) concernant l'âge des stomates, puisqu'il obtient une plus grande sensibilité au stress hydrique des feuilles âgées que des feuilles jeunes d'une culture de blé. Il en conclut que la régulation stomatique des jeunes feuilles

est plus efficace que celle des feuilles plus âgées. Slatyer (1973) obtient pour la même culture des résultats apparemment opposés, puisqu'il montre des effets nuisibles du stress hydrique importants chez les tissus et les organes qui sont en phase de croissance et de développement rapide. Ces apparentes contradictions sont probablement la conséquence d'observations dans des situations différentes (par exemple, feuilles en croissance (sensibles), feuilles jeunes (actives), feuilles âgées (moins réactives)) ou sous des niveaux de stress différents (réaction possible, puis stress bloquant la division des cellules ou les détruisant).

Sur vigne (*Vitis vinifera* L.), Patakas et al. (1997) constatent une diminution de l'osmorégulation chez les feuilles âgées par rapport aux jeunes feuilles.

Ces méthodes sont couramment utilisées pour caractériser l'état hydrique de la plante, qui sera relié aux effets observés sur le comportement global de la plante. Ce procédé est actuellement utilisé dans la sélection des plantes résistantes à la sécheresse.

#### **6.4. Facteurs du milieu : sol ou atmosphère**

Certains facteurs du milieu peuvent être utilisés comme indicateurs de l'état de déficit hydrique du milieu dans lequel se trouve la plante.

##### **6.4.1. Sol**

L'humidité du sol ( $\theta$ ) et son potentiel hydrique ( $\psi$ ) peuvent indiquer, avec une précision relative, respectivement l'eau stockée dans le sol et son énergie de liaison. grandeur qui sont liées par la relation  $\theta(\psi)$  ou courbe  $\psi(\theta)$  qui caractérisent chaque type de sol et son niveau de dessèchement ou tarissement.

- l'humidité pondérale d'un échantillon de sol exprime la quantité d'eau retenue par cet échantillon par rapport au poids du sol sec de ce même échantillon (tonne d'eau par tonne de sol à l'état sec).
- l'humidité volumique d'un échantillon de sol exprime la quantité d'eau retenue par le volume en place de ce même échantillon ( $m^3$  d'eau par  $m^3$  de sol en place).
- le niveau de tarissement en eau d'un sol à un moment donné représente la quantité d'eau perdue par ce sol par rapport à sa réserve utile (RU).
- le potentiel hydrique de base de la plante, c'est-à-dire celui mesuré avant le lever du jour au moment où l'eau de la plante s'est rééquilibrée avec celle du sol donne une idée de la teneur en eau du sol, donc de la contrainte minimale subie par la plante.

##### **6.4.2. Transpiration, température**

- la transpiration de la plante, caractérisée à partir de l'ETR, et comparée à la demande maximale en eau (ETM) donne une expression de la disponibilité de l'eau et de la contrainte hydrique (ETR/ETM) (Katerji et Itier, 1985). Elle n'est pas mesurable directement de façon simple, sauf par pesée (lysimètres). L'analyse des profils de

températures (sèche et humide), d'humidité, de vent ou de concentration en CO<sub>2</sub> a justifié de nombreux travaux, mais la mesure reste lourde.

- la différence entre température du couvert végétal et température de l'air dépend de l'évapotranspiration du couvert, ce qui a donné lieu à la mise au point de méthodes d'estimation appuyées sur cette différence, soit en utilisant la température seule (SDD), soit pour être plus précis, le déficit de saturation de l'air (CWSI) (Guérif et al. non daté). Cette méthode est adaptée à la télédétection pour estimer des niveaux de stress de couverts sur des images satellitaires. Elle permet aussi de déterminer la sensibilité des différentes espèces cultivées dans un même environnement, mais nécessite la calibration préalable de la relation entre la somme de degrés jours du couvert et la transpiration en fonction du type de sol (Cruiziat, 1995).

### 6.5. Indice de réponse à la sécheresse (IRS)

L'indice de réponse à la sécheresse, défini par Fischer et Maurer (1978), a été largement utilisé par Senthong et Pandey (1989), Foster et al. (1995), Sepaskhah et Liampour (1996). Il permet de comparer la résistance à la sécheresse de génotypes placés dans des situations comparables. Il correspond à la chute relative de rendement du stressé par rapport au témoin :

$$IRS = 1 - (Rs/Rns)$$

- Rs: rendement moyen du génotype stressé.
- Rns: rendement moyen du génotype non stressé.

En résumé, comme tout être vivant, la plante a besoin d'eau pour se maintenir en vie et accomplir son activité physiologique normale. L'eau utilisée provient essentiellement de l'eau puisée dans le sol ou le substrat. Mais, en cas de manque d'eau dans le sol, la plante peut aussi puiser une partie de l'eau dont elle a besoin des réserves stockées dans ses propres tissus.

Si la situation de manque persiste, la plante met en branle tout un système de régulation de ses échanges avec l'atmosphère, c'est ce que l'on appelle communément la régulation stomatique ou ajustement instantané. Cette situation provoque un état de stress chez la plante, qui peut être mesuré ou estimé selon plusieurs procédés :

- par des mesures effectuées sur la plante elle même, particulièrement par la quantité d'eau perdue par la plante, par la force avec laquelle l'eau est retenue par les tissus de la plante, par l'intensité des échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau) et par la mesure de la température de surface du feuillage qui augmente lorsque les échanges gazeux diminuent.

par la mesure du taux d'humidité du sol ( $\theta$ ) et de la teneur avec laquelle cette eau est retenue par le sol ( $\Psi$ )

les effets répressifs d'un stress sur une plante peuvent s'exprimer par un indice de réponse à la sécheresse (LRS).

## **7. Bases physiologiques de la modification de l'activité de la plante par la sécheresse**

---

Un manque d'eau provoque chez la plante une diminution de la fixation du  $\text{CO}_2$ , suite à la régulation stomatique. Cette dernière est commandée par un signal hormonal généré par la synthèse et l'accumulation dans les organes de la plante de l'acide abscissique (ABA) et de la proline.

Cette question des médiateurs chimiques du stress a été l'occasion de multiples travaux, cherchant à analyser les mécanismes de l'information et de l'action de ces deux substances principales, la proline, plutôt invoquée pour les aspects de résistance (à la sécheresse, et aussi au froid) et l'ABA, deux hormones dont nous allons maintenant détailler les rôles connus (Schwartz et al. 1994 ; Jensen et al. 1996 ; Bartels et al. 1996).

### **7.1. Proline**

Plusieurs auteurs signalent l'interdépendance qui existe entre le déficit hydrique et la synthèse de la proline sur haricot (Bender et al. 1991), sur pois chiche (Singh et Rai, 1981) et sur fève (Venekamp et al. 1989).

Kapuya et al. (1985) montrent sur haricot l'existence d'une corrélation positive entre le degré de résistance à la sécheresse d'un cultivar et son aptitude à accumuler des quantités importantes de proline durant la période de stress. Le même auteur conclut à une corrélation négative entre le potentiel du sol et le déficit de saturation en eau des feuilles (DSEF). Les mêmes résultats sont obtenus par Singh et Rai (1981) sur pois chiche.

L'accumulation de la proline est proportionnelle à la durée et à l'intensité du stress. De ce fait, elle est très utilisée pour la sélection des espèces et des variétés les plus résistantes à la sécheresse.

### **7.2. L'acide abscissique (ABA)**

L'ABA est synthétisé par les organes vivants des végétaux sous stress. Contrairement aux autres hormones de croissance, l'ABA est un message chimique de régulation de la croissance. Son signal provoque chez les plantes des transformations physiques et physiologiques qui contribuent directement ou indirectement à une diminution de la production de la matière sèche et à une modification de sa répartition. En plus de ces perturbations de l'activité physiologique de la plante, l'ABA agit directement sur les différents organes des plantes sous stress. Mazliak (1982) a recensé quelques effets selon les stades phénologiques des plantes auxquels s'applique le stress. Chez la

tomate, l'ABA inhibe le processus d'élongation des entre-nœuds. Il se concentre à la base des pétioles de la plupart des végétaux et provoque leur abscission prématurée. Ce même effet peut se produire sur les organes fructifères (cotonnier), provoquant un avortement massif. L'ABA est impliqué dans la dormance des graines et des bourgeons chez les espèces ligneuses, où il provoque un retard dans le débourrement.

Selon Berger (1973), Tardieu (1996), la concentration en ABA est bien corrélée avec la diminution du potentiel hydrique et de la pression de turgescence de la plante, particulièrement pour les stress relativement longs. Selon Davies (1978), le taux d'accumulation d'acide abscissique est proportionnel au nombre de stress subi par la féverole de printemps.

Dans une étude sur l'activité physiologique de la fève, Curvetto et Delmastro (1990) montrent que la fermeture des stomates dépend de  $Ca^{2+}$ , de l'acide abscissique et des deux, sans qu'il y ait synergie entre eux. Schwartz et al. (1994) pensent que le stress hydrique provoque une augmentation de la concentration de l'acide abscissique, qui lui-même provoque la fermeture des stomates. Mais Trejo et Davies (1991) montrent que la fermeture des stomates se produit avant l'accumulation de l'acide abscissique dans les racines. Le même auteur conclut à une plus grande accumulation dans la partie superficielle des racines qu'en profondeur. Selon Vernieri et al. (1994), chez le haricot l'accumulation de l'acide abscissique est identique dans la partie racinaire que dans la partie aérienne. L'ABA semblerait être à l'origine de réactions à long terme plutôt qu'à court terme. Cela est cohérent avec la faible vitesse de déplacement de l'ABA (de l'ordre de 20 mm par heure) (Mazliak, 1982). L'ABA ne peut pas être à l'origine des réactions instantanées de la plante à des stress intenses (quelques minutes), ni en conditions météorologiques fluctuantes. Tardieu (1996) démontre que la diminution du potentiel hydrique des plantes iso hydriques a un effet sur l'accroissement de la sensibilité des stomates à l'ABA, mais pas d'effet sur leur nombre. L'ABA stimule l'absorption de l'eau par les racines. Par ailleurs, le retour à l'état hydrique normal de la plante n'est pas suivi d'un retour à une concentration normale de l'ABA. En effet, selon Mazliak (1982), la concentration de l'ABA augmente de 40 fois après 4 heures de stress, son retour à l'état normal nécessite plusieurs dizaines d'heures. En raison de ses effets reconnus, la sécrétion d'ABA peut être considérée comme critère de sélection des espèces résistantes à la sécheresse.

### 7.3. Autres médiateurs

Les résultats obtenus par Vassey et Sharkey (1989) montrent qu'un stress hydrique de faible intensité provoque une perturbation de la translocation, ce qui conduit à une réduction de la synthèse des sucres et de l'amidon. Walton et al. (1976) montrent que la concentration de l'acide dihydrophaseique (ADP) est le principal agent de sensibilité au stress hydrique des plantes de haricot.

Au niveau des feuilles, une chute momentanée de l'activité nitrate réductase et du taux de protéine peut être observée durant le stress hydrique. Sur le haricot, cette diminution est probablement due à la chute brusque du potentiel foliaire provoquée par une diminution du taux de turgescence des cellules.

Sur pois chiche, Singh et Rai (1982) montrent une plus grande accumulation de protéines et d'azote soluble chez les variétés résistantes. De plus, le phénomène de fixation d'azote est plus accru chez ces mêmes variétés.

## **C. Effets des stress hydriques sur la production des cultures**

### **1. Cas des plantes en zone aride : illustration extrême des adaptations au stress**

---

Selon Oppenheimer (1961) et Migahid (1961), certaines plantes non xérophytes se développent normalement dans les zones arides. Elles ont la faculté de se développer et de se reproduire en un temps record durant les périodes les plus pluvieuses ou les moins sèches de l'année, ceci leur a valu l'appellation de plantes "éphémères". Ce comportement, défini par Robelin (1983) et De Raissac (1992) comme un phénomène d'évitement, les oppose aux xérophytes qui sont adaptées à la vie dans des conditions de sécheresse, en employant diverses stratégies d'économie d'eau (développement de sclérenchyme, fonctionnement à faible teneur en eau des tissus, accumulation de réserves hydriques (plantes succulentes), réduction de l'évaporation à moindre réduction de photosynthèse (Raynal-Roques, 1994), mise en place de stratégies de développement racinaire).

Par exemple, certaines plantes adaptées aux zones arides (plantes éphémères et certaines xérophytes oligohydriques) ont la faculté de développer leur système racinaire en un temps très court au début du cycle végétatif afin de permettre un bon développement de leur système aérien : la vitesse de croissance de ces racines peut atteindre 100 mm par jour (Oppenheimer, 1961). Certaines espèces, telles que *Elagi camelorum* ont un développement racinaire qui peut dépasser une profondeur de 5 m (Birand, 1961 ; Oppenheimer, 1961) . En zone Sahélienne, le mil développe ses racines en profondeur et en volume aux dépens de sa partie aérienne pour lutter contre les effets de la sécheresse (Winkel et Do, 1992). Birand (1961) font la même constatation pour un ensemble de plantes xérophytes.

Certaines espèces ont la faculté d'absorber et de stocker des quantités importantes d'eau au niveau du système racinaire et d'absorber l'humidité par leurs organes aériens (Zohary, 1961). Ces plantes se caractérisent par une plus grande élasticité tissulaire, et se comportent, ainsi comme de vrais réservoirs d'eau.

Certaines plantes produisent une biomasse importante en un temps très court en prévision à la sécheresse de fin de saison, ainsi les assimilats stockés dans les organes de la plante seront simplement transférés dans les organes fructifères au moment de la période de reproduction (Winkel et Do, 1992). Ce qui leur permet une fin de cycle moins contraignante.

## **2. Développement : modifications des durées de stade, sensibilité dépendant des stades**

---

### **2.1. Réduction de la durée du cycle végétatif, interaction avec le climat**

#### **2.1.1. Durée du cycle**

La modulation de la durée du cycle végétatif peut être utilisée comme moyen d'adaptation chez les végétaux supérieurs pour éviter les périodes de sécheresse (Winkel et Do, 1992 ; Tardieu et al. 1995). Selon Derieux (1983), le caractère "cycle court" qui évite les grandes consommations d'eau et les risques de stress de fin de cycle doit être utilisé comme critère d'adaptation à la sécheresse.

En plus du raccourcissement du cycle végétatif, le mil adopte un développement asynchrone des talles par rapport au maître brin. Ainsi, en cas de sécheresse précoce, il y aura toujours une partie des talles qui échappent au stress, par contre dans le cas de stress tardif, le maître brin et les premières talles peuvent toujours produire un minimum de récolte (Winkel et Do, 1992).

Selon la phase d'application du stress, ce dernier peut augmenter ou diminuer la durée du cycle. Sur haricot, le stress hydrique appliqué pendant la phase pré florale prolonge la durée du cycle, appliqué pendant la phase post-florale (élongation des gousses), il la diminue (de Balatier, 1987 ; Pena-Cabriales et Castellanos, 1993 ; Orphanos, 1993, Cheraga et Guentour 1998). Abdalla et Fischbeck (1978) ; Marcellos et Constable (1986) font la même démonstration sur fève. Sur fève et féverole, Abdalla et Fischbeck (1978) démontrent le raccourcissement du cycle par un échauffement de la culture et ses effets néfastes sur les composantes du rendement.

#### **2.1.2. Intensité du stress**

Un stress hydrique intense agit négativement sur le potentiel de production des plantes. Par contre, sur les stress de faible intensité, les résultats ne sont pas unanimes. Selon Orphanos (1993), l'allongement ou le raccourcissement du cycle végétatif n'a aucune répercussion sur le niveau du rendement. Au contraire, Foster et al. (1995) obtiennent des chutes de rendement de 41%, même avec des stress de faible intensité.

Ney et al. (1994) montrent qu'un stress de faible intensité durant la phase post-florale du pois arrête prématurément la floraison, en affectant peu les autres composantes du rendement.

En résumé, contrairement à l'effet du stress intense qui diminue nettement le rendement, le stress de faible intensité a des effets qui varient selon les espèces, son intensité réelle et surtout sa phase d'application. De plus, le raccourcissement du cycle végétatif implique généralement une réduction de la mise à fruits (nombre d'étages fructifères chez le haricot), ce qui se traduit par une diminution du rendement.

### **2.1.3. Interaction de la date de semis avec le climat : choix des techniques culturales**

La date de semis agit directement sur l'évolution et la durée du cycle végétatif, la mise à fleur, le risque de stress par un décalage par rapport à la période pluvieuse pour le haricot (Samper et Wayne Adams, 1985 ; Bouthier et Gaillard, 1994 ; Acosta-Gallegos et White, 1995), pour le pois chiche (Masood et Kuchwaha 1985) ou pour la fève (Abdalla et Fischbeck, 1978 ; Marcellos et Constable, 1986 ; Mouhouche, 1996 ; 1998). L'énergie solaire interceptée par les cultures dépend de la date de semis. Donc il est judicieux de choisir une date de semis qui permette à la plante de bénéficier à la fois des précipitations précoces et d'une somme d'énergie appréciable avant la phase d'initiation florale (Velich et Verro, 1993).

Selon Wery (1986 ; 1990), le semis précoce du pois chiche permet de lutter contre le stress hydrique par un développement racinaire plus profond favorable au moment du risque de stress, sans augmenter systématiquement la consommation des réserves en eau du sol, car la culture évite les périodes de très forte évapotranspiration. Le semis d'hiver améliore encore leurs performances grâce à une compétition moins importante entre la nodulation et la production de gousses, car les nodules ont plus de temps pour se former avant la période de reproduction, ce qui n'est pas le cas pour les semis de printemps, dans lesquels la fonction de fixation est plus pénalisée que la fonction d'assimilation. Néanmoins, les semis précoces sont soumis aux risques de gelée qui peuvent être évités par le choix de variétés résistantes au froid.

### **2.2. Sensibilité dépendant du stade**

Plusieurs auteurs s'accordent pour considérer que l'effet dépressif du stress hydrique sur le rendement en grains et en matière sèche (Husain et al. 1990) est lié à la phase phénologique à laquelle il est appliqué.

### **2.3. Germination et levée : densité de plantes de la culture**

L'importance de la germination, donc de la levée, est capitale, puisqu'elle détermine la composante nombre de plantes par m<sup>2</sup>. L'application d'un stress durant la phase de germination et de post-levée provoque une diminution de la densité de plantes due au dépérissement d'un certain nombre de plantes, qui atteint 35 % dans l'expérimentation de Laupretre et Benoit (1989). Maiti et Mukherji (1982) montrent même des effets encore plus néfastes, puisque la germination du haricot peut chuter de 75 et 90% respectivement pour des potentiels hydriques dans le sol de -5 et -12 bars. Des résultats analogues ont été obtenus sur pois chiche (ICRISAT, 1984).

Les résultats obtenus par Gupta et al. (1993a) confirment l'effet dépressif du stress hydrique qui commence à agir très tôt sur la germination des graines par un blocage des sucres des cotylédons. La production de matière sèche de l'épicotyle et de l'hypocotyle est deux fois plus importante chez les graines germées sans stress que les graines stressées. L'effet de la sécheresse sur la levée peut avoir un effet positif sur la production par plante, à cause de la diminution du nombre de plantes par m<sup>2</sup>, mais elle a un effet

négatif sur le rendement moyen par m<sup>2</sup> (Beech and Leach, 1988).

En conditions de laboratoire, Ladraa (1993) montre que le manque ou l'excès d'humidité du sol au moment du semis provoquent une diminution de la germination, un retard dans la levée et une faible vitesse de croissance des jeunes plants de haricot. Robaï (1998) trouve des résultats analogues sur les graines de quatre légumineuses alimentaires (haricot, pois, pois chiche et fève), tout en soulignant le fait que ces phénomènes sont très fortement influencés par la nature du sol et sa température. Sur blé, Blum (1996) montre les effets néfastes de la déshydratation des graines germées et des plantes levées. Ainsi, une diminution de 50% du taux d'eau des graines germées peut conduire à une perte irréversible de la germination au stade 1 feuille, alors que le même dessèchement passe pratiquement inaperçu au stade radicule 1 cm.

#### **2.4. Initiation florale : effet sur la fertilité des ovaires et l'émission du pollen**

Contrairement à certaines idées reçues, le stress hydrique commence à agir bien avant la période de reproduction c'est-à-dire avant le début de l'initiation florale (15 à 20 j avant le début de la floraison qui est obtenue 25 à 30 jours après le semis en période estivale et 35 à 45 jours en période hivernale (Namuco et O'Toole, 1986).

Selon Yanes-Jimenez et Kohashi-Shibata (1987), chez le haricot, le pourcentage d'ovaires nécrosés varie de 23 à 88%, pour un stress appliqué à 13 à 30 jours après la levée.

L'étude faite par Ying Shen et Webster (1986) montre que le stress hydrique agit sur les organes de reproduction, par avortement et inhibition de la germination des grains de pollen, bien avant la phase de fécondation des ovules. Ce phénomène est encore plus accentué en cas de températures trop élevées ou trop basses (Bouwkamp et Summers, 1982). Selon les mêmes auteurs, l'effet du stress hydrique est d'autant plus néfaste qu'il intervient durant les premières phases de développement de la plante. Ainsi, un stress appliqué à 12 jours après la levée provoque un avortement des grains de pollen de 17% et sa germination de 52%. Au-delà de 20 jours après la levée, le stress n'a pratiquement aucun effet sur les grains de pollen, puisqu'il provoque un avortement de 2% et une baisse de la germination de 86%, alors que le témoin a un avortement de 2% et un taux de germination des grains de pollen de 88%.

Un stress appliqué durant la période pré florale provoque une diminution de la fertilité des panicules de riz, suite à une malformation chromosomique des grains de pollen. Cette diminution varie de 20 à 50%, respectivement pour un potentiel foliaire de - 11 et - 19 bars (Namuco et O'Toole, 1986).

#### **2.5. Phase préfloraison et floraison**

Chez le pois, une restriction hydrique durant la période de floraison provoque une chute des organes fructifères et limite le nombre d'étages fructifères (Deumier, 1987 ; 1988 ; Deumier et al. 1990 ; 1991 ; Turc et al. 1995).

L'étalement de la période de reproduction rend difficile la détermination de la phase phénologique la plus sensible au stress hydrique. Afin d'éliminer cette contrainte,

Mouhouche (1994a et b) propose une méthode qui consiste à marquer chaque organe fructifère au début ou à la fin du stress (stress pré ou post-phase) afin de différencier la phase phénologique précise à laquelle celle-ci a été stressée. Cette méthode a permis de montrer la grande sensibilité de la phase florale et immédiatement post-florale.

Chez le haricot, les phases immédiatement pré et post-florales sont les plus sensibles au stress hydrique (Floor Drees, 1984; Jorge Jara et Izquierdo, 1988). Néanmoins, le mécanisme qui régit la résistance à la sécheresse semble être identique pour toutes les phases phénologiques du haricot, mais avec des intensités différentes (Guimaraes et al. 1993). A cet effet, Bruce et Tomas (1985) spécifient que l'effet du stress hydrique est d'autant plus important que le flux d'évapotranspiration est plus intense. Petersen (1985) montre aussi que le stade végétatif est moins sensible que les stades de floraison et de développement des gousses.

Sur fève, lorsque le stress hydrique est appliqué durant les phases floraison nouaison, il agit plus sur le taux d'avortement des organes fructifères. Lorsqu'il est appliqué durant la phase post-élongation (remplissage) des gousses, il provoque une diminution sensible du poids moyen de la graine (Mouhouche, 1998). La grande sensibilité des phases fleur épanouie-nouaison de la culture de fève est confirmée par Plies-Balzer et al. (1995).

Chez le pois, le stress hydrique terminal représente le facteur le plus important de réduction du rendement. Il agit plus sur le poids moyen de la graine que sur le nombre de gousses (Martin et al. 1994).

## **2.6. Phase post-florale, reprise après stress**

Chez la fève, Pilbeam et al. (1990) ; Guérin et al. (1991) montrent la phase post-florale comme la plus sensible au stress hydrique. La chute du rendement est due à une diminution de l'activité fixatrice, suite à une mauvaise oxygénation des nodules (Guérin et al. 1991).

Un apport d'eau durant la phase de remplissage des gousses permet une amélioration sensible du poids moyen de la graine sur pois chiche (Rajagopal et Andersen, 1980), en dépit d'un taux d'avortement élevé sur la tige principale. Ceci est dû à une amélioration du poids des graines issues de tiges latérales ayant échappé au stress (Singh et al. 1987a).

Le stress hydrique a moins d'effet lorsqu'il est appliqué durant la période d'élongation et de remplissage des gousses que durant la période florale du haricot (De Magalhaes et al. 1979 ; Sangakkara, 1994). Sur pois, Bouthier, (1992a) et Bouthier et Gaillard (1994) obtiennent les mêmes résultats.

Hukkeri et Sharma (1980) montrent que le taux de tarissement en eau du sol ne doit pas dépasser 40% de la réserve utile durant la période florale et post-florale afin d'éviter tout risque de stress sur une culture de pois.

En résumé, le stress hydrique agit sur le déroulement des stades de la plante en fonction de son intensité, de sa phase phénologique d'application. Les plantes adoptent donc des comportements différents selon les conditions de stress (phase, intensité) :

- allongement ou réduction de la durée du cycle selon que le stress se situe avant ou après floraison;
- modification des équilibres entre parties de la plante : développement en profondeur et en densité des racines, maître brin par rapport aux talles, partie reproductrice par rapport à partie végétative.

Pour éviter les effets néfastes du stress, l'agriculteur possède quelques moyens d'action, tels que :

- le choix de la date de semis : la mise en place de la culture peut être avancée ou reculée de telle sorte que la phase la plus sensible ne coïncide pas avec les moments où le stress risque d'être le plus fort. Le plus souvent, cela revient à avancer le cycle pour que la culture soit terminée avant les périodes les plus chaudes et les plus sèches;
- le choix de la densité de semis pour compenser les risques liés au manque de germination et de levée qui pénaliseraient la densité de plantes levées, qui est un des facteurs d'une bonne mise en place de la culture. Il peut aussi diminuer la densité pour diminuer l'effet de la concurrence entre plantes sur les ressources en rayonnement ou sur les réserves hydriques du sol.

Enfin, il faut savoir que le stress peut agir très tôt sur le processus de mise en place de la charge fructifère au moment de l'initiation florale et sur la maturation et l'avortement des organes reproducteurs des plantes (pollen et ovules).

### **3. Croissance : production de matière sèche, organes de production, organes de stockage**

---

Wery et Turc (1990) indiquent que la contrainte hydrique représente le facteur environnemental le plus limitant pour l'obtention de bons rendements chez les légumineuses, même dans les zones relativement pluvieuses telles que le Nord de la France. Pena Vadivia (1985) fait la même constatation.

Selon Cruiziat (1974) et Petersen (1985), le stress hydrique agit négativement sur toutes les composantes qui conditionnent le développement et la croissance de la plante de haricot (le poids, le nombre et la surface des feuilles par plante, le taux de croissance de la tige). Sur pois chiche, le stress hydrique agit négativement sur toutes les variables observées pour caractériser le comportement de la plante : poids frais, poids sec, longueur et poids des racines et des tiges de la plante (Singh et Rai, 1980). La production exprimée en poids de gousses, de tiges, de racines et de feuilles est inversement proportionnelle à l'intensité du stress subi par la plante durant la période de reproduction (Penuelas et al. 1993, sur haricot et poivron ; Sangakkara, 1994, sur haricot). Le stress hydrique a pour conséquence une diminution du flux d'assimilats entre les différents organes de la plante, particulièrement entre les feuilles et les organes fructifères, en raison du manque d'eau, donc de sève, pour la circulation des assimilats (Rode, 1985). Ce sont ces effets de flux d'assimilats que nous étudierons dans un premier paragraphe.

Dans les suivants, nous décrirons les adaptations des systèmes foliaire et racinaire, puis les effets des restrictions sur la production finale (gousses et grains).

### **3.1. Mécanismes : altération du métabolisme et des transferts d'assimilats**

Selon Jensen et al. (1996) et Bartels et al. (1996), le déficit hydrique provoque une déshydratation des cellules qui altère le métabolisme cellulaire. C'est l'altération du métabolisme qui fait du déficit hydrique un facteur environnemental aussi important. Blum (1996) montre que le stress hydrique agit négativement sur la synthèse des assimilats et/ou sur leur transfert.

Un stress hydrique appliqué durant les phases pré florales et florales provoque une diminution de la longueur de la tige, de la croissance des feuilles en poids et retarde la mise à fleur du haricot, en contrepartie, il provoque une augmentation du taux de chlorophylle des feuilles (Tabbada et Flores, 1982; Penuelas et al. 1993).

Vassey et Sharkey (1989) montrent qu'un stress hydrique de faible intensité provoque une perturbation de la translocation, ce qui induit une réduction de la synthèse des sucres et de l'amidon, probablement par un mécanisme d'engorgement. Sur haricot toujours, un stress hydrique intense et court provoque une diminution de l'activité photosynthétique par un abaissement de l'assimilation du CO<sub>2</sub> (Pena Vadivia, 1985 ; Vassey et Sharkey, 1989), mais le phénomène de translocation reste pratiquement inchangé, ceci est probablement dû aux réserves en eau et aux nutriments qui se trouvent dans les feuilles (Hoddinott et al. 1979; Winkel et Do, 1992). L'importance de ce phénomène est très variable entre les espèces, et même entre les variétés d'une même espèce (Castonguay et Markhart, 1991 ; 1992 ; Castrillo et Trujillo, 1994) pour le haricot. Ceci est probablement dû à la faculté de certaines espèces ou variétés à maintenir mieux que d'autres les cellules en état de turgescence sous l'effet d'un stress de courte durée ou d'intensité réduite. Robelin (1983) et De Raissac (1992) considèrent ce comportement comme une forme de tolérance à la sécheresse, qui fait partie des phénomènes de maintien. Selon O'Toole et al. (1977) et Cornic et al. (1987), chez le haricot aussi, un stress intense agit rapidement sur la fermeture des stomates, tandis qu'un stress léger et plus long agit en plus sur l'activité du mésophile.

### **3.2. Appareil de production**

#### **3.2.1. Appareil foliaire**

##### **3.2.1.1. Surface et nombre de feuilles, indice foliaire**

L'indice foliaire (IF), qui est en fait le rapport de la surface de feuilles à la surface de sol occupée par la plante, est un indice de surface foliaire, le LAI anglo-saxon,. C'est la résultante du produit surface par plante\*densité de plantes. C'est une variable agronomique plus pertinente que la surface foliaire par plante, puisqu'elle conditionne directement la production de la culture (surface de production de la culture). Cela justifie de traiter en même temps indice foliaire et surface foliaire.

En condition de déficit hydrique, le pois s'adapte en réduisant la taille des feuilles, des entre-nœuds et des nœuds fructifères, en concentrant la production sur les premiers entre-nœuds reproducteurs et souvent en raccourcissant son cycle végétatif. Cette adaptation n'est pas toujours accompagnée par une diminution du nombre de graines, sauf en cas de stress hydrique précoce, qui pénalise fortement le nombre et la surface des feuilles (Turc et al. 1995).

Sur fève, Karamanos (1978) constate que l'IF n'est pas affecté par un stress appliqué juste avant la floraison et que l'effet de la durée du stress est cumulatif, par comparaison à un stress court et ponctuel. Un stress précoce et long agit sur la sénescence des feuilles. De plus, le stress hydrique agit beaucoup plus sur la surface que sur le nombre de feuilles par plante (Karamanos, 1986, Karamanos et al. 1982). Après 45 jours à un potentiel hydrique de - 5 bars le LAI a diminué de 50% par rapport au témoin non stressé.

Selon les variétés et la période de culture du haricot, la période de plus grande sensibilité pour la production de feuilles en nombre ou en poids correspond à la période de 40 à 60 jours après le semis (Penuelas et al. 1993). Les mêmes auteurs montrent que la masse spécifique des feuilles ( $\text{g/m}^2$ ) et la surface foliaire ( $\text{cm}^2$  par plante) sont négativement corrélées avec l'intensité du stress. Les mêmes résultats sont obtenus par Petersen (1985) sur *Phaseolus vulgaris* et *Phaseolus acutifolius*, néanmoins, cette dernière semble être moins sensible que la première.

Acosta Gallegos et Shibata (1989) montrent que l'indice foliaire du haricot est plus affecté lorsque le stress est appliqué durant la période de plus grande activité physiologique qui correspond à la période de reproduction active que durant les périodes qui précèdent et qui suivent (développement végétatif, d'une part, et fin de grossissement des graines et maturation, d'autre part).

La densité spécifique de la feuille (DSF) du haricot est plus élevée pour les variétés résistantes à la sécheresse, leur indice foliaire est moins sensible au stress (Guimaraes et al. 1993). Selon Velich et Verro (1993), même si la production de matière sèche du haricot est moins sensible que la composante nombre de gousses par plante, elle est positivement corrélée avec celle-ci.

De même, White et al. (1990) montrent que la production de biomasse et l'indice foliaire sont très sensibles au stress hydrique chez le haricot. Ces résultats sont confirmés par Wery et Turc (1990) pour l'ensemble des légumineuses. Selon les mêmes auteurs, la matière sèche est plus affectée par la diminution de la surface des feuilles que de leur nombre ou du nombre d'entre-nœuds.

Le phénomène de sénescence prématurée des feuilles représente une forme d'adaptation au stress hydrique puisqu'il permet à la plante de réduire sa surface transpirante par une diminution de sa surface foliaire (Cruiziat, 1995).

Hiroshi (non daté) note que la suppression d'un certain nombre de feuilles des plantes stressées permet de diminuer le taux de dessèchement apical, ce qui permet un meilleur développement des plantes en hauteur, donc plus de chances d'avoir plus d'étages fructifères.

Le stress hydrique agit sur le LAI plus par une diminution de la taille des feuilles que

par une réduction de leur nombre. Néanmoins, chez certaines espèces le nombre de feuilles peut diminuer à cause de la sénescence prématurée des feuilles. En effet, la chute des feuilles peut être un moyen d'adaptation par les plantes en diminuant le nombre de feuilles, donc la surface transpirante. Ces réductions d'indice foliaire agissent sur la production de biomasse et, par-là, indirectement sur la production de gousses et graines.

### **3.2.1.2. Stomates**

Certaines variétés d'aubergine résistantes au stress hydrique se caractérisent par une bonne corrélation entre la densité stomatique et le poids de matière sèche racinaire (Daunay, 1985). Ces deux critères sont souvent recherchés chez les plantes pour la résistance à la sécheresse. Néanmoins, Younis et al. (1993) montrent que les conditions de stress provoquent une diminution du nombre de stomates par unité de surface du limbe, en contrepartie, l'intensité chlorophyllienne est accrue.

En étudiant l'effet indirect de la sécheresse chez le maïs (*Zea mays* L), Slavik, (1973) constate une augmentation en nombre, mais pas en surface des stomates en condition de faible humidité relative de l'air. Néanmoins, pour la même espèce, Barrs (1973) montre que l'ouverture des stomates dépend plus du potentiel foliaire que de l'humidité relative de l'air, et que cette dernière agit indirectement sur le potentiel foliaire.

En condition de stress hydrique (excès ou manque), la fermeture des stomates est souvent accompagnée par une diminution du nombre de stomate par unité de surface de la feuille (Younis et al. 1993). Cette dernière prend une couleur plus foncée en condition de manque d'eau que d'excès (Rengasamy et Reid, 1993 ; Younis et al. 1993). Ceci montre que les végétaux s'adaptent mieux au manque qu'à l'excès d'eau.

En conditions hydriques normales, l'intensité des échanges gazeux d'une plante dépend du nombre et de la surface des stomates. En conditions de sécheresse, la plante semble privilégier l'augmentation de l'intensité chlorophyllienne et le nombre de stomates par rapport à leur surface. Ceci contribue à maintenir une activité physiologique relativement intense malgré la diminution de la surface des stomates.

### **3.2.2. Appareil racinaire**

Selon Cruziat (1974), chez la plupart des végétaux, le développement racinaire est plus sensible au stress hydrique que la partie aérienne. White et Castillo (1989) obtiennent des résultats analogues sur haricot. Pour le pois chiche, Singh et Rai (1980) arrivent à une conclusion inverse, puisque leurs résultats montrent que le stress hydrique agit beaucoup plus négativement sur les tiges que sur les racines. De ce fait, il considère que le système racinaire d'une plante peut informer sur son degré de résistance à la sécheresse.

Chez la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.), Vartanian (1973) constate un comportement xérophyte par un plus grand développement du pivot racinaire aux dépens des racines latérales, une augmentation de la densité stomatique et de la nervation foliaire, ainsi qu'une augmentation des vaisseaux du pétiole. Monneveux et Belhassen (1996) montrent que la profondeur racinaire n'est pas le seul critère d'adaptation à la sécheresse, car la densité racinaire peut être aussi importante, même si elle est

superficielle (comme c'est le cas de certaines plantes grasses qui peuvent absorber la moindre quantité d'eau à la surface du sol en zone peu pluvieuse).

En situation de stress hydrique, les *Phaseolus* développent leurs racines en profondeur. Selon White et Castillo (1992), le niveau de production du haricot dépend avant tout du type de racines et de leur profondeur. Selon les mêmes auteurs, en plus du phénomène de maintien, ces espèces adoptent un développement racinaire différent selon l'état hydrique du sol. Ainsi, Guimaraes (1986) constate que les variétés résistantes ont une densité racinaire faible dans l'horizon de surface (0 à 20 cm), et plus élevée dans les couches plus profondes du sol (20 à 60 cm). Dans les sols profonds, les *Phaseolus* ont une grande faculté d'adaptation au stress hydrique, puisqu'ils peuvent développer un enracinement supérieur à 200 cm et puiser 20 à 50% d'eau en dessous de 1 m (Juan Tosso, 1988).

Sur pois, Rajagopal et Andersen (1980) montrent que la densité racinaire dépend de l'intensité et de la durée du stress. Sur féverole, El-Shazli et Warboys (1989) montrent que le stress hydrique agit négativement sur le poids et la longueur des tiges, sur toutes les composantes du rendement, et à un degré moindre sur le poids et la longueur des racines. Le genre *Vicia* développe ses racines aux dépens de sa partie aérienne. Le stress réduit beaucoup plus la densité racinaire des couches profondes du sol que celle des couches superficielles, à l'opposé de ce que dit Guimaraes sur haricot. En conditions hydriques normales, le genre *Vicia* a plus de 80% de son système racinaire dans les 25 premiers centimètres (Rengasamy et Reid, 1993). Reid (1990) affirme que le genre *Vicia* lutte contre le stress en développant son système racinaire profond, ce qui permet un meilleur puisage de l'eau des couches de sol profondes par les racines. Blum (1996) obtient les mêmes résultats sur blé et Penuelas et al. (1993) sur haricot. Malgré leurs résultats apparemment opposés, El-Shazli et Warboys (1989) considèrent aussi la densité racinaire ( $\text{cm par cm}^2$ ) comme un bon indicateur de résistance à la sécheresse. En effet, comme le stress hydrique réduit généralement le système racinaire, les comparaisons entre variétés portent plutôt sur les moindres réductions en cas de stress. En particulier, tous les auteurs s'accordent pour attacher de meilleures capacités de résistance à la sécheresse aux variétés qui développent le mieux leurs systèmes racinaires profonds, en cas de stress. En résumé, ces apparentes contradictions sur les effets du stress hydrique sur l'enracinement peuvent être liées à la grandeur mesurée (densité ou profondeur, valeurs relatives ou absolues), mais aussi aux conditions d'application du stress (relatives à la plante : croissance active des racines ou non, relatives à l'installation du stress : intensité du stress, répartition de l'eau présente dans le profil), facteurs qui conditionnent la réaction de la plante.

### **3.3. Appareil reproducteur**

#### **3.3.1. Composantes du rendement**

Le rendement peut être décomposé de plusieurs façons :

## Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines

| Poids de graines par plante |                              | Poids des graines par unité de surface |  |
|-----------------------------|------------------------------|--|--|
| poids moyen de la graine    | nombre de graines par plante |  | nombre de gousses par unité de surface |
| poids moyen de la graine    | nombre de graines par gousse | nombre de gousses par plante           | Poids des graines par gousse           |

Pour le pois, Deumier, (1988) estime que le rendement se décide sur la base du nombre de graines par m<sup>2</sup> et par le poids moyen de la graine. Autant que possible, nous utiliserons l'approche la plus complète (dernière ligne du tableau), même si tous les travaux ne distinguent pas toutes les composantes.

### 3.3.1.1 .Nombre d'organes

Nombre de gousses et nombre de graines par plante ne sont pas indépendantes, puisque l'un est une composante de l'autre et que toute chute de gousse est aussi une chute de grains. L'avortement est le phénomène qui conditionne le nombre de gousses par plante.

D'une façon générale, les légumineuses luttent contre le stress en diminuant le nombre de graines par plante (Ney et al. 1994), soit par une diminution de la fertilité des gousses, soit par l'avortement des gousses elles-mêmes (planche 1), ce qui justifie d'étudier successivement nombre de gousses par plante (et taux d'avortement dont il résulte), puis nombre de graines par gousse.

#### Nombre de gousses par plante et taux d'avortement

Parmi les composantes du rendement exprimées en nombre, le nombre de gousses par plante (NGo/Pt) ou par m<sup>2</sup> est plus sensible au stress hydrique que le nombre de graines par gousse (NGr/Go) sur haricot (Fiegenbaum et al. 1991 ; Acosta Gallegos et Shibata, 1989 ; De Balatier, 1987), sur pois chiche (Singh et al. 1987a), sur soja (Leterme et Merrien, 1991) et sur pois (Ney et al. 1993).

Le taux d'avortement le plus élevé est enregistré pour un stress appliqué pendant les phases florales et post-florales (Guérin et al. 1991 ; Husain et al. 1990 ; Mouhouche, 1994a). Par l'application d'un stress à deux phases phénologiques différentes (15 et 42 jours après le semis), Floor Drees (1984) précise que le nombre de gousses par plante est plus sensible au stress précoce qu'au stress tardif (après nouaison), car ce sont les organes fructifères pré et post-floraux (boutons, fleurs et gousses nouées) qui tombent le plus. L'avortement est bien corrélé avec l'intensité du stress (Floor Drees, 1984). Selon Ney et al. (1993), il se situe dans la période qui suit immédiatement la floraison (avant 300 °C jours à compter du début de la floraison de chaque nœud pour le pois), ce qui signifie que les nombres d'organes sont définitivement fixés à cette date. La probabilité d'avortement d'un organe fructifère diminue avec le développement de la gousse, elle varie de 0.7 à la phase florale et pré florale à 0.1 à la phase de fin remplissage des gousses (Mouhouche, 1998a). La chute des organes fructifères provoquée par l'abscission des fleurs et des gousses en phase d'élongation est accentuée par l'effet combiné d'un stress hydrique et thermique (Bouwkamp et Summers, 1982 ; Bachchhav et

al. 1993).

### **Nombre de graines par gousse**

La composante nombre de graines par gousse (NGr/Go) du haricot est insensible au stress modéré (- 5 à -7 bars) (Jorge Jara, 1990 ; De Magalhaes et al. 1979 ; De Balatier, 1987; Laurent, 1992 ; Mouhouche et al. 1998a). Les mêmes résultats sont obtenus par Singh et al. (1987a) sur pois chiche, par Deumier (1987) sur pois et par Leterme et Merrien (1991) sur soja.

En résumé, appliqué au début de la floraison, le stress hydrique provoque une diminution du nombre de gousses par plante, qui correspond à un taux d'avortement élevé des organes fructifères pendant les phases bouton et fleur épanouie sur haricot (Mouhouche, 1994a ; Tabada et Flores, 1982 ; Petersen, 1985), sur pois chiche (Singh et al. 1987a), sur fève (Plies-Balzer et al. 1995). Appliqué un peu plus tard, pendant la période qui s'étale de la pleine floraison à la fin de celle-ci, le stress hydrique provoque une diminution du nombre de graines par gousse et une légère diminution du poids moyen de la graine chez le haricot (Laurent, 1992) et chez le pois (Bouthier et Gaillard, 1994). Ces expérimentations démontrent que les nombres de gousses sont déterminés d'abord, les nombres de graines par gousse sont fixés plus tard.

### **3.3.1.2. Poids d'organes, remplissage**

#### **Poids moyen de la graine (PMGr)**

Le poids moyen de la graine se décide durant la phase de remplissage et de début maturation (Ney et al. 1994). Ainsi, toute restriction hydrique ou minérale durant cette période se répercute négativement sur le poids moyen de la graine sur haricot (Laupretre et Benoit, 1989), sur pois (Deumier, 1987 ; Bouthier, 1992a; Bouthier et Gaillard, 1994) et sur soja (Leterme et Merrien, 1991). Selon Cheraga et Guentour (1998), la phase de plus grande sensibilité du poids moyen de la graine se situe après la fin de la phase d'élongation des gousses et dure entre 10 et 16 jours.

#### **Poids de graines par unité de surface ou par plante**

Deumier (1987), travaillant sur pois, affirme la grande sensibilité de la phase floraison pour la composante (multiple) poids de graines par m<sup>2</sup>. Ces résultats montrent l'existence de sensibilités à plusieurs stades, même si la phase florale est toujours la plus sensible.

La production de grains, exprimée en poids de grains par plante (PGr/Pt) est la résultante du produit du poids moyen de la graine et du nombre de graines par plante. Si les deux composantes sont déprimées, le produit l'est encore plus, comme le montrent De Magalhaes et Agustin (1978) et Pena-Cabriaes et Castellanos (1993) sur haricot, Badji et al. (1982) sur féverole. Par exemple, chez le haricot, De Magalhaes et al. (1979) obtiennent une chute de rendement de 37 (poids de graines par plante), combinaison d'une réduction de 30% du nombre de gousses par plante et de 16% du nombre de graines par gousses. Il peut exister aussi des effets de compensation entre composantes (cf. paragraphe compensation).

#### **Poids de graines par gousse, poids de gousse**

Il s'agit de variables intermédiaires, qui sont plus ou moins influencées par leurs propres composantes et ne peuvent être à elles seules outil de diagnostic.

### **3.3.1.3. Classement entre composantes**

Mouhouche (1994b) montre que, chez le haricot, la composante nombre de gousses par plante est plus importante que le poids des gousses. Jorge Jara, (1990) et Laurent (1992) chez la même espèce montrent que lorsqu'on obtient une amélioration de la production (par plante ou par m<sup>2</sup>), c'est plus l'effet d'une augmentation du nombre de graines que du nombre de gousses par plante, ce qui revient à une variation de la fertilité des gousses en fonction des conditions de culture. Le stress précoce et de faible intensité peut provoquer la chute d'un certain nombre de gousses sans que le nombre et le poids des graines des gousses non avortées ne soient affectées, ce qui entraîne le maintien d'un poids de graines élevé pour un nombre de gousses par plante faible.

En conclusion, lorsque le nombre de grains est fixé (période qui suit immédiatement la floraison, Ney et al. 1993), les ajustements se font sur les poids d'organes. Les poids d'organes sont affectés si l'ajustement sur les nombres est insuffisant par rapport à l'équilibre source puits installé au moment de la fixation des nombres de grains par plante. En ce cas, la plante manque d'assimilats pour remplir ses grains, même après diminution de leur nombre, il y a alors diminution du poids moyen de la graine, ce phénomène est fréquent en cas de stress long et/ou intense. La mise en place de ces équilibres a pour conséquence des corrélations négatives (compensation entre composantes ou concurrence entre organes) ou positives (effet prédominant d'une composante sur le rendement final), qui seront analysés dans le paragraphe suivant.

## **3.4. Interactions entre parties de la plante**

### **3.4.1. Appareils végétatif et reproducteur : corrélation ou compétition**

Une chute précoce des feuilles provoquée par un stress se répercute par une diminution sensible du nombre de graines par gousse, probablement à cause de la perturbation du phénomène de translocation (Tabbada et Flores, 1982 ; Cheraga et Guentour, 1998). Selon Laupretre et Benoit (1989), le nombre de graines par gousse dépend du rythme d'alimentation hydrique et minérale, et de la disponibilité de ces deux éléments. On montre là une liaison positive entre feuilles et grains, liée à l'influence de la surface active de feuilles sur la production, de grains en particulier.

La densité de culture est connue pour modifier les équilibres entre partie végétative et reproductrice : il s'agit de concurrence entre feuilles et grains. Chez le pois, les densités de semis élevées favorisent la production de biomasse aux dépens de la production de gousses, de graines et du poids moyen de la graine (Martin et al. 1994). Jorge Jara (1990) met en relief le phénomène de concurrence chez le haricot entre la production de graines et l'indice foliaire (IF), donc de la production de biomasse : le résultat de cette concurrence est qu'ils sont corrélés négativement : la production de biomasse semble se faire aux dépens de la production de graines. Sur pois et pois chiche, il semble qu'une alimentation hydrique non limitante se traduise par une production de biomasse au

détriment des gousses (Deschamps et Wery, 1987). La concurrence entre les fonctions de production et les fonctions de stockage de la plante est mise en évidence aussi par (Karamanos et Gimenez, 1991) pour le genre *Vicia*, à partir de densités de semis. Il est accentué en conditions de restriction hydrique à cause de la concurrence pour l'eau.

Ces phénomènes s'expliquent par des équilibres entre sources (fournisseurs d'assimilats) et l'ensemble des puits (demandeurs d'assimilats), dont on estime souvent la puissance (ou la force) à partir de leur vitesse de croissance à un instant donné.

### 3.4.2. Indice de récolte (IR)

L'appareil reproducteur est plus sensible au stress hydrique que l'appareil végétatif, puisque l'indice de récolte (IR) et la fixation d'azote diminuent sous l'effet du stress hydrique (Pena-Cabriales et Castellanos, 1993). Selon Bouthier, (1992a) ; Bouthier et Gaillard (1994), un stress appliqué durant la phase de grossissement des graines provoque une chute de l'indice de récolte car le rendement en grains est plus affecté que la production de matière sèche totale. Ils considèrent que la chute de rendement peut atteindre 8 à 15 q/ha pour un stress appliqué durant la phase post-florale. English-Loeb (1990), sur haricot, montre que la production de gousses est plus sensible au stress hydrique que la matière sèche totale (MST) : il obtient, sous stress intense, une production de gousses nulle alors que celle de la matière sèche totale a chuté de 80 %. Il faut souligner le fait que, dans la pratique, la détermination précise des différentes phases phénologiques est difficile, particulièrement pour les cultures de plein champ dans lesquelles il existe une importante hétérogénéité de la mise à fleur tant au niveau d'un même plant qu'entre les plants d'une même parcelle.

Singh et al. (1987a) montrent qu'un bon régime hydrique améliore l'indice de récolte et diminue le poids moyen de la graine, ce qui implique aussi une augmentation du nombre de graines. En régime hydrique optimum, le genre *Vicia* a une production de graines similaire à la production de matière sèche (Green et al. 1985 ; Rengasamy et Reid, 1993). En conditions de restriction hydrique, on constate une plus grande diminution du poids des graines que du poids de matière sèche, donc une diminution de l'indice de récolte et à un degré moindre de l'indice foliaire (Green et al. 1985).

En conclusion, en cas d'alimentation hydrique abondante, c'est la biomasse qui bénéficie de l'augmentation de production plutôt que les graines. Autrement dit, le stress agit plus négativement sur le poids des graines que sur la biomasse totale. Cela ne veut pas dire qu'une plante bien irriguée produit moins de graines qu'une stressée. C'est la valorisation de l'eau qui est parfois améliorée en cas de stress. Ceci est probablement dû au fait que la biomasse a une période d'accroissement longue (pratiquement durant tout le cycle végétatif), tandis que la production de graines en nombre et en poids correspond à une période plus courte et passe plusieurs verrous successifs qui peuvent limiter définitivement la production (au début, mise en place du nombre de graines et à la fin remplissage de celles-ci). De plus, l'importance du transfert des assimilats vers les graines dépend de la masse de matière sèche élaborée avant le début de la période de reproduction. Ainsi, en cas de stress, le poids des graines peut être doublement pénalisé, car il dépend du stress subi directement par les composantes et de la limitation de

transferts éventuels par leur quantité restreinte ou le manque d'eau pour assurer le transfert.

### **3.4.3. Compensation entre composantes du rendement, équilibre entre organes**

La diminution d'une ou de plusieurs composantes du rendement exprimées en nombre (par plante ou par m<sup>2</sup>), suite à un stress hydrique appliqué au début de la période de reproduction, diminue la concurrence entre les graines pendant leur période de grossissement, d'où le maintien de leur poids moyen à des niveaux relativement élevés en comparaison avec les autres composantes du rendement.

Sur haricot, Peters et al. (1982) montrent que l'irrigation améliore la production de graines par une augmentation du nombre de graines par plante, alors que le poids moyen de la graine est peu affecté (il diminue ou reste stationnaire).

Il arrive que le poids de la graine augmente sous l'influence du stress, à cause d'un effet de compensation entre composantes (Fiegenbaum et al. 1991 ; De Balatier, 1987) : le nombre de grains devient « trop » faible pour l'équilibre source puits qui s'est instauré, la plante dispose d'assimilats suffisants pour remplir plus ses grains. Un effet de compensation a été obtenu par Jorge Jara et Izquierdo (1988) entre le nombre de graines par gousse et le poids moyen de la graine.

Deumier (1988) ; Deumier et al. (1990 ; 1991) montrent l'importance du phénomène de compensation entre le nombre de graines par plante ou par m<sup>2</sup> et le poids moyen de la graine pour une même période d'application du stress chez le pois. En effet, leurs résultats mettent en évidence la différence de sensibilité au stress hydrique et l'effet de compensation entre le nombre de graines par plante qui a diminué de 40%, alors que le poids moyen de la graine a augmenté de 19%. Ce résultat semble logique puisqu'une diminution élevée de graines a permis une amélioration du Poids moyen de la graine, probablement à cause du manque de concurrence entre les graines d'une même plante. On observe généralement le même phénomène d'interaction ou de compensation entre le Nombre de graines et le Poids des graines par Gousse et le poids moyen des graines de la même gousse.

Carrouée et Ailliot (1992) confirment l'effet de compensation entre le nombre de graine par m<sup>2</sup> et le Poids moyen de la graine provoquée par une irrigation pré-florale par rapport à une irrigation normale de la culture du pois.

En résumé, le poids moyen de la graine, dernière composante à se fixer, dépend très largement des autres composantes et des conditions du remplissage. Sa plasticité donne de bonnes capacités d'adaptation des légumineuses aux conditions environnementales.

Samper et Wayne Adams (1985) affirment que le poids de graines par plante ne doit pas être considéré comme un bon indicateur de sensibilité à la sécheresse à cause de l'effet de compensation entre les composantes du Poids des graines par Plante, qui peut dépendre du mode d'application du stress. Si le Nombre de graines par Plante est « trop » réduit par le stress, le Poids moyen de la graine peut être augmenté pour le stressé par rapport au témoin. De ce fait, le produit des deux composantes donnera un effet modéré

du stress sur le Poids des graines par Plante. Cet exemple montre la nécessité de décomposer au moins le poids de graines par plante en poids de la graine nombre de graines par plante.

Pour d'autres espèces autres que les LAGG, Blum (1996) montre qu'en conditions de stress, la culture du blé maintient son niveau de production par le phénomène de compensation entre les principales composantes du rendement. Ainsi, le niveau d'efficience d'utilisation de l'eau doit toujours être pris en considération. En effet, il arrive souvent que la production de biomasse se fasse aux dépens du produit commercialisable. Pour éviter ce phénomène, les agriculteurs ont recours à des variétés sans feuilles (cas de certains pois) ou à chaumes courtes pour certaines variétés de céréales.

En conclusion, les phases de reproduction, et particulièrement les phases floraison début élongation des gousses, sont considérées comme les plus sensibles au stress hydrique pour le rendement et la majorité de ses composantes, sauf le poids moyen de la graine qui, lui, est sensible au stress durant la phase de remplissage des gousses, c'est-à-dire la période où il se détermine, lorsque les autres composantes ne changent plus (de Magalhaes et al. 1979 ; Laurent, 1992, sur haricot, Plies-Balzer et al. 1995, sur fève, Bouthier et Gaillard, 1994, sur pois (planche 2)).

#### 4. Nodulation et stress hydrique

---

L'effet du stress hydrique sur la nodulation dépend de son intensité et de la période de son application. Ainsi, un stress appliqué au stade de développement végétatif affecte la nodulation, mais, cette dernière peut reprendre normalement, et même mieux que le témoin après ré irrigation. Par contre, un stress appliqué pendant la période de reproduction affecte définitivement le nombre et le poids des nodules du haricot (Pena-Cabrales et Castellanos, 1993 ; Sangakkara, 1994).

Chez le haricot, les températures élevées accentuent les effets dépressifs du stress hydrique sur la nodulation. Ainsi, à 38 °C la nodulation est complètement arrêtée (Hernandez-Armenta et al. 1989 a et b).

Samson et al. (1989) montrent que la dessiccation d'un sol sans culture de légumineuses ou au contraire, son inondation provoquent une mauvaise nodulation du haricot l'année suivante. Ceci est probablement dû à une grande sensibilité du *Rhizobium phaseoli* au stress d'excès et/ou de manque d'eau. De plus, l'efficacité de la nodulation dépend de la souche du *Rhizobium* en question (Redden et al. 1990 ; Salez et Saint Macary, 1987), et de la durée du cycle végétatif de la culture. En effet, selon Fouilloux et al. (1985), les génotypes à cycle long sont toujours plus fixateurs.

Sur fève, Guérin et al. (1990) constatent une très forte corrélation entre le potentiel hydrique des feuilles et des nodules, néanmoins, le potentiel hydrique nodulaire augmente (dans l'absolu) plus rapidement que le potentiel foliaire. Un stress appliqué durant la phase de développement des gousses affecte l'activité nitrate réductase et la biomasse de la fève (Plies-Balzer et al. 1995).

Deschamps et Wery (1987), sur pois et pois chiche, montrent que l'absence de restriction hydrique favorise l'activité fixatrice et la production de biomasse aux dépens de

la production de graines. Ceci est probablement dû au double effet de la compensation entre les deux composantes du rendement (la biomasse et la production de graines) et à l'antagonisme entre la fonction de production et de reproduction de la plante. Selon les mêmes auteurs, l'effet de l'irrigation combinée à un apport de nitrate semble accroître l'assimilation et inhiber la fixation. Enfin, le stress hydrique semble avoir plus d'effet négatif sur la fixation que sur la biomasse et la production de graines.

Une étude comparative sur la sensibilité au stress hydrique de différentes variétés de pois chiche révèle une corrélation positive entre la résistance à la sécheresse et la fixation azotée. (Singh et Rai, 1982).

En résumé, les effets directs du stress hydrique sur la plante sont encore accentués par les effets dépressifs du stress sur la nodulation.

## **5. Efficience d'utilisation de l'eau, valorisation d'un apport supplémentaire**

---

Sur *Phaseolus vulgaris*, l'irrigation améliore l'indice de récolte, l'effet est inverse sur *Phaseolus Acutifolius* (Petersen et Davis, 1982). Ces comportements très variés entre espèces manifestent évidemment des capacités de valorisation de l'eau très différentes.

Sur pois, avec irrigation de complément, Bouthier (1992b) obtient, sur quatre années expérimentales, une corrélation positive entre production de matière sèche et poids des graines. Selon le même auteur, une amélioration de la production de MS de 6 à 13 t s'est accompagnée d'une amélioration de la production en grain de 3 à 6.5 t. Ceci confirme l'intérêt des irrigations de complément. En conditions hydriques et trophiques non limitantes, Petersen et Davis (1982) montrent aussi une corrélation positive entre le rendement en grains et le poids moyen de la graine.

Selon Laurent (1992), l'efficience d'utilisation de l'eau par le haricot (8 à 15 kg/mm/ha) peut être améliorée par une meilleure maîtrise des irrigations, particulièrement pendant la période de reproduction.

Un stress intense provoque une diminution de l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) et de l'indice de récolte (IR) du haricot à cause de la chute de production des graines (Jorge Jara et al. 1988). Selon le même auteur, l'indice d'utilisation de l'eau varie de 4 à 10 kg de graines par mm/ha, respectivement pour une ETR de 250 et 400 mm. L'indice d'utilisation de l'eau est plus affecté pour la production de graines que pour la production de matière sèche totale (Foster et al. 1995).

Sur pois, Bouthier et al. (1995) montrent que jusqu'à 10 jours après la fin de la floraison, (début du grossissement des graines) l'efficience d'utilisation de l'eau est la plus élevée (de l'ordre de 2 à 3 q/ha pour 10 mm apportés) en cas de stress, ce qui est conforme aux résultats précédents. Dans ce cas l'auteur veut montrer l'importance de la phase grossissement des graines par rapport à la phase floraison (FL), puisque l'eau apportée à cette phase serait plus utilisée à la phase grossissement des graines qu'à la phase floraison.

Un bon choix de la période d'apport de l'irrigation d'appoint sur pois permet

d'augmenter la valorisation du  $m^3$  d'eau d'irrigation durant la période de début floraison à 10 jours après la fin floraison (Bouthier et Gaillard, 1994 ; Bouthier et al. 1995 ; Carrouee et Ailliot, 1992). Malik et Bhandari (1994) notent une diminution de l'efficience d'utilisation de l'eau dans les zones humides d'altitude (9 à 16 kg/mm/ha).

Sur fève, l'efficience maximale d'utilisation de l'eau pour la production de matière sèche totale est très variable. Elle dépend particulièrement de la date de semis (3.5 à 0.9 kg/ $m^3$ ), respectivement pour un semis de mai et de juin (Loss et al. 1997). Marcellos et Constable (1986). Pour des conditions analogues de culture, les résultats enregistrés par Rengasamy et Reid (1993) sont plus importants, puisque, 55 jours après le semis, la production de matière sèche varie de 2.5 à 5 kg/ $m^3$  selon les traitements, ceci est probablement dû au type de variétés et leur développement, particulièrement la hauteur de la plante.

En agriculture, la notion d'efficience économique doit prendre en considération tous les facteurs de production, particulièrement le prix du  $m^3$  d'eau d'irrigation et le prix unitaire du produit commercialisé. Sur pois chiche, Singh et al. (1987b) obtiennent une meilleure efficience d'utilisation de l'eau pour une seule irrigation, mais la meilleure efficience économique a été obtenue pour deux irrigations.

Saxena et al. (1990) ; Wery (1990) constatent une meilleure efficience d'utilisation de l'eau pour les semis précoces à cause d'une plus grande utilisation des précipitations hivernales. De plus, la précocité du semis n'implique pas un plus grand prélèvement de l'eau du sol à la fin du cycle végétatif.

En résumé, l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) dépend particulièrement de la phase d'apport durant le cycle végétatif. Un apport durant la phase la plus sensible valorise au maximum le  $m^3$  d'eau d'irrigation.

L'(EUE) dépend aussi de la quantité d'eau apportée par rapport aux besoins de la culture. En effet, le manque ou l'excès d'eau contribuent à baisser le niveau d'efficience d'utilisation de l'eau totale et d'irrigation.

## **6. Qualité : récolte en vert, récolte en sec (teneur en protéines, qualité germinative)**

---

Le stress, même de faible intensité, agit sur la qualité de la gousse par une diminution de son poids et de sa longueur (Tabbada et Flores, 1982), ce qui est important pour les gousses récoltées en vert.

La qualité protéique des graines de haricot récoltées à l'état sec dépend du régime hydrique qu'elles ont subi. Ainsi, un excès d'eau provoque une diminution du taux de protéines dans les graines (Koehler et Burke, 1988 ; Bachchhav et al. 1993). Par contre, un stress modéré provoque une chute de la production en poids, mais n'affecte pas la qualité protéique et le poids moyen de la graine du haricot (Federici et al. 1990). Le même auteur montre que pour un stress intense, la qualité protéique est inversement proportionnelle au Poids moyen de la graine, comme s'il existait une compétition, donc une corrélation négative entre rendement et qualité.

Laurent (1992) montre qu'une irrigation tardive provoque une diminution de la faculté germinative de la graine, mais elle améliore sensiblement son poids moyen. Ainsi pour les graines destinées à être semées, il est préférable d'éviter les irrigations tardives, d'autant plus que le Poids moyen de la graine élevé peut être un caractère négatif puisqu'il diminue le nombre de graines semées par quintal de semence, donc par m<sup>2</sup> semé.

Osuna-Garcia et al. (1988); Fiegenbaum et al. (1991) montrent que le stress hydrique provoque des perturbations physiologiques de la plante, par une diminution des sucres solubles et de l'amidon des graines de haricot. En revanche, le taux d'acides aminés des protéines solubles et la vigueur des graines sont pratiquement insensibles. Passin et al. (1991), pour un stress provoqué durant la période de développement des gousses, montrent que les sucres solubles augmentent (au lieu de diminuer), et que le stress hydrique pré floral n'a pratiquement pas d'effet sur la qualité des graines de haricot. Les mêmes auteurs montrent aussi que la faculté germinative est fortement affectée par un stress post-floral. Mullet et Whitsitt (1996) obtiennent les mêmes résultats pour un stress appliqué à la phase de remplissage des gousses. Wery et Turc (1990) concluent à un résultat différent, puisqu'ils considèrent que les légumineuses confrontées au stress hydrique privilégient l'intégrité (poids et qualité) des premières semences formées au détriment de leur nombre.

En étudiant l'effet du manque ou de l'excès d'eau, Raymond et al. (1987) montrent que l'excès d'eau sur pois diminue la qualité germinative de la graine de 5 à 13% par rapport au témoin, tandis que le manque d'eau provoque une diminution du poids des graines. Selon les mêmes auteurs (1988), les irrigations tardives ont un effet négatif sur les composantes du rendement et la qualité germinative du pois.

Selon Bachchhav et al. (1993), l'excès d'eau provoqué par une fréquence d'arrosage élevée injustifiée provoque chez le haricot une diminution du poids des graines, du poids des gousses, de l'indice de récolte et de la qualité protéique des graines.

En résumé, le manque d'eau diminue la production en quantité, sans trop diminuer la qualité protéique et la faculté germinative des graines. Selon certains auteurs, donc des conditions expérimentales, le stress intense améliorerait la qualité des graines, puisque la grosseur de la graine (PMGr) est inversement proportionnelle à sa qualité protéique. Les conditions d'excès d'eau, particulièrement à la fin de la période de reproduction, diminuent la qualité protéique et germinative des graines, sans pour autant faire baisser beaucoup le rendement en grains et en gousses. Dans ce cas, le Poids moyen de la graine pourrait être amélioré, en créant de bonnes conditions d'alimentation hydrique durant la phase de grossissement des graines. La gestion raisonnée de l'eau est donc un élément important des qualités protéique et germinative des graines de légumineuses.

## **7. Comparaisons entre variétés ou entre espèces : critères de résistance à la sécheresse**

---

### **7.1. Comparaison entre variétés**

Les résultats obtenus par Guimaraes (1986), Parsons et Howe, (1984), Vassey et

Sharkey (1989) montrent que les cultivars de haricot les plus résistants à la sécheresse ont la faculté de maintenir leurs feuilles en état de turgescence pendant une période beaucoup plus longue que les cultivars moins résistants. Ceci est dû au fait que la teneur en eau relative des feuilles (RWC) est plus élevée.

## 7.2. Sensibilité comparée des légumineuses au stress hydrique

Le genre *Phaseolus acutifolius* est plus résistant au stress hydrique que le *Phaseolus vulgaris* (Petersen et Davis, 1982 ; Petersen, 1985 ; Yu et Berg, 1994), mais en condition d'irrigation le *P. vulgaris* valorise mieux l'eau d'irrigation (Anonyme, 1990). Dans un essai comparatif de l'influence du stress hydrique sur *Phaseolus vulgaris* et *Phaseolus acutifolius*, Petersen et Davis (1982) montrent que l'irrigation améliore le poids des graines par plante pour le *Phaseolus vulgaris*, au contraire, les résultats sur *Phaseolus acutifolius* ont été négatifs.

Des essais réalisés par Kapuya et al. (1985) sur l'effet de la fréquence d'arrosage et par Samper et Wayne Adams (1985), White et Castillo (1992) sur le rendement en graines de différents cultivars de haricot montrent une très grande variabilité de production entre les différents cultivars.

Dans une étude comparative de la résistance au stress hydrique du haricot par rapport au tournesol et au maïs, Pena Ramos et Munoz-Orozco (1988) concluent à une plus grande sensibilité du haricot au stress, en contrepartie, il a une meilleure vitesse de réhydratation (récupération) après irrigation. Par rapport au pois, le haricot a une plus grande sensibilité (Walton et al. 1976). Un essai comparatif de la résistance à la sécheresse entre les variétés à croissance déterminée et indéterminée du haricot montre que le caractère déterminé est plus résistant à la sécheresse (Tan Boun Suy, 1978).

Parmi les légumineuses alimentaires à grosses graines, le pois chiche semble être le plus résistant à la sécheresse (Relave, 1993).

Dans une étude comparative sur l'effet du stress hydrique sur quatre légumineuses alimentaires, Abd-el-wahab et Zahran (1979) montrent que la sensibilité au stress hydrique d'une plante dépend en partie de sa faculté de reprendre son développement normal après rupture du stress. Ainsi, le pois et la fève ont une plus grande faculté de reprise de leur activité physiologique que le *Vigna* et le soja. Ceci est dû en partie à la perte de leur activité fixatrice de l'azote de l'air.

Dans une étude comparative de la production de matière sèche de quatre légumineuses à grosses graines, en vue d'une production d'engrais vert en climat semi-aride, Biederbeck et al. (1993) montrent que la production de matière sèche totale peut doubler d'une espèce à une autre, ainsi, le *Lathyrus tingitanus* produit 1486 kg/ha et le *Pisum sativum* 3008 kg/ha. Le *Lathyrus sativus* et le *Lens culinaris* produisent respectivement, 2230 et 1669 kg/ha. De plus, selon Biederbeck et Bouman (1994) les espèces qui produisent plus de matière sèche ont une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (jusqu'à 29 kg/mm/ha pour le *Pisum sativum*).

En résumé, pour la sensibilité au stress hydrique des quatre légumineuses alimentaires à grosses graines, on note une plus grande sensibilité du genre *Phaseolus*,

néanmoins, le *P. acutifolius* semble être moins sensible que le *P. vulgaris* et que les cultivars à croissance déterminée sont toujours plus résistants que ceux ayant une croissance indéterminée.

Le genre *Cicer* affiche la plus faible sensibilité au stress hydrique, il est même très sensible aux conditions d'excès d'humidité.

Les genres *Pisum* et *Vicia* semblent être moyennement sensibles, puisqu'elles valorisent mieux l'eau d'irrigation par comparaison avec les haricots qui sont sensibles au manque d'eau et aux basses températures, alors que le pois chiche est plus tolérant aux conditions de manque d'eau et des basses températures hivernales.

## **8. Conclusion**

---

En résumé, la sensibilité des légumineuses alimentaires à grosses graines aux facteurs climatiques se subdivise en trois groupes. Le haricot représente le premier groupe par sa grande sensibilité au froid et aux températures élevées. Les *Phaseolus* se caractérisent par une grande sensibilité au stress hydrique et à l'excès d'eau, qui accentuent la chute des organes fructifères. Les espèces du deuxième groupe, représentées par le pois et la féverole, de sensibilité moyenne, tolèrent les basses températures hivernales, elles peuvent être semées en hiver mais ne tolèrent pas les stress abiotiques terminaux (sécheresse, températures élevées).

Le pois chiche représente le troisième groupe, puisqu'il est tolérant aux conditions climatiques extrêmes. En effet, il peut être semé en hiver et peut lutter contre les stress abiotiques terminaux, particulièrement pour les semis précoces des régions non gélives qui permettent à la culture de bénéficier au maximum des précipitations. Il faut signaler sa grande sensibilité à l'excès d'eau.

A l'exception du haricot qui est relativement exigeant en eau en comparaison avec son cycle court (60 à 90 jours), les LAGG sont considérées comme des cultures peu exigeantes en eau. En effet, elles sont cultivées dans les zones géographiques à pluviométrie moyenne à faible.

Les genres *Vicia* et *Cicer* ont un cycle relativement long (4 à 6 mois), d'où leurs exigences en eau plus élevée que celles des genres *Phaseolus* et *Pisum*. En contrepartie, elles ont l'avantage de bénéficier d'une bonne partie des précipitations hivernales à cause de leur semis précoce et de leur tolérance au froid. Les besoins moyens durant le cycle varient de 250 à 350 mm pour le pois et le pois chiche, et de 350 à 500 pour le haricot et la féverole.

Dans les zones à printemps pluvieux et à l'exception du haricot, qui nécessite toujours des irrigations de complément, les LAGG sont généralement cultivées sans irrigation. Mais une ou deux irrigations de complément (50 à 150 mm durant la période de reproduction) peuvent améliorer sensiblement les rendements en quantité et en qualité, particulièrement en année peu pluvieuse.

Si les légumineuses sont moyennement sensibles aux faibles déficits hydriques, elles sont par contre très sensibles aux conditions d'excès d'eau (ennoyage et humidité relative

élevée) qui provoquent la chute des organes fructifères et diminuent la qualité du grain. De plus, les excès d'eau peuvent provoquer un développement herbacé aux dépens des organes fructifères.

Les effets dépressifs de l'excès d'eau augmentent avec le degré de maturation des gousses. En d'autres termes, les irrigations durant la période de maturation sont souvent néfastes.

Le stress hydrique provoque chez la plante une diminution de la photosynthèse par fermeture stomatique. Celle-ci est provoquée par l'augmentation de la concentration dans les organes de la plante de deux hormones de régulation : l'acide abscissique (ABA) et de la proline. Les recherches sur ces deux hormones ont montré l'existence d'une corrélation entre l'intensité, la durée et la fréquence du stress d'une part et leur accumulation dans les organes de la plante d'autre part. De ce fait, elles constituent un indicateur de l'état de stress de la plante, au même titre que les indicateurs classiques.

D'autres médiateurs tels que l'acide dihydrophaseique (ADP) et l'activité nitrate réductase (ANR) qui se manifestent en cas de stress hydrique peuvent être aussi utilisés comme indicateurs de l'état de stress pour la recherche et l'amélioration des espèces et des variétés résistantes à la sécheresse.

Le concept de résistance à la sécheresse d'une plante est très variable selon ce qui est recherché par le vocable de résistance. Ainsi, certains considèrent qu'une plante résistante à la sécheresse doit supporter les conditions de déficit hydrique tout en valorisant toutes ses potentialités en régime hydrique optimal. D'autres considèrent que la plante doit maintenir ses échanges gazeux relativement intenses tout en limitant au maximum les pertes d'eau sous forme de vapeur par transpiration. La résistance peut être aussi considérée comme un caractère de survie à une sécheresse temporaire.

D'un point de vue économique, une plante résistante doit maintenir une production abondante, régulière et de qualité en minimisant le coût à la production.

Le développement racinaire en profondeur ou en volume peut être un bon indicateur du degré de résistance à la sécheresse d'une espèce donnée.

L'adaptation des racines en conditions de sécheresse est relativement variable. En effet, certaines racines ont tendance à se développer plus en profondeur qu'en surface et atteindre ainsi parfois plusieurs mètres. Ceci leur permet de puiser plus d'eau dans les couches profondes du sol, par contre d'autres développent leurs racines en surface pour bénéficier de la moindre humidité à la surface du sol.

Les références bibliographiques consultées montrent la complexité de l'effet du stress hydrique ou d'un apport de complément d'irrigation sur les différentes composantes du rendement des légumineuses alimentaires à grosses graines.

En effet, la sensibilité des composantes du rendement varie en fonction de plusieurs facteurs, parmi les plus importants :

- l'intensité et la durée du stress ;
- la période d'application par rapport à la phase phénologique la plus sensible ;

- l'espèce et la variété stressée.

De plus, les interactions (compétition, compensation) entre composantes du rendement peuvent cacher la sensibilité de certaines composantes. C'est pourquoi il est nécessaire d'analyser les composantes de la façon la plus décomposée possible.

L'étude de la sensibilité au stress hydrique des différentes phases phénologiques donne des résultats assez nets :

- les phases florales et immédiatement post-florales (y compris la phase d'élongation des gousses propre aux légumineuses) agissent plus sur les composantes exprimées en nombre à cause du phénomène d'avortement des gousses et/ou des graines à l'intérieur de chaque gousse ;
- les phases de grossissement des graines agissent sur les composantes exprimées en poids par l'intermédiaire de la diminution du poids moyen de la graine, de la gousse ou des deux ;

les phases de développement végétatif et de maturation ont une sensibilité au stress hydrique relativement faible.

## DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET METHODES

Nous avons choisi de réaliser deux types d'expérimentations, l'une en conditions le plus contrôlées possible, sous serre et en conteneur (chapitre A), avec des mesures nombreuses et précises, l'autre en plein champ (chapitre B), en conditions proches de la pratique agronomique, avec des mesures plus légères.

**Tableau II : Mode de conduite des expérimentations et mesures effectuées**

## Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines

|                                |  |   |
|--------------------------------|--|---|
| Mode de Culture                | A/ Sous serre en verre avec cooling (Plantes conduites en conteneur)   | B/ Plein champ  |
| Espèces cultivées              | Haricot  | Haricot (Station expérimentale de INA) Pois, féverole et Pois chiche (Station expérimentale De l'ITGC)                  |
| Nombre d'années expérimentales | 3 ans (1992, 1993 et 1994)   | 1 an (1995)   |
| Application                    | Stress obtenu par arrêt des irrigations  | Apport d'irrigation de complément ou irrigation d'appoint   |
| Mesures effectuées             | A/ Mesure du tarissement de l'eau du sol par pesée B/ Stade final (maturité physiologique des gousses) C/ Composantes du rendement | A/ Mesure de l'humidité du sol par gravimétrie avant le début des irrigations de complément B/ Composantes du rendement |

### A. Essai sous serre (méthode de marquage des organes fructifères)

Le choix de la conduite des essais en conteneur a été guidé par le souci d'une bonne maîtrise de l'uniformité du taux de tarissement de l'eau du sol durant la période de stress (cette condition étant difficile, si non impossible à réaliser en plein champ) (Nunez-Barrios, 1991). La culture sous serre permet d'éviter les risques de rupture du stress hydrique en cas de précipitations.

#### 1. Conduite de la culture, date d'application du stress

Les essais ont été réalisés dans la station expérimentale de l'Institut National Agronomique (INA) d'El-Harrach, Alger. Les semis ont été effectués aux mois de septembre 1992, mars 1993 et mars 1994, dans une serre en verre martelé, dotée d'un système d'aération et de cooling. Afin de s'approcher des conditions climatiques de plein champ, les ouvrants de la serre sont restés ouverts en permanence, sauf pendant les risques de précipitations. Les conditions microclimatiques de la serre ne sont pas trop éloignées des conditions naturelles (tableau IIIa et b).

Après pré germination en "fertiles pots", les plantes sont cultivées en conteneurs individuels de grandes dimensions (30 cm de diamètre et 30 cm de hauteur). Un tuteurage a été effectué pour chaque plante, parce que, en bonnes conditions de culture, la variété Coco de Prague se comporte comme une variété semi grimpante.

Afin de pouvoir marquer un maximum d'organes fructifères, le stress est appliqué au moment où la phase phénologique choisie pour être stressée est la plus fréquente sur l'ensemble de la plante. Grâce à ce marquage individuel, il est possible de prendre en

compte la phase de l'organe fructifère, et non la période de reproduction à laquelle se trouve l'ensemble de la plante.

## 2. Etude du milieu et de l'environnement du site expérimental

### 2.1. Données climatiques

Les essais étant conduits sous serre, nous avons procédé aux relevés de la températures et de l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la serre afin de les comparer et de vérifier que les conditions subies par les plantes en serre ne sont pas éloignées des conditions climatiques de plein champ (tableau IIIa et b).

### 2.2. Caractéristiques de rétention en eau du sol

Le substrat utilisé retient 27.8% de son poids à la capacité de rétention, soit une réserve utile de 12.5%. Exprimée par rapport au volume de sol en place, la réserve utile pour une densité apparente de 1.43 représente 17.8% (tableau IV).

La détermination des besoins en eau de la culture est faite sur la base de la moyenne de l'évapotranspiration maximale de 10 conteneurs lysimétriques ou évapotranspiromètres qui portent la même culture. On effectue un bilan entre les quantités d'eau d'irrigation et celles du drainage au niveau de chaque conteneur lysimétrique avec un pas de temps de 2 jours. Ainsi, l'évapotranspiration maximale moyenne journalière (ETMj) est égale à :

## 3. Mode d'installation du stress hydrique et calcul des irrigations

Le dessèchement du sol du conteneur est produit par l'évapotranspiration du pot sous stress (ETR) jusqu'à ce que la perte d'eau atteigne environ 80% de la réserve utile du sol (RU). Ainsi, le potentiel de l'eau du sol à la fin du stress mesuré dans quelques pots à l'aide de la

| Vitesse de refroidissement<br>du sol (°C/jour) | Jan 1993 |      |      |      | Fév 1993 |      |      |      | Mars 1993 |      |      |      |
|--|----------|------|------|------|----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
|  | 1        | 2    | 3    | 4    | 1        | 2    | 3    | 4    | 1         | 2    | 3    | 4    |
| Température (°C)                               | 27.5     | 28.5 | 29.4 | 29.2 | 27.5     | 28.4 | 29.0 | 29.1 | 27.5      | 28.3 | 29.0 | 29.4 |
| Humidité relative (%)                          | 78.3     | 78.3 | 82.9 | 82.0 | 81.0     | 86.8 | 86.8 | 86.0 | 82.7      | 85.4 | 86.1 | 86.3 |
| ETMj (mm)                                      | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5       | 2.5  | 2.5  | 2.5  |
| ETMj (mm)                                      | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5       | 2.5  | 2.5  | 2.5  |
| ETMj (mm)                                      | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5       | 2.5  | 2.5  | 2.5  |
| ETMj (mm)                                      | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5      | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5       | 2.5  | 2.5  | 2.5  |

Tableau IIIa : Données climatiques à l'extérieur de la serre durant les essais

## Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines

| Niveau climatique              | Essai 1992 |      |      |      | Essai 1993 |   |      |      | Essai 1994 |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------------|------|------|------|------------|---|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|
|                                | 5          | 10   | 11   | 12   | 5          | 7 | 9    | 9    | 11         | 11   | 13   | 13   |      |      |      |
| Température moyenne (°C)       | Dica       |      |      |      | Dica       |   |      |      | Dica       |      |      |      |      |      |      |
|                                | 1          | 27,7 | 28,3 | 19,3 | 19,1       | 1 | 2    | 27,7 | 28,2       | 1    | 18,4 | 18,3 | 21   | 21,1 |      |
|                                | 3          | 27,4 | 22,5 | 17,3 | 17,7       | 1 | 18,3 | 19,6 | 24,4       | 24,2 | 3    | 31   | 18,3 | 18,3 | 21-5 |
|                                | 0          | 26,0 | 22,0 | 19,2 | 18,5       | 1 | 18,0 | 21,2 | 24,2       | 25,0 | 0    | 22,2 | 19,5 | 24,8 | 25,7 |
| Humidité relative de l'air (%) | Dica       |      |      |      | Dica       |   |      |      | Dica       |      |      |      |      |      |      |
|                                | 1          | 34   | 65   | 75   | 84         | 1 | 30   | 33   | 63         | 50   | 1    | 71   | 48   | 54   | 43   |
|                                | 2          | 25   | 50   | 50   | 58         | 2 | 22   | 53   | 24         | 65   | 2    | 50   | 52   | 54   | 73   |
|                                | 3          | 21   | 60   | 50   | 72         | 1 | 59   | 53   | 27         | 20   | 3    | 50   | 52   | 25   | 56   |
|                                | 4          | 31   | 61   | 50   | 58         |   | 37   | 33   | 19         | 15   |      | 31   | 37   | 22   | 28   |

Tableau IIIb : Données climatiques à l'intérieur de la serre durant les essais

| Profondeurs                                    | horizont. (essai champ) |       |       |                 | pois. (émergé, pois élève, (p) (essai champ) |       |       |                 | horizont. (essai en pot/serre)   |  |
|--|-------------------------|-------|-------|-----------------|--|-------|-------|-----------------|--|--|
|  | Statist. DGA EL-Marsa   |       |       |                 | Statist. ID OC Oued Smar                     |       |       |                 | Statist. Oued Smar   |  |
| Horizont. moyen                                | 0 20                    | 20 30 | 30 70 | Horizont. Moyen | 0 20   | 20 40 | 40 90 | horizont. moyen | horizont. moyen  |  |
| Argile (%)                                     | 20,5                    | 20    | 14    | 20,05           | 4,5  | 25    | 41    | 40              | 22   |  |
| Limon (%)                                      | 17                      | 12,5  | 15    | 11,43           | 17   | 15    | 15    | 15              | 11   |  |
| Sable grossier (%)                             | 11,5                    | 11    | 6,1   | 11,52           | 12   | 12    | 11    | 12,00           | 10   |  |
| Sable fin (%)                                  | 13                      | 11    | 14,2  | 14              | 13   | 11    | 11    | 12,33           | 11   |  |
| Sable grossier (%)                             | 21                      | 24,5  | 20    | 23              | 18   | 16    | 24    | 12,33           | 23   |  |
| Densité apparente (Mg/m <sup>3</sup> )         | 1,45                    | 1,39  | 1,22  | 1,39            | 1,24   | 1,45  | 1,50  | 1,40            | 1,40   |  |
| Porosité (%)                                   |                         |       |       | 1,30            |  |       |       | 1,40            | 1,125 g/cm <sup>3</sup> (essai en pot) et 1,125 g/cm <sup>3</sup> (essai en pot) |  |
| Capacité d'échange cationique (CEC) (meq/100g) | Limon argile réactive   |       |       |                 | Argile limon réactive                        |       |       |                 | total (argiles)  |  |
| CEC (meq/100g)                                 | 1,25                    | 1,18  | 0,65  | 1,16            | 1,38   | 0,75  | 0,12  | 0,12            | 2,02   |  |
| MO (g/kg)                                      |                         |       |       | 1,12            | 1,0  | 0,7   | 0,38  | 0,52            | 1,44   |  |
| NO <sub>3</sub> (g/kg)                         |                         |       |       | 1,15            | 1,27   | 1,43  | 1,43  | 1,43            | 3,37   |  |
| P (g/kg)                                       |                         |       |       | 0,24            | 0,86   | 0,38  | 0,34  | 0,52            | 0,84   |  |
| Col  |                         |       |       | 0,5             | 1,3  | 10    | 9     | 9,05            | 11,1   |  |

Tableau IV : Analyse du sol

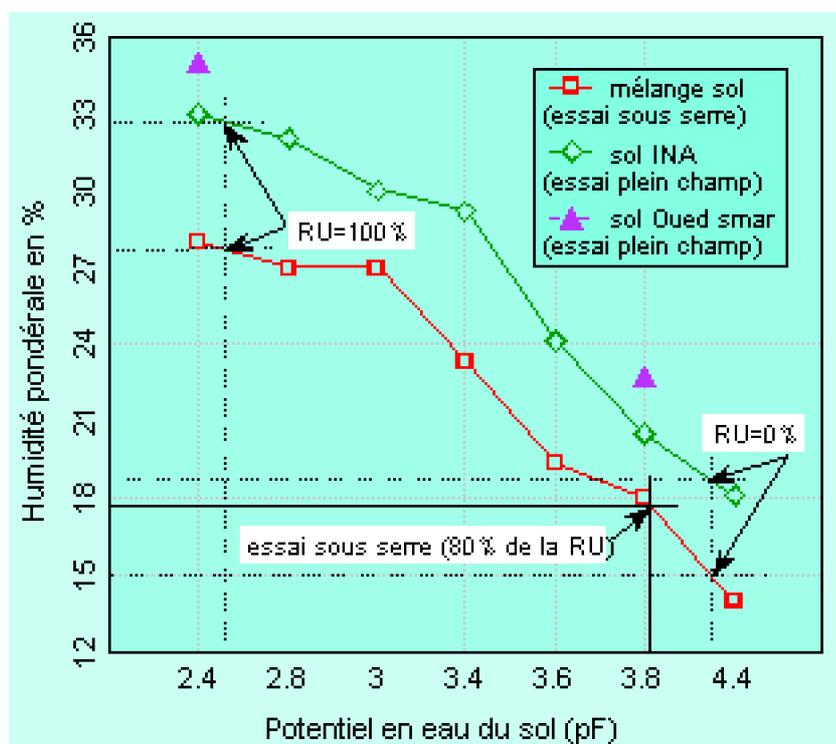


Figure 2a : Courbe caractéristique de rétention en eau du sol

courbe pF (pF) se situe autour de 8,5 à 9 bars (fig. 2a). Il est vérifié pour tous les pots à la fin du stress, ce qui représente un stress assez modéré.

$$ETM_j = 1/10 (I - D \pm V_s)$$

- ETM<sub>j</sub> : évapotranspiration maximale moyenne journalière (ml) ;
- I : irrigation moyenne des 10 conteneurs (ml),
- D : drainage moyen des 10 conteneurs (ml) ;
- V<sub>s</sub> : variation moyenne initiale du stock d'eau des 10 conteneurs.

Où la variation de stock initial V<sub>s</sub> est négligeable au-delà d'une décade de mesure, ou si le taux d'humidité du sol du conteneur évapotranspirométrique correspond à la capacité de rétention au premier et au dernier jour du bilan hydrique.

Les conteneurs lysimétriques sont cultivés dans les mêmes conditions que les essais.

#### 4. Détermination du taux de tarissement de l'eau du sol

---

Le contrôle du dessèchement du sol est fait par pesées quotidiennes des conteneurs en phase de stress jusqu'à l'obtention du poids final des conteneurs (Badji et al., 1982). Dans notre cas, le dessèchement du sol doit correspondre au taux de tarissement de 80% de la réserve utile (RU). La variation de stock d'eau du sol, est déterminée à chaque pesée, par rapport au poids initial (P<sub>i</sub>) du conteneur à la capacité de rétention (C<sub>r</sub>) (fig 2b et c). Celle-ci est préalablement déterminée au laboratoire par la méthode de Richard, qui permet la détermination de la courbe caractéristique de rétention en eau du sol ou courbe pF (fig. 2a).

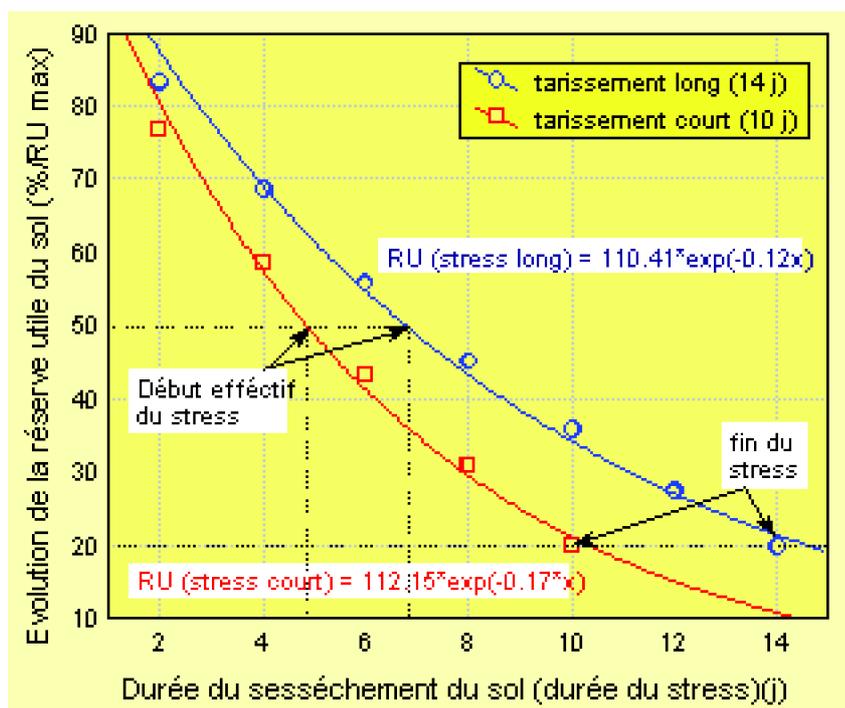


Figure 2b : Evolution de la réserve utile du sol durant la période de stress

Le stress est arrêté lorsque le poids du conteneur atteint la valeur du poids final (pf), telle que :

$$P_f = P_i - 0.8 \text{ RU}$$

- $P_f$  : poids final du conteneur à la fin du stress (g) ;
- $P_i$  : poids initial du conteneur à la capacité de rétention, au début du stress (g) ;
- RU : réserve utile du sol (en g/g de sol sec).

Sachant que :

$$P_i = P_s + C_r$$

- $P_s$  : poids du sol sec du conteneur (g) ;
- $C_r$  : poids de l'eau du conteneur à la capacité de rétention (g).
- $P_i = P_s + 0.278 P_s = 1.278 P_s$

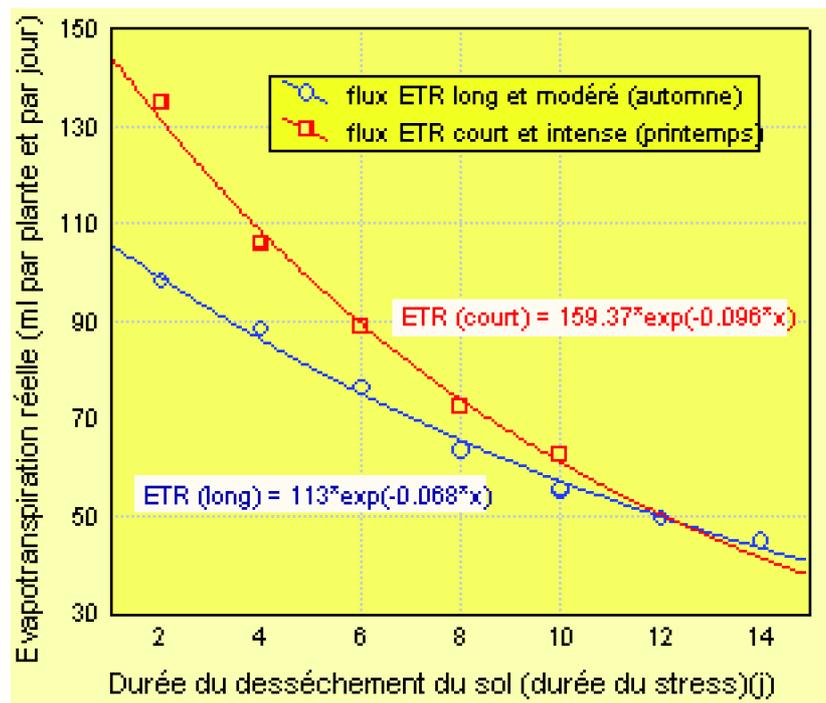


Figure 2c : Evolution du tarissement en eau du sol durant la période de stress

D'où

$$P_s = P_i / 1.278$$

La fraction de la réserve utile d'un sol est définie à partir de sa composition granulométrique. Notre sol étant argilo sableux, la réserve utile représente 45% de l'eau totale retenue à la capacité de rétention (Poirée et Ollier, 1981 ; Smith, 1987).

D'où

$$RU = 0.45 * 0.278 P_s = 0.125 P_s$$

$$RU = 0.45 * 0.278 * P_i / 1.278 = 0.10 P_i$$

$$P_f = P_i - [0.8 (0.45 * 0.278 * P_i / 1.278)]$$

$$P_f = P_i - 0.0783 P_i = (1 - 0.0783)P_i$$

$$P_f = 0.922 P_i$$

Le stress est arrêté lorsque chaque conteneur a perdu 7.83% de son poids initial à la capacité de rétention. A la fin du stress, le sol des conteneurs est alors remis à la capacité de rétention, et conduit en régime hydrique optimum (ETM), jusqu'à la fin du cycle.

## 6. Dispositif expérimental

Dans l'essai sous serre et en conteneur, après une période d'irrigation de reprise de 10 jours, nous avons étudié l'interaction de deux facteurs : le stress hydrique (F1) et la phase d'application du stress (F2).

Le facteur stress F1 est étudié à l'aide de deux régimes hydriques R1 et R2:

- R1, traitement témoin, est conduit sans restriction hydrique en évapotranspiration maximale (ETM) durant toute la durée du cycle végétatif.
- R2, traitement stressé, correspond à une conduite en ETM, sauf pendant la période de stress de la phase considérée.
- Le facteur F2 représente les phases d'application du stress, qui correspondent à chacune des sept phases de développement des organes fructifères (Tableau V) :
- p1: bouton floral ;
- p2: fleur épanouie ;
- p3: nouaison, (gousse de longueur inférieure à 10 mm) ;
- p4, p5, p6 et p7, correspondent respectivement aux phases: 25, 50, 75 et 100% de la longueur normale (L) de la gousse à maturité physiologique.
- Le dispositif expérimental est du type bloc aléatoire, avec deux régimes hydriques (stressé, non stressé) subdivisée chacune en sept phases phénologiques. Chaque traitement est répété quatre fois sur des lots de 6 plantes.

| Date de mesure               | Année 1994/1995              |     |     |     |     |     | Année 1995/1996     |     |     |     |     |     | Année 1996/1997  |     |     |     |     |     |
|------------------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              | p1                           | p2  | p3  | p4  | p5  | p6  | p1                  | p2  | p3  | p4  | p5  | p6  | p1               | p2  | p3  | p4  | p5  | p6  |
| Phénologie (jours)           | Octobre ----- Novembre ----- |     |     |     |     |     | ----- Janvier ----- |     |     |     |     |     | ----- Mars ----- |     |     |     |     |     |
| Début de nouage              | 31                           | 05  | 08  | 06  | 15  | 20  | 11                  | 18  | 24  | 26  | 04  | 06  | 25               | 03  | 07  | 11  | 17  | 22  |
| Durée de nouage (j)          | 12                           | 12  | 13  | 12  | 13  | 14  | 11                  | 11  | 12  | 10  | 12  | 09  | 12               | 12  | 11  | 10  | 12  | 10  |
| Production (kg/ha) (Sole FT) | 30                           | 35  | 32  | 28  | 28  | 30  | 25                  | 23  | 20  | 22  | 22  | 20  | 28               | 26  | 23  | 20  | 22  | 20  |
| B. L'hydratation             |                              |     |     |     |     |     |                     |     |     |     |     |     |                  |     |     |     |     |     |
| Début de floraison (j)       | 14                           | 17  | 20  | 22  | 24  | 25  | 25                  | 18  | 16  | 15  | 21  | 25  | 19               | 12  | 15  | 17  | 18  | 22  |
| Débit de consommation        |                              |     |     |     |     |     |                     |     |     |     |     |     |                  |     |     |     |     |     |
| Débit de consommation (l)    | 50                           | 53  | 55  | 52  | 51  | 49  | 59                  | 57  | 53  | 45  | 48  | 40  | 63               | 51  | 47  | 38  | 35  | 27  |
| ETP de maintenance (mm)      | 955                          | 932 | 927 | 923 | 922 | 924 | 923                 | 920 | 916 | 920 | 920 | 923 | 926              | 925 | 924 | 927 | 926 | 925 |
| ETP de croissance (mm)       | 15                           | 15  | 17  | 18  | 18  | 18  | 17                  | 18  | 18  | 18  | 17  | 18  | 18               | 18  | 22  | 26  | 30  | 40  |

p1, p2, p3 correspondent respectivement aux classes 25, 50, 75 et 100% de la longueur normale (L) de laousse à maturité physiologique.  
 p4, p5, p6 correspondent respectivement aux classes 25, 50, 75 et 100% de la longueur normale (L) de laousse à maturité physiologique.

Tableau V : Calendrier du stress hydrique et de la consommation en eau de la culture (moyenne pour 24 plantes)

## B. Essai EN plein champ (étude comparative de quatre LAGG)

### Conduite des cultures et sites expérimentaux

Nos essais ont été réalisés durant l'année 1995 dans la station expérimentale de l'Institut National Agronomique d'El-Harrach pour la culture du haricot et dans la station de l'Institut Technique des Grandes Cultures de Oued-Smar pour les cultures du pois, de la féverole

et du pois chiche.

Afin de regrouper sensiblement la période de floraison, le semis des différentes espèces a été échelonné entre le 20 février et le 5 mars selon le calendrier suivant :

- le 20. 02. 1995 : semis de la culture de féverole (variété SEL 88 LAT 18009 s.) ;
- le 20. 02. 1995 : semis de la culture de pois (variété Merveille de Quelvedon) ;
- le 20. 02. 1995 : semis de la culture de pois chiche (variété ILC 3279) ;
- le 05. 03. 1995 : semis de la culture de haricot (variété S102).

Chaque parcelle élémentaire se compose de 3 sillons de 6 m espacés de 70 cm, soit une densité de 18 plantes par m<sup>2</sup> pour la féverole et 50 cm pour le haricot, le pois et le pois chiche, soit une densité de 30 plantes par m<sup>2</sup>.

Nos observations étant faites au niveau de chaque plante du sillon du milieu de chaque parcelle élémentaire. Une densité de semis relativement faible a permis d'avoir des plantes individualisées faciles à conduire et à tuteurer.

## **Etude du milieu et de l'environnement des sites expérimentaux**

---

### **2.1. Données climatiques**

Les deux sites expérimentaux étant éloignés d'environ 2 km, nous avons considéré que les valeurs des données climatiques peuvent être les mêmes.

Le tableau VI montre qu'elles sont conformes à la normale. Néanmoins, les précipitations ont été très irrégulières durant le premier semestre dans lequel 51% des précipitations ont été enregistrées au mois de janvier, et 91% durant le premier trimestre. Le deuxième trimestre a été quasiment sec, avec 9% des précipitations totales du semestre

| Date                                    | Parcelle | Mar        |    |    |    | Avr        |    |    |    | Mai        |    |    |    | Juin       |    |    |    |
|---|----------|------------|----|----|----|------------|----|----|----|------------|----|----|----|------------|----|----|----|
|   |          | 1          | 2  | 3  | 4  | 1          | 2  | 3  | 4  | 1          | 2  | 3  | 4  | 1          | 2  | 3  | 4  |
| Déficit hydrique (mm)                   |          | 11         | 21 | 36 | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| Déficit hydrique cumulé (mm)            |          | 11         | 30 | 66 | 66 | 66         | 66 | 66 | 66 | 66         | 66 | 66 | 66 | 66         | 66 | 66 | 66 |
| Appoint (mm)                            |          |            |    |    |    |            |    |    |    |            |    |    |    |            |    |    |    |
| Date de début de phase de développement |          | F1 (05/03) |    |    |    | F2 (05/04) |    |    |    | F3 (05/05) |    |    |    | F4 (05/06) |    |    |    |
| Déficit hydrique cumulé (mm)            |          | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E1: Oued                                | E2: Oued | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E3                                      | E4       | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| Date de début de phase de développement |          | F1 (05/03) |    |    |    | F2 (05/04) |    |    |    | F3 (05/05) |    |    |    | F4 (05/06) |    |    |    |
| Déficit hydrique cumulé (mm)            |          | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E1: Oued                                | E2: Oued | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E3                                      | E4       | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| Date de début de phase de développement |          | F1 (05/03) |    |    |    | F2 (05/04) |    |    |    | F3 (05/05) |    |    |    | F4 (05/06) |    |    |    |
| Déficit hydrique cumulé (mm)            |          | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E1: Oued                                | E2: Oued | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E3                                      | E4       | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| Date de début de phase de développement |          | F1 (05/03) |    |    |    | F2 (05/04) |    |    |    | F3 (05/05) |    |    |    | F4 (05/06) |    |    |    |
| Déficit hydrique cumulé (mm)            |          | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E1: Oued                                | E2: Oued | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
| E3                                      | E4       | J1         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |
|   |          | J2         | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  |

0: sec, D1: Développement végétatif, F: Fleaison, D2: Développement des gousses, M: Mûrissement, R: Récolte, E1: récolte sans irrigation hydrique, E2, E3, E4: irrigation première CV, E, E2, E3: récolte en culture pluviale (sans irrigation)

Tableau VI. Evolution du bilan hydrique et pilotage des irrigations de complément (année 1995)

Cette situation a provoqué une installation rapide d'un déficit hydrique juste après les premières irrigations de reprise durant la première décennie après la levée, sauf pour l'essai du haricot qui n'a connu de déficit hydrique qu'à partir de la période de floraison. Ceci ne nous a pas permis de procéder à une irrigation de complément, pour créer une différenciation sec/irrigué durant la période de développement végétatif du haricot (tableau VI).

## 2.2. Données pédologiques

L'analyse du sol des deux sites expérimentaux montre une tendance argileuse des deux parcelles expérimentales (tableau IV). Ainsi, la courbe pF montre que la réserve utile du sol (RU) est égale à 160 et 130 mm/m pour une capacité de rétention (Cr) de 360 et 290 mm/m, respectivement pour le sol de Oued-Smar et d'El-Harrach.

Sur la base de la courbe pF (fig. 2a) et de la profondeur racinaire, nous avons déterminé la réserve en eau du sol des quatre cultures en considérant que la RU représente environ 45% de la capacité de rétention (Poirée et Ollier, 1981 ; Smith, 1987).

La profondeur de prospection racinaire est estimée à 50 cm pour la culture du pois, du pois chiche, du haricot et 60 cm pour la culture de féverole, soit une RU de 80 mm pour la culture du pois, du pois chiche et 95 et 65 mm, respectivement, pour la culture de la féverole et du haricot. La différence des réserves utiles est due à la profondeur racinaire de la féverole qui est plus grande et à la RU du sol du haricot qui est plus faible (tableau IV et VII).

**Tableau VII : Caractéristiques de rétention en eau du sol des parcelles expérimentales**

| Cultures    | Station    | Profondeur racinaire (cm) | Capacité de rétention (mm/m) | Réserve utile (mm) |
|-------------|------------|---------------------------|------------------------------|--------------------|
| Haricot     | El-Harrach | 50                        | 290                          | 65                 |
| Pois        | Oued-Smar  | 50                        | 360                          | 80                 |
| Féverole    | Oued-Smar  | 60                        | 360                          | 95                 |
| Pois chiche | Oued-Smar  | 50                        | 360                          | 80                 |

### **3. Pilotage et contrôle des irrigations de complément**

---

Pour la détermination des besoins en eau des cultures, nous avons utilisé la formule de Penman-Monteith développée informatiquement par Martin Smith (1987) qui prend en considération la température, l'hygrométrie de l'air, la vitesse du vent, la durée d'insolation, tandis que le bilan hydrique utilise en plus les précipitations.

Le contrôle du tarissement de l'eau du sol se fait par prélèvement à la tarière agronomique au niveau des parcelles avant le début de la période d'irrigation de complément et durant celle-ci à raison de 2 prélèvements par semaine.

En dehors de la période d'irrigation de complément, les cultures sont conduites en régime pluvial (sans irrigation) sauf pour le traitement témoin conduit sans restriction hydrique en évapotranspiration maximale (ETM) (T5).

Durant la période d'irrigation, les apports se font chaque fois que le tarissement du sol atteint 25% de la réserve utile (RU) qui correspond à 160 et 130 mm/m, respectivement, pour les sols de la station de Oued-Smar et d'El-Harrach.

Au début de la période d'irrigation d'appoint de chaque traitement hydrique, le sol est ramené à la capacité de rétention en 2 à 3 irrigations jusqu'à concurrence de 520 m<sup>3</sup>/ha (tableau VIIIa).

Le contrôle des apports d'eau d'irrigation est réalisé à l'aide d'une citerne à affichage du niveau d'eau pour la station de Oued-Smar et d'un compteur volumétrique à grand débit pour la station de l'INA d'El-Harrach.

| Consommation en eau des différents régimes hydriques (la culture) | Régime hydrique | Espèces et périodes de culture |                |                   |                    |
|---|-----------------|--------------------------------|----------------|-------------------|--------------------|
|   |                 | Haricot 2/5 11/6               | Fois 20/2 30/5 | Féveole 20/2 15/6 | Première 30/2 13/6 |
| Pluie enregistrée   |                 | 119                            | 149            | 160               | 150                |
| Evapotranspiration potentielle (Eto)(mm)                          |                 | 303                            | 380            | 327               | 371                |
| <b>Irrigation permanente (régime d'IM)</b>                        | <b>T1</b>       |                                |                |                   |                    |
| Pluie   |                 | 54                             | 93             | 117               | 98                 |
| Eau perdue en sol (déficit en eau du sol)                         |                 | -                              | 0              | 0                 | 0                  |
| Irrigation de complément (mm)                                     |                 | 151                            | 186            | 210               | 200                |
| Eau totale consommée/cycle végétatif                              |                 | 205                            | 289            | 300               | 298                |
| Consommation en eau relative (ET/ETM)                             |                 | 0                              | 1.00           | 1.00              | 1.00               |
| <b>Irrigation en phase pré-florale (DF)</b>                       | <b>T2</b>       |                                |                |                   |                    |
| Pluie   |                 | 54                             | 93             | 117               | 98                 |
| Eau perdue en sol (déficit en eau du sol)                         |                 | 57                             | 73             | 73                | 55                 |
| Irrigation de complément (mm)                                     |                 | -                              | 13             | 46                | 38                 |
| Eau totale consommée/cycle végétatif                              |                 | 111                            | 138            | 235               | 202                |
| Consommation en eau relative (ET/ETM)                             |                 | 0.58                           | 0.73           | 0.91              | 0.58               |
| <b>Irrigation à la phase de floraison (FL)</b>                    | <b>T3</b>       |                                |                |                   |                    |
| Pluie   |                 | 54                             | 93             | 117               | 98                 |
| Eau perdue en sol (déficit en eau du sol)                         |                 | 52                             | 53             | 72                | 58                 |
| Irrigation de complément (mm)                                     |                 | 54                             | 54             | 40                | 51                 |
| Eau totale consommée/cycle végétatif                              |                 | 159                            | 199            | 229               | 215                |
| Consommation en eau relative (ET/ETM)                             |                 | 0.81                           | 1.05           | 1.01              | 1.06               |
| <b>Irrigation en phase post-florale (CF)</b>                      | <b>T4</b>       |                                |                |                   |                    |
| Pluie   |                 | 54                             | 93             | 117               | 98                 |
| Eau perdue en sol (déficit en eau du sol)                         |                 | 57                             | 58             | 73                | 55                 |
| Irrigation de complément (mm)                                     |                 | 5                              | 54             | 48                | 51                 |
| Eau totale consommée/cycle végétatif                              |                 | 116                            | 204            | 237               | 215                |
| Consommation en eau relative (ET/ETM)                             |                 | 0.75                           | 0.74           | 0.92              | 0.95               |
| <b>Conditions culture pluviale (PC)</b>                           | <b>T5</b>       |                                |                |                   |                    |
| Pluie   |                 | 51                             | 93             | 117               | 98                 |
| Eau perdue en sol (déficit en eau du sol)                         |                 | 58                             | 73             | 72                | 58                 |
| Irrigation de complément (mm)                                     |                 | -                              | 0              | 0                 | 0                  |
| Eau totale consommée/cycle végétatif                              |                 | 110                            | 139            | 189               | 157                |
| Consommation en eau relative (ET/ETM)                             |                 | 0.58                           | 0.54           | 0.97              | 0.43               |

Tableau VIIIa : Bilan hydrique gestion des irrigations de complément (mm)

#### 4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est du type bloc aléatoire avec :

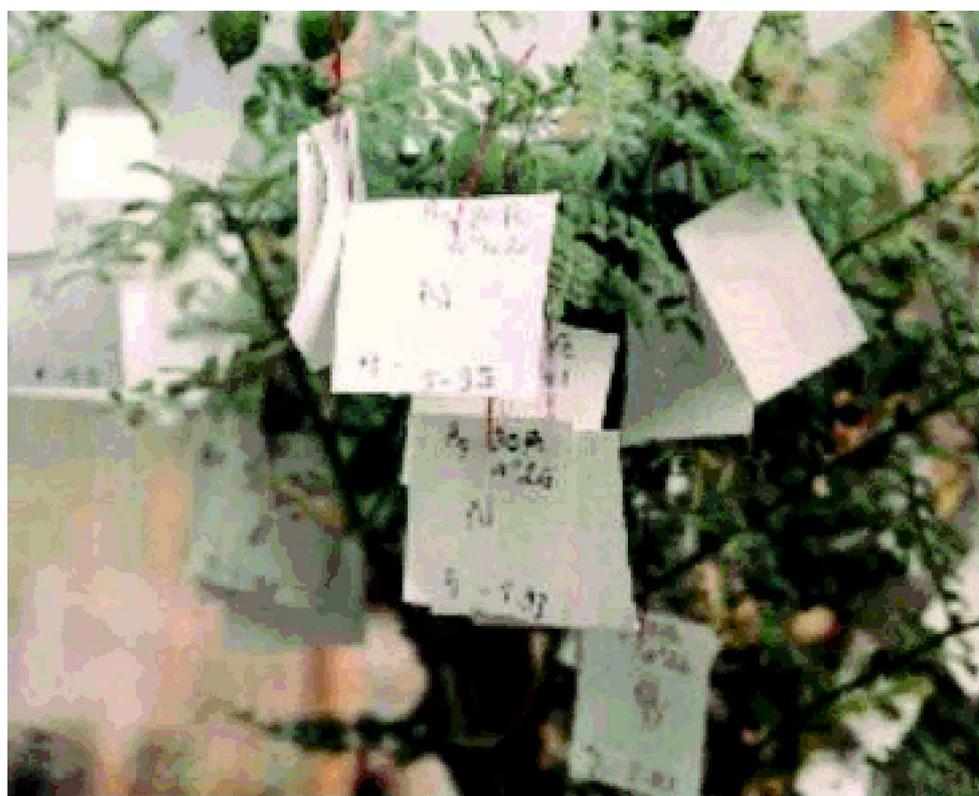
- 4 espèces : *Vicia* (V), *Pisum* (P), *Cicer* (C), *Phaseolus* (Ph), répétés 4 fois et soumises à 5 régimes hydriques ou traitements T1, T2, T3, T4 et T5:
  - T1: correspond à une conduite en culture pluviale (CP) (sans irrigation de complément durant tout le cycle) ;
  - T2: correspond à T1, avec irrigation durant le stade de développement végétatif (DV) ;
  - T3: correspond à T1, avec irrigation durant le stade de floraison (FL) ;

- T4: correspond à T1, avec irrigation durant le stade de développement des gousses et grossissement des graines (GG) ;
- T5: correspond à la conduite en évapotranspiration maximale (ETM) (sans restriction hydrique durant tout le cycle végétatif).

## C. Observations, calculs d'indices, analyse des résultats.

### Marquage des organes fructifères

---



*Planche 1 : Marquage (étiquetage) des organes fructifères du pois chiche, ILC 3279*

Afin d'analyser la sensibilité au stress hydrique des différentes phases phénologiques du haricot, nous avons subdivisé la période de reproduction en sept phases correspondant chacune à un état de développement phénologique de l'organe fructifère et appliqué un stress à chacune de ces périodes. Au début de chaque période de stress, le stade auquel les organes fructifères ont été stressés est noté sur une étiquette individuelle (planche 1 et 2), qui sera maintenue jusqu'à la maturité physiologique de la gousse ou l'avortement de l'organe fructifère marqué (Mouhouche, 1994 ; Mouhouche et al. 1998).

Nous signalons que la méthode de marquage, bien qu'elle soit faite en plein champ, les organes fructifères marqués n'ont pas été utilisés en tant que tels à cause du fait qu'un nombre important d'étiquettes tombées (organes fructifères avortés) ont été mélangées entre les différents traitements ou même complètement transportées par le vent hors de la parcelle expérimentale. Ceci ne nous a pas permis d'étudier les variables relatives au phénomène d'avortement, comme il a été fait pour l'essai sous serre.

Afin de faciliter la compréhension de l'opération de marquage de l'essai en plein champ, nous présentons la chronologie et la méthode utilisée qui est analogue à celle de l'essai sous serre.

Le marquage a été fait au moment de la première irrigation de complément appliquée à chacun des deux traitements ou phases de développement de la période de reproduction [florale (FL), et post-florale (GG)] dans lesquelles on trouve des organes fructifères. Pour les traitements : pré-floral (DV), ETM et SEC, le marquage a été fait au même moment que le traitement FL, puisque le DV ne comporte pas d'organes fructifères au moment de sa première irrigation, le SEC est conduit sans irrigation et l'ETM est irrigué en permanence.

La méthode de marquage des organes fructifères permet d'éviter le phénomène de chevauchement des différentes phases phénologiques durant la période de reproduction d'une même plante. A ce sujet, Deumier (1988) confirme que le découpage de la période de floraison et post-floraison n'est pas idéal à cause de l'existence simultanée sur une même plante d'une multitude d'organes fructifères qui sont à des stades plus ou moins avancés de leur développement. De ce fait, il est inadéquat de considérer que tous les organes fructifères sont au stade de floraison ou de post-floraison.



*Planche 2 : Marquage (étiquetage) des organes fructifères sur haricot, variété Coco de Prague*

## **2. Observations, mesures, calculs d'indices.**

---

Afin d'étudier les effets du stress hydrique sur la production du haricot et sur son efficacité d'utilisation de l'eau, nous avons mesuré les principaux facteurs qui agissent directement ou indirectement sur :

### **2.1. Les besoins en eau de la culture**

Ils sont déterminés par pesée pour l'essai sous serre et en conteneur et par le bilan hydrique pour l'essai en plein champ.

### **2.2. Les variables étudiées**

Les variables étudiées se subdivisent en deux grandes parties :

- les composantes du rendement exprimées en nombre, en poids et celles obtenues

par le rapport de 2 composantes ;

- les autres variables représentées par le phénomène de chevauchement des organes fructifères, l'efficacité d'utilisation de l'eau et l'indice de réponse à la sécheresse.

Les valeurs des variables étudiées sont obtenues :

- soit par marquage individuel des organes fructifères, pour les variables qui s'y prêtent à cette méthode telles que le chevauchement, la probabilité d'avortement, et l'avortement relatif ;
- soit par la valeur moyenne des variables obtenues au niveau de la plante entière de chaque conteneur (essai sous serre) ou au niveau du sillon central de chaque parcelle élémentaire (essai en plein champ). Ces variables concernent toutes les variables autres que le chevauchement et les aspects liés au phénomène d'avortement. Cette dernière (avortement) étant la principale composante du rendement, puisqu'elle représente le complément du taux de nouaison qui est souvent confondu avec le taux de fruits récoltés par rapport au nombre d'organes produit par plante ou par  $m^2$ , si on fait abstraction des phénomènes d'interaction et de compensation entre les composantes du rendement, la production en nombre et en poids de gousses et de graines dépend avant tout de l'importance du phénomène d'avortement.

### 2.2.1. Essai sous serre

A l'exception des variables obtenues par marquage des organes fructifères (chevauchement et phénomène d'avortement), toutes les mesures de l'essai sous serre représentent la moyenne des mesures faites sur le lot des six plantes de chaque traitement, comme il est expliqué dans le paragraphe "dispositif expérimental". Pour une question de facilité de compréhension on a considéré que la valeur moyenne des six plantes représente la valeur par plante de chaque traitement. Le déroulement des opérations de mesure et de comptage se fait comme suit ;

- a/ l'ensemble de la plante (avec ses gousses pleines) de chaque traitement (phase d'application du stress) est séché pendant 24 h à l'étuve à 75 à 80 °C, puis pesé en entier. On obtient la matière sèche totale (MST) ;
- b/ le nombre de gousses par plante (NGo par plante) est obtenu par simple comptage des gousses de chaque traitement ;
- c/ le poids des gousses pleines par plante (PGo par plante) est obtenu par pesée de toutes les gousses du même traitement ;
- d/ le nombre de graines par plante (NGr par plante) est obtenu par le comptage de toutes les graines des gousses de chaque traitement ;
- e/ le poids des graines par plante (PGr par plante) est obtenu par pesée de toutes les graines de chaque traitement.

### 2.2.2. Essai en plein champ

La procédure de mesure et de comptage pour les variables de l'essai en plein champ est identique à celle de l'essai sous serre, sauf que le nombre de plantes prélevées pour l'échantillonnage correspond à quatre mètres linéaires délimités au milieu du sillon central de chaque parcelle élémentaire composé de trois sillons de six mètres, le reste des plantes étant considéré comme bordure. Pour une densité de plantation de 18 plantes par m<sup>2</sup> (féverole) et 30 plantes par m<sup>2</sup> (haricot, pois et pois chiche), le nombre moyen de plantes prélevées pour l'échantillonnage est égal à 50 pour la féverole et 60 pour les trois autres légumineuses.

Le tableau ci dessous résume l'ensemble des mesures et calculs qui permettent d'obtenir les différentes composantes du rendement de l'essai sous serre et en plein champ.

**Tableau VIIIb : Mesures et calculs des composantes du rendement**

| Composante mesurée ou calculée (moyenne par plante ou par m <sup>2</sup> ) | Mode de détermination | Essai sous serre (valeur moyenne par plante)        | Essai en plein champ (valeur moyenne par m <sup>2</sup> )   |
|--|-----------------------|---|---|
| nombre de gousses  | Comptage              | NGo/Pt  | NGo/m <sup>2</sup>  |
| nombre de graines  | Comptage              | NGr/Pt  | NGr/m <sup>2</sup>  |
| nombre de graines par gousse   | Calcul                | $NGr/Go = [(NGr/Pt)/(NGo/Pt)]$                      | $NGr/Go = [(NGr/m^2)/(NGo/m^2)]$  |
| poids de gousses   | Pesée                 | PGo/Pt  | PGo/m <sup>2</sup>  |
| poids de graines   | Pesée                 | PGr/Pt  | PGr/m <sup>2</sup>  |
| poids de graines par gousse  | Calcul                | $PGr/Go = [(PGr/Pt)/(NGo/Pt)]$                      | $PGr/Go = [(PGr/m^2)/(NGo/m^2)]$  |
| poids moyen de la gousse (entière avec grains)                             | Calcul                | $PMGo = [(PGo/Pt)/(NGo/Pt)]$                        | $PMGo = [(PGo/m^2)/(NGo/m^2)]$  |
| poids moyen de la graine   | calcul                | $PMGr = [(PGr/Pt)/(NGr/Pt)]$                        | $PMGr = [(PGr/m^2)/(NGr/m^2)]$  |
| Echantillonnage  | aléatoire             | Moyenne de 6 plantes par traitement (répété 4 fois) | Moyenne de 4 m linéaires par traitement, soit 2.8 m <sup>2</sup> pour la féverole et 2 m <sup>2</sup> pour le haricot, le pois et le pois chiche. Chaque traitement est répété 4 fois |

Pour les variables obtenues par la méthode de marquage, les valeurs obtenues par traitement représente la moyenne des valeurs obtenues dans chacun des 6 plantes sur lesquelles le marquage a été effectué.

### 2.2.3. L'interaction entre les différentes composantes du rendement

(Phénomène de compensation entre composantes) ; particulièrement entre celles exprimées en nombre et celles exprimées en poids qui sont souvent inversement proportionnelles.

### 2.2.4. L'indice de récolte (IR)

Il est déduit par le rapport du poids des graines et de la biomasse totale.

$$IR = [(P_{Gr}/Pt)/(MST/Pt)] \text{ (essai sous)}$$

$$IR = [(P_{Gr}/m^2)/(MST/m^2)] \text{ (essai plein champ)}$$

## 2.3. L'efficience d'utilisation de l'eau (EUE)

L'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) prend en considération la productivité de l'eau totale consommée ou de l'eau d'irrigation pour la production de matière sèche totale (MST) ou de produit commercialisable (gousses et/ou graines). Elle s'exprime par le rapport du poids de la récolte et du poids ou du volume d'eau ayant servi à la production de celle ci.

### 2.3.1. L'eau totale (EUEt)

Elle englobe les précipitations et les irrigations

$$EUEt = Rt/Et$$

### 2.3.2. L'eau d'irrigation (EUEi)

$$EUEi = Ri/Ei$$

- EUEt = efficience d'utilisation de l'eau totale (g/m<sup>2</sup>/mm)
- EUEi = efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation (g/m<sup>2</sup>/mm)
- Rt = récolte totale
- Ri = augmentation de la récolte provoquée par l'irrigation
- Et = eau totale consommée durant le cycle
- Ei = eau d'irrigation

- $EUE = Pr/Ve$ 
  - EUE : Efficience d'utilisation de l'eau ( $kg/m^3$ ),
  - Pr : Poids sec de la récolte (kg),
  - Ve : Volume d'eau consommée pour la production de Pr ( $m^3$ ) par plante, par  $m^2$  ou par ha.

Selon le cas :

- Pr peut exprimer le poids de matière sèche totale (MST) ou le produit commercialisable ;
- Ve peut exprimer le volume d'eau totale consommée (EUEt) ou le volume d'eau d'irrigation (EUEi).

#### **2.4. L'indice de réponse à la sécheresse (IRS)**

Il exprime le degré de réponse à la sécheresse d'une espèce donnée par sa performance de production en conditions de restriction hydrique.

$$IRS = 1 - [Pr(ETR)/Pr(ETM)]$$

- IRS : Indice de réponse à la sécheresse,
- Pr(ETR) : Poids de la récolte du traitement stressé (kg par  $m^2$  ou par plante),
- Pr(ETM) : Poids de la récolte du traitement non stressé (kg par  $m^2$  ou par plante).
- Le poids de la récolte  $P_r$  peut exprimer le poids de matière sèche totale ou le poids de la récolte commercialisable.

Selon la relation ci dessus, une plante est d'autant plus résistante à la sécheresse que son indice est proche de 0. Si la valeur est inférieure à 0, on est en présence d'une espèce plus sensible à l'excès d'eau qu'à un stress de faible intensité (cas des *Phaseolus*).

#### **2.5. La probabilité d'avortement**

La méthode de marquage des organes fructifères et le ramassage quotidien des étiquettes tombées permet d'interpréter l'effet du stress sur le phénomène d'avortement avec un pas de temps de trois à cinq jours, en période estivale et cinq à huit jours, en période hivernale.

Le rapport entre le nombre d'organes fructifères tombés et le nombre total d'organes marqués au début du stress donne la probabilité d'avorter pour un organe stressé pendant une phase phénologique donnée.

- $Pa = Oa/Om$

- Pa : Probabilité d'avortement d'un organe fructifère appartenant à une phase phénologique donnée marqué au début du stress ;
- Oa : Nombre d'organes avortés parmi le nombre total d'organes marqués pour une phase phénologique donnée sur le lot de 6 plantes de chaque traitement (essai sous serre) ou sur les plantes des 4 m du sillon central de la parcelle élémentaire (essai en plein champ);
- Om : Nombre total d'organes marqués (au début du stress) pour une phase phénologique donnée

On considère que Oa ne représente que le nombre d'organes tombés entre la date de marquage (début du stress relatif à la phase phénologique en question) et la date de récolte

## 2.6. Le taux d'avortement relatif

Il représente le rapport des taux d'avortement du traitement stressé par rapport au traitement témoin pour une phase donnée qui s'étale de la date de marquage à la maturité physiologique (valeur obtenue sur 6 plantes ou sur 4 m du sillon central).

Ainsi, la phase la plus sensible sera définie par la plus grande différence d'avortement entre le traitement témoin et le traitement stressé de la même phase.

A la récolte, l'étiquette de la gousse récoltée permet d'avoir les informations nécessaires à l'interprétation des deux facteurs étudiés :

- le facteur stress (F1) ;
- le facteur phases d'application du stress (F2).

## 2.7. Le taux d'avortement journalier

Il représente le nombre d'organes fructifères qui tombent par jour. Il est exprimé en % par rapport au nombre d'organes avortés durant la période de reproduction qui s'étale de la première date de marquage qui correspond à la date de marquage de la phase bouton floral (p1) à la date de récolte (valeur obtenues sur 6 plantes ou 4 m du sillon central). Ainsi, la phase la plus sensible au stress hydrique aura le taux d'avortement journalier le plus élevé.

# 3. Analyses statistiques

---

Nos interprétations statistiques se basent essentiellement sur les résultats d'analyse de variance à deux critères de classification F1 et F2 à l'aide du logiciel Statistica.

## 3.1 Essai sous serre

- Pour le phénomène d'avortement,

- F1 représente 2 traitements (stressé et non stressé).
- F2 représente les 7 phases phénologiques d'application du stress (p1 à p7)

- Pour les composantes du rendement et des indices

On a procédé à un regroupement d'essais qui nous a permis de considérer le facteur F1 (3 années d'expérimentation) et F2 (7 phases phénologiques d'application du stress p1 à p7, plus le traitement non stressé ETM).

### **3.2. Essai en plein champ**

- F1 représente les quatre espèces (haricot, pois, féverole et pois chiche)
- F2 représente les cinq régimes hydriques ou périodes d'apport de l'irrigation de complément (ETM, DV, FL, GG et SEC).

### **3.3. Contrainte pour l'utilisation du logiciel Statistica**

Malgré les nombreux avantages du logiciel Statistica, il n'en demeure pas moins qu'il est pratiquement impossible de mettre les titres en dessous des figures, comme il est de coutume, c'est pour cela que les titres de nos figures sont plutôt en haut qu'en bas des figures.

# TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

## A. ESSAI SOUS SERRE

Les résultats des trois années d'expérimentation nous ont permis d'interpréter les effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les principales composantes du rendement exprimées en nombre, en poids, l'interaction de certaines composantes du rendement exprimées par les indices de production ou production relative, l'indice de réponse à la sécheresse et l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation.

Afin de mettre en évidence le phénomène d'avortement et de chevauchement des différentes phases phénologiques durant la période de reproduction, nous avons étudié la dynamique de développement des organes fructifères par la méthode de marquage du début de la floraison à la maturité physiologique des gousses.

### **1. Le phénomène de chevauchement des phases phénologiques**

---

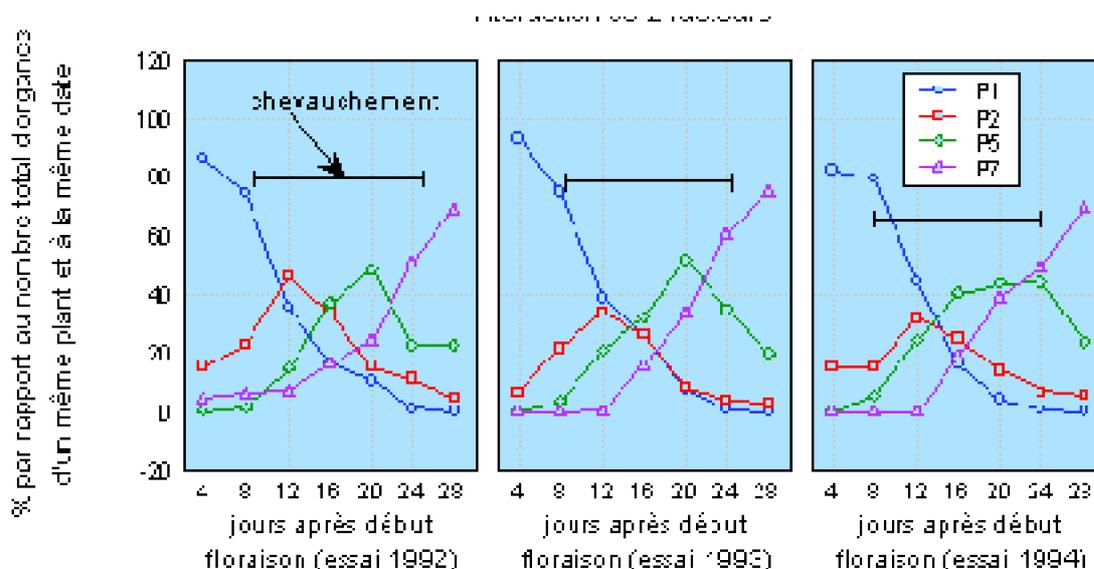
Les résultats obtenus durant les trois essais montrent l'ampleur du phénomène de chevauchement, puisque douze jours après le début de la floraison (phase p2), une

---

plante porte seulement 37% de fleurs épanouies (p2), 40% de boutons floraux (p1) et 20% de gousses en phase de début d'élongation (p4) (fig. 3). La même figure montre qu'un stress appliqué 4 à 8 jours après le début de la floraison n'affecte que 10 à 20 % d'organes à la phase fleur épanouie et plus de 80% d'organes en phase de bouton, par contre au-delà de 24 jours après le début de la floraison il n'affecte, pratiquement aucun bouton floral ni de fleur, en contrepartie, il affecte 20 à 40% de gousses en phase d'élongation et 60 à 80% de gousses en phase de remplissage. Le problème du chevauchement des phases phénologiques des légumineuses alimentaires a été soulevé par différents auteurs, en particulier, Wery et Turc (1990) chez le pois-chiche, Deumier (1988, 1990), Deumier et al. (1991), Jeuffroy et Warembourg (1991), Ney et al (1994) chez le pois, Laurent (1992), et Mouhouche et al. (1998) chez le haricot.

Ceci montre l'intérêt de la méthode de marquage des organes fructifères pour la détermination de la phase phénologique la plus sensible au stress hydrique pour une meilleure maîtrise des irrigations, particulièrement durant la période de reproduction.

L'analyse statistique montre une différence très hautement significative entre les dates de comptage (fig. 3) et non significative entre les 3 essais (annexes a1, a2, a3 et a4).



*Figure 3 : mise en évidence du phénomène de chevauchement des différentes phases phénologiques durant la période de reproduction interaction de 2 facteurs*

A noter que le phénomène de chevauchement est encore plus accentué, pour les ramifications grimpantes, qui ont une durée de reproduction plus étalée (Flor Drees, 1984), et pour les cultures de plein champ, pour lesquelles la date d'apparition de la première fleur est très variable (Laurent, 1992). En effet, il n'est pas rare de trouver sur une même parcelle, des plantes qui sont en "pleine" floraison, alors que d'autres ne présentent que quelques fleurs épanouies. Le stress hydrique étant, souvent la cause de l'hétérogénéité de la mise à fleur au niveau d'une culture (de Balatier, 1987 ; Romic et al, 1994).

Pour les cultures de printemps et d'automne, ce chevauchement est maximum entre

le 10<sup>ème</sup> et le 22<sup>ème</sup> jour après le début de la floraison (fig. 3).

## 2. Effet du stress hydrique sur les composantes du rendement exprimées en nombre

### 2.1. Nombre de gousses par plante, résultat d'avortement des gousses

#### 2.1.1. Avortement naturel

Dans le règne végétal, l'avortement des organes fructifères est un mal obligatoire. En effet, dans toutes les plantes, une partie des organes de reproduction tombent naturellement avant le stade de maturité physiologique, c'est ce que l'on appelle l'avortement naturel. A cela s'ajoute la chute des organes provoquée par un ou plusieurs facteurs externes tels que les stress biotiques ou abiotiques. Ces derniers auront des effets plus ou moins importants selon les conditions environnementales dans lesquelles se trouve la plante stressée.

Le genre *Phaseolus* se caractérise par un taux d'avortement naturel relativement élevé, même en conditions hydriques optimales, puisque la probabilité d'avortement d'un bouton floral non stressé est supérieure à 0.5, en d'autres termes, sur 100 boutons produits, plus de 50 tombent naturellement avant d'arriver au stade de maturité physiologique de la gousse (fig. 4a).

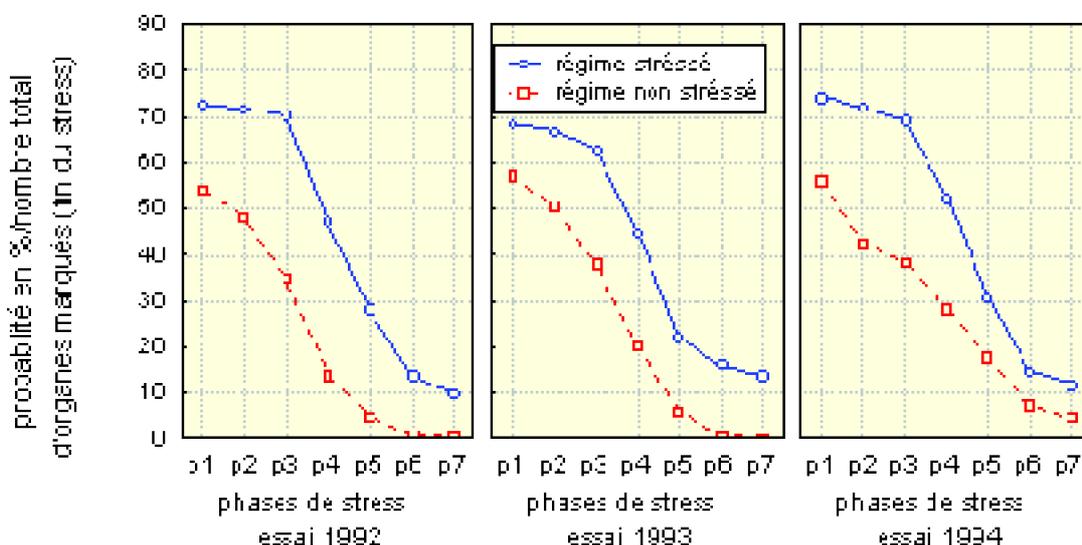


Figure 4 a : mise en évidence de la probabilité d'avortement des 2 régimes hydriques (stressé, non stressé) interaction de 2 facteurs –  $F(12, 126)=1.13$ ;  $p<.3444$

Cette probabilité diminue avec le développement de chaque organe fructifère, pour les trois essais, elle varie de (0.55 à 0.60) pour un bouton floral (p1) à (0 à 0.06) pour une gousse au stade de fin grossissement des graines (fin remplissage) (p7). En conditions de plein champ, Romic et al. (1994) constatent jusqu'à 30% de plantes non productives en

année sèche. Ceci montre l'importance du phénomène d'avortement sur les autres composantes du rendement exprimées en nombre ou en poids, particulièrement le poids et le nombre de gousses et des graines. Exprimé en rythme d'avortement journalier, la chute des organes fructifères est relativement élevée et constante durant la période pré et post-florale (p1 à p3), avec un rythme de 1.30 à 1.45% d'organes par jour. Ce rythme diminue rapidement durant la période d'élongation des gousses (p4 et p5), avec 0.5 à 1% d'organes par jour. Durant la période de remplissage des gousses (p6 et p7), les chutes devient pratiquement insignifiantes (0.14% d'organes/jour). Néanmoins, le rythme d'avortement naturel du traitement non stressé (ETM) de l'essai de 1994 se maintient avec une valeur de 0.45 jusqu'à la phase de fin remplissage (p7) (fig. 4b).

Ceci permet de considérer que la phase limite d'avortement des gousses correspond à la fin d'élongation de celles ci (p5 à p6). Des résultats analogues ont été obtenus sur pois (Ney et al. 1993). En effet, leur date limite d'avortement correspond à 300° C à partir du début de la floraison, ce qui coïncide avec les phases fin p5, début p6. La détermination de la phase limite d'avortement trouve son intérêt dans l'opération de prévision du rendement qui ne peut se faire qu'à partir de cette phase.

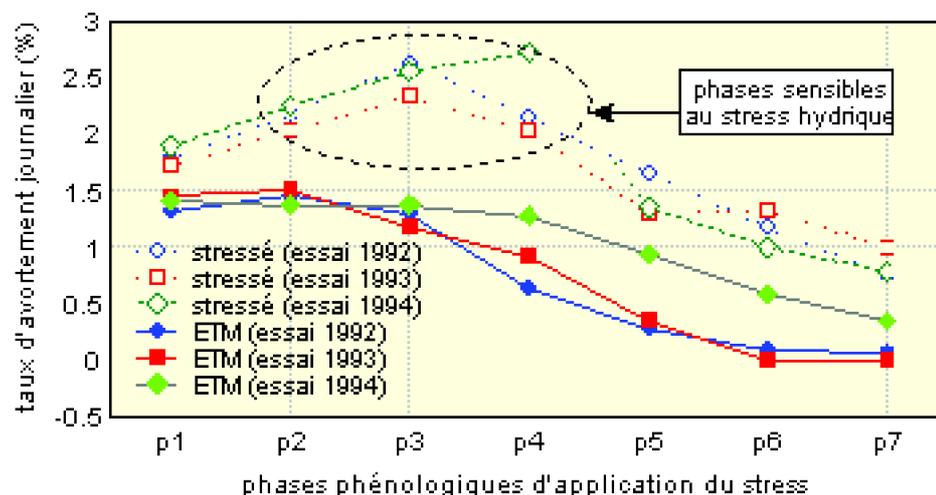


Figure 4b : Effet du stress hydrique sur le taux d'avortement journalier

L'analyse statistique montre une différence très hautement significative pour les 2 facteurs étudiés (phases phénologiques, régimes hydriques) et pour leur interaction (annexe b).

### 2.1.2. Avortement dû au stress

La figure 4a permet de comparer la probabilité d'avortement des plantes stressées et des plantes conduites sans restriction hydrique. On constate que le stress hydrique provoque une augmentation de la chute des organes fructifères. C'est peut être un moyen qu'a la plante pour lutter contre le stress hydrique.

En effet, selon Ney et al. (1994) le pois lutte contre le stress en diminuant le nombre de graines par plante, soit par une diminution de la fertilité des gousses ou par l'avortement des gousses elles même.

Les résultats obtenus montrent que la probabilité d'avortement d'un bouton floral stressé est de 0.69 à 0.74, selon les années, soit une augmentation moyenne de 20% par rapport à un bouton floral non stressé de (Magalhaes et al. 1979 ; Romic et al. 1994).

Pour une plante stressée, le rythme d'avortement journalier est également maximum lorsque le stress est appliqué à la phase nouaison (p3), avec une moyenne de 2.5% d'organes par jour et peut atteindre 2.75%/j pour le traitement stressé à la phase de début élongation (p4) pour l'essai de 1994. Le rythme d'avortement est minimum lorsqu'il est appliqué durant la période de fin remplissage des gousses (0.8% d'organes/jour) (fig. 4b).

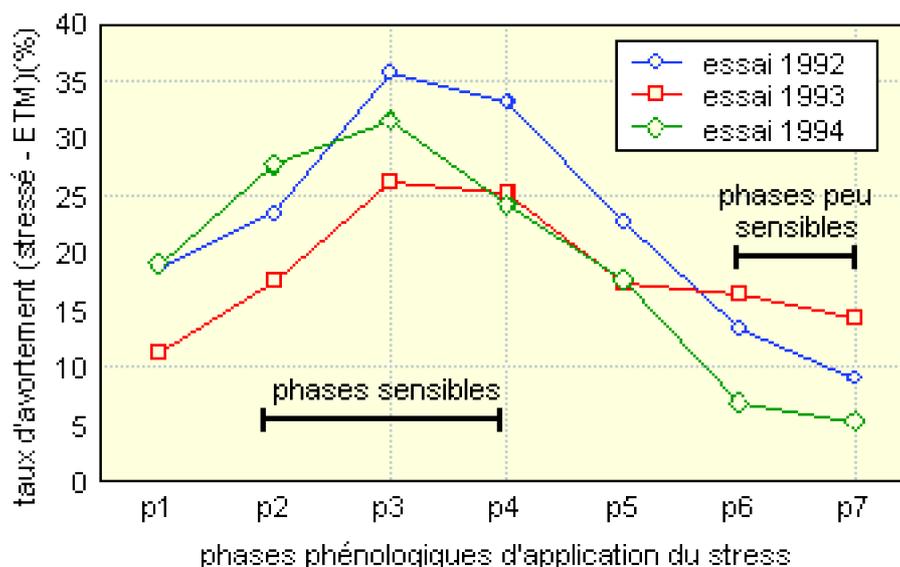


Figure 4c : Mise en évidence du phénomène d'avortement différence par rapport à l'ETM (%) interaction de 2 facteurs –  $F(12,63)=1.92$  ;  $p<.0483$

Exprimé par rapport à la différence avec le témoin non stressé, l'augmentation de la probabilité d'avortement est maximale pour un organe fructifère stressée durant la phase nouaison (p3). L'augmentation varie de 26 à 35% par rapport au traitement non stressé (ETM). Elle n'est que de 5 à 14% pour un stress appliqué à la phase p7 (fig. 4c).

Ceci confirme la phase limite d'avortement des gousses stressées qui correspond à la fin de la période d'élongation de celles ci (p5).

L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre les phases, non significative entre les années et seulement significative pour leur interaction (années X phases) (annexe c).

### 2.1.3. Nombre de gousses par plante (NGo/Pt).

Dans les conditions de restriction hydrique, la composante nombre de gousses par plante (NGo/Pt) est fortement pénalisée, particulièrement lorsque le stress est appliqué en début de phase florale (fig. 5a). Ce résultat est confirmé sur haricot (De Balatier, 1987 ; Acosta Gallegos et Shibata, 1989 ; Fiegenbaum et al. 1991), sur pois chiche (Singh et al. 1987a), sur Soja (Leterme et Merrien, 1991), sur pois (Ney et al. 1993). Jorge Jara (1990) et Laurent (1992) considèrent chez le haricot que le gain de poids (lorsqu'on supprime le

stress) est plus conditionné par le nombre de graines/gousse que par le nombre de gousses par

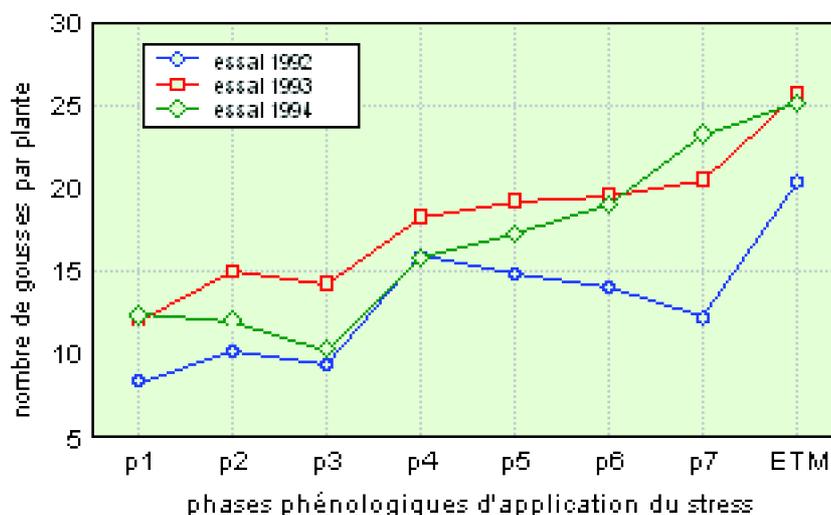


Figure 5a / Effet combiné de l'année et de la phase d'application du stress sur le nombre de gousses par plante interaction de 2 facteurs –  $F(14,72)=1.34$  ;  $p<.2072$

## 2.2. Nombre de graines par gousse (NGr/Go)

Comparée aux autres composantes du rendement, le nombre de graines par gousses (NGr/Go) ou fertilité des gousses semble être très peu sensible au stress hydrique (Jorge Jara, 1990 ; De Magalhaes et al. 1979 ; De Balatier, 1987 ; Laurent, 1992) sur haricot. Les mêmes résultats sont obtenus par Singh et al. (1987a) sur pois chiche, par Deumier (1987) sur pois et par Leterme et Merrien (1991) sur soja.

Le nombre de graines par gousse (NGr/Go) montre trois périodes de sensibilités différentes au stress durant la période de reproduction (fig. 5b).

La première, la plus sensible correspond à la phase nouaison (p3) dans laquelle la production varie de 3.5 à 4 graines par gousse, ce qui représente 83% par rapport à la phase la moins sensible (fin de remplissage p7) et 86% par rapport au témoin non stressé.

La deuxième, de sensibilité moyenne, correspond à la phase florale et pré-florale (p1 et p2) avec un nombre de gousses relatif de 87 et 89%, respectivement par rapport à p7 et au témoin non stressé (ETM).

La dernière période correspond à la période d'élongation et de remplissage des gousses (p4 à p7), qui semble être peu sensible au stress hydrique puisque le taux de fertilité des gousses est, parfois supérieur à celui des gousses issues des traitements non stressés, particulièrement pour les phases p6 et p7 (100 et 103% par rapport à l'ETM) (fig. 5b).

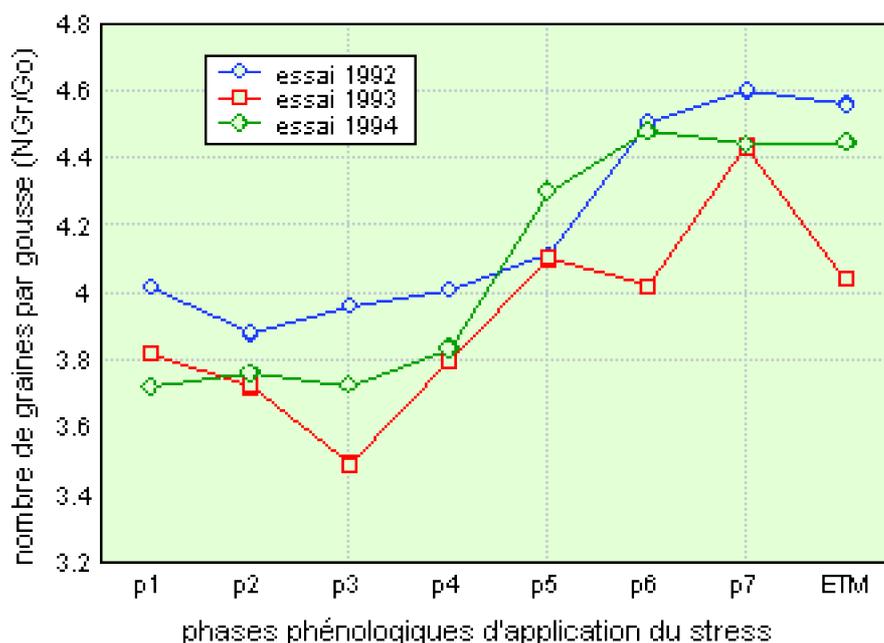


Figure 5b : Effet du stress hydrique sur le nombre de graines/gousse interaction de 2 facteurs –  $F(14,71)=1.22$  ;  $p<.2790$

En résumé, le nombre de graines par gousse est relativement peu affecté par le stress hydrique, puisqu'il ne varie que de moins d'un tiers de sa valeur, alors que le nombre de gousses par plante varie du simple au double. Cette observation est confirmée par les mêmes auteurs que précédemment.

Remarquons enfin que le taux de fertilité des gousses du traitement ETM montre que l'excès d'eau a un effet dépressif sur la composante nombre de graines par gousse (NGr/Go) puisqu'elles produisent moins que les gousses issues des traitements p7 et parfois p6.

### 2.3. Composantes résultantes : nombre de graines par plante (NGr/Pt)

Nos résultats montrent une grande analogie entre les composantes nombre de gousses (NGo/Pt) et nombre de graines par plante (NGr/Pt), sauf pour le traitement p7 de l'essai de 1992 dans lequel le nombre de graines a été nettement plus faible que le nombre de gousses.

Les composantes exprimées en nombre sont d'autant plus pénalisées que le stress hydrique intervient au début de la période de reproduction (phases p1, p2, p3) (Deumier, 1987; 1988 ; Deumier et al. 1990 ; 1991 ; Turc al. 1995, sur pois). Durant ces trois phases, la sensibilité est sensiblement la même (fig. 5a), contrairement à la composante nombre de graines par gousse (NGr/Go), dans laquelle la phase la plus sensible correspond à la phase nouaison (p3) pour l'année 1993 (fig. 5b).

La sensibilité des organes fructifères au stress hydrique diminue avec leur développement. Ainsi, les résultats des trois expérimentations montrent que pour un même taux de tarissement en eau du sol, les plantes stressées à la phase bouton (p1)

subissent une réduction de 7.8 Go/Pt par rapport à ceux stressés durant la phase de fin remplissage des gousses (p7) et 12.8 Go par plante par rapport au traitement témoin non stressé (ETM), soit une production de 58% par rapport à p7 et 46% par rapport à ETM. Au-delà de la phase nouaison (p3), la sensibilité diminue linéairement jusqu'à la phase p7.

Pour l'essai de 1992, on remarque une sensibilité élevée des phases d'élongation et de remplissage des gousses (p5 à p7) (fig. 5c).

Cette augmentation apparente de la sensibilité est probablement provoquée par les conditions climatiques des deux dernières décades du mois de novembre où les moyennes décadaires des températures minimales enregistrées sont extrêmement basses (11 et 7°C), ce qui rejoint les observations de Bouwkamp et Summer (1982) (réduction de la germination du pollen de 45 à 65% pour des températures de 6 à 8°C).

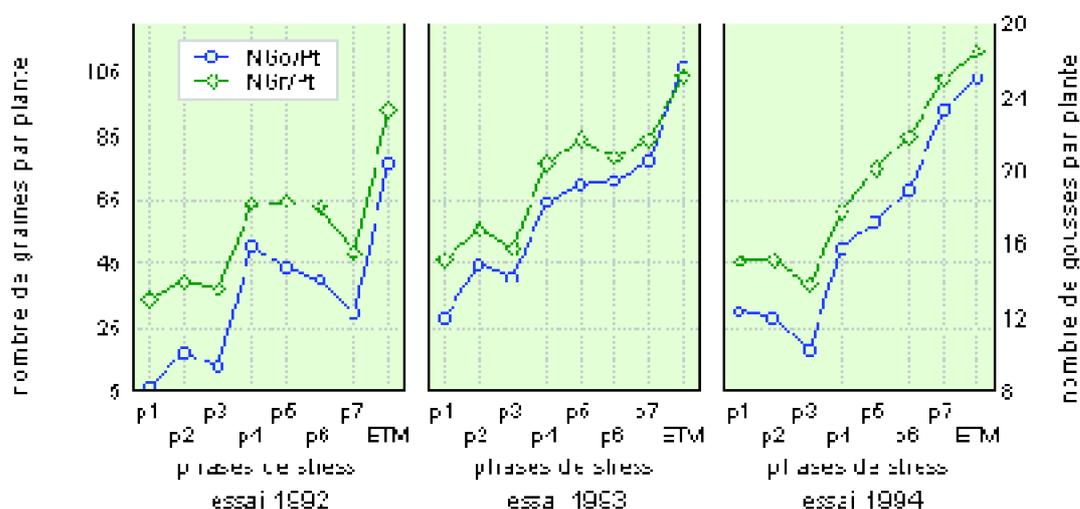


Figure 5c : Effet du stress hydrique sur le nombre de gousses et des graines par plante interaction de 2 facteurs (42,208)=1.42 ;  $p < .0577$

Si l'effet du froid est confirmé pour l'essai de 1992, celui-ci a beaucoup plus d'effet dépressif sur le nombre de gousses par plantes que sur le nombre de graines par gousse, qui n'a été affecté que pour la phase p6 et à un degré moindre à p3 (fig. 5b). Ceci paraît anormal car la plupart des spécialistes (Laurent, 1992, sur haricot ; Deumier, 1988 ; 1990 ; Fougereux et al. 1997, sur pois) considèrent que les composantes exprimées en nombre telles que le nombre de graines par gousse (NGr/Go) se décident bien avant la phase p6. Durant cette dernière se décident plutôt les composantes exprimées en poids, particulièrement le poids moyen de la graine et de la gousse (PMGr et PMGo). Notre résultat qui reste à confirmer permet de poser la question du concept du seuil limite de l'avortement des gousses et celui des graines à l'intérieur de chaque gousse. Ce concept est relativement bien connu pour le pois, le soja et le lupin (Duthion et Pigeaire, 1991) mais il l'est moins pour les autres légumineuses alimentaires.

Les analyses statistiques des composantes exprimées en nombre révèlent l'existence d'une différence très hautement significative entre les deux facteurs (phases, années et leur interaction) pour la composante nombre de gousses par plante (annexe d). Cette différence est non significative pour l'interaction des deux facteurs pour la variable nombre

de graines par plante (annexe e). Pour la composante nombre de graines par gousse, la différence est significative seulement pour le facteur années (annexe f). Ceci confirme le manque de sensibilité de la composante nombre de graines par gousse au stress hydrique.

## 2.4. Effet du stress hydrique sur la production relative

La différence de sensibilité au stress hydrique entre les deux composantes nombre de gousses/Pt et nombre de graines par gousse est confirmée par les figures 6a et 6b puisque pour un même déficit de consommation ( $ETR/ETM$ ) la production relative des gousses ( $N\ Go/Pt(ETR/ETM)$ ) varie de 0.35 à 0.95, soit une différence maximale pour les trois années de 0.60, alors que pour  $N\ Gr/G(ETR/ETM)$  cette différence n'est que de 0.25.

De plus, pour un déficit de consommation de 0.15 par rapport à la réserve utile, la production relative minimale est de 0.35 pour la composante nombre de gousses par plante, alors qu'elle n'est que de 0.85 pour nombre de graines par gousse. Cette dernière semble être peu sensible au stress de faible intensité puisque au-delà d'un déficit de consommation de 0.26 la production relative est égale ou supérieure à l'unité. Cette production varie de 0.65 à 0.95 pour nombre de gousses par plante.

Les figures 6a et 6b montrent une corrélation positive entre le taux de couverture des besoins et la production relative du nombre de graines par gousse et du nombre de gousses par plante, d'une part, et entre la production relative et la phase de développement p1 à p7, d'autre part.

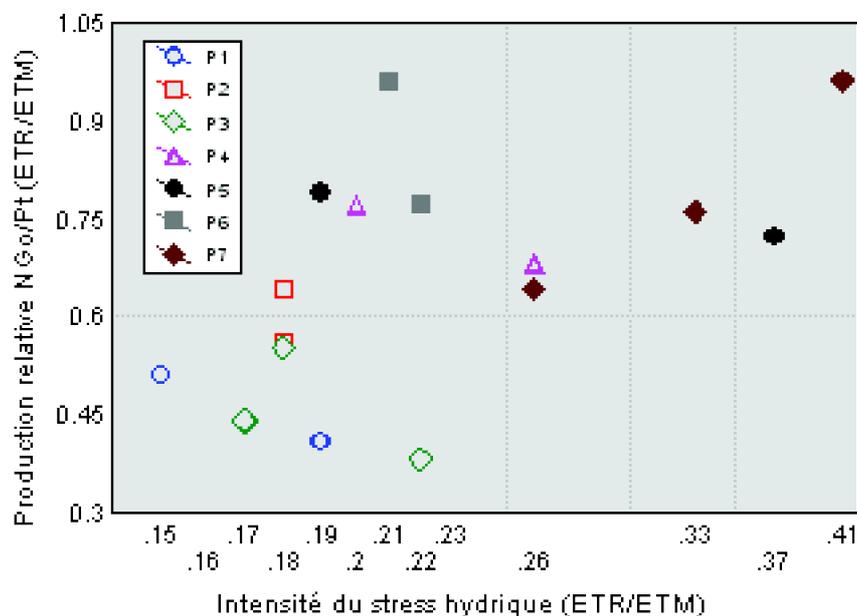


Figure 6a : effet de l'intensité du stress hydrique ( $ETR/ETM$ ) sur la production relative de gousse par plante

Il faut signaler aussi l'existence d'une légère corrélation entre le taux de couverture des besoins ( $ETR/ETM$ ) et la phase de développement phénologique p1 à p7 : le taux de

couverture des besoins est souvent plus élevé à la fin de la période de reproduction qu'à son début.

Ceci peut être expliqué par un flux d'évapotranspiration plus élevé, donc une vitesse de tarissement plus élevée durant les premières phases de reproduction qui correspondent à la pleine floraison qu'à la fin de celle-ci, dans laquelle l'activité physiologique est moins intense, donc une vitesse de tarissement de l'eau du sol plus faible.

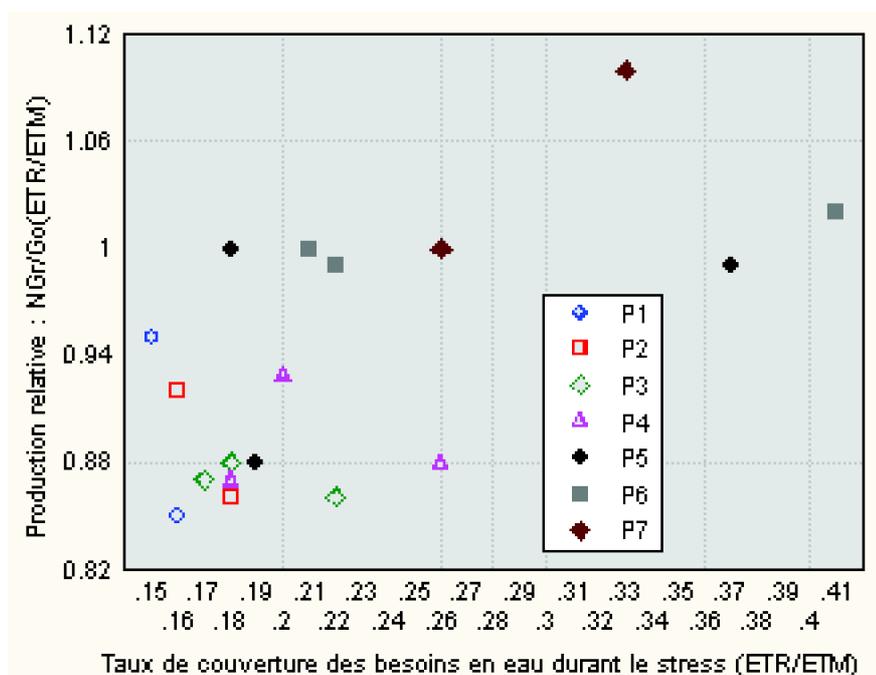


Figure 6b : Effet du stress hydrique (ETR/ETM) sur la production relative de graines par gousse

## 2.5. Discussion sur les composantes exprimées en nombre

Le phénomène d'avortement naturel permet à la plante de s'acclimater à son environnement en se délestant de sa charge fructifère en cas de difficultés, un autre moyen est la mobilisation des réserves de la plante (Ney et al. 1994). Dans la plupart des expérimentations, comme dans les nôtres, le nombre de gousses par plante reste le principal facteur d'adaptation de la plante au stress hydrique.

L'analyse des résultats inter-annuels montre que le nombre de graines par gousse est plus élevé pour l'année 1992 que pour l'année 1993. En contrepartie, le nombre de gousses par plante est plus élevé pour l'année 1993 que pour l'année 1992, (presque pour les sept phases d'application du stress). Ce phénomène se rencontre souvent chez les légumineuses à grosses graines, dans lesquelles l'effet d'un facteur dépressif du milieu provoque des effets de compensation non proportionnels entre les composantes du rendement (Petersen et Davis, 1982, sur haricot), (Deumier, 1988 ; 1990 ; Deumier et al. 1991 ; Ney et Turc, 1994 ; Fougereux et al. 1997, sur pois).

### 3. Les composantes du rendement exprimées en poids

#### 3.1. Le poids des gousses par plante (PGo/Pt)

L'interdépendance des composantes poids des graines et des gousses par plante est mise en évidence par la similitude entre l'allure des courbes des figures 7a (PGo/Pt) et 11a(PGo, PGr et MST) par plante. La réponse des composantes du rendement au stress hydrique (fig. 11a) est pratiquement identique, sauf pour la production du traitement stressé à la phase p7 (normalement la moins sensible) qui a produit 85% par rapport au traitement non stressé (ETM) pour la composante poids de graines par plante, alors que cette production n'est que de 74% pour la composante poids de gousses par plante. Cette différence prouve que la restriction hydrique affecte plus le poids des graines que les gousses entières. En d'autres termes, le stress hydrique agit beaucoup plus négativement sur le poids des graines que sur celui des enveloppes.

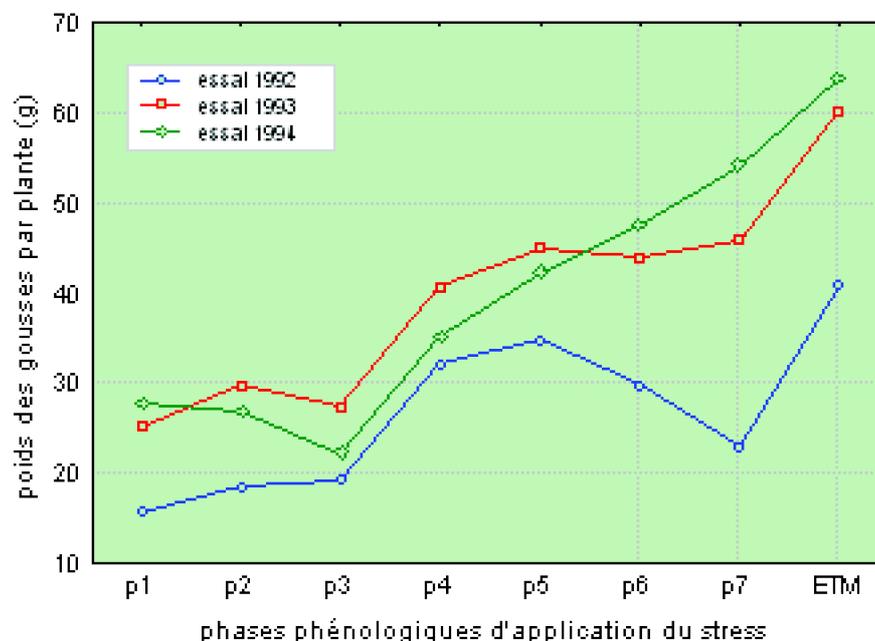


Figure 7a : Effet du stress hydrique sur poids des gousses par plantes interaction de 2 facteurs -  $F(14, 72)=1.94$  ;  $p<.0356$

De plus, le stress final (stress tardif) appliqué après la phase de fin d'élongation des gousses (p5) affecte beaucoup plus la production de graines (91% par rapport à p7) que la production de gousses entières (100%).

Ainsi, pour une récolte destinée à une consommation en vert, la composante principale sera le poids des gousses par plante (PGo/Pt), dans ce cas, les effets dépressifs du stress ne sont pas à craindre après la phase d'élongation des gousses (P5) exception faite pour l'essai de 1992, par contre, pour une récolte destinée à la production de graines sèches, le stress est à craindre jusqu'à la phase de fin remplissage des gousses (p7).

Statistiquement, la différence est très hautement significative entre les phases, les années et significative pour leur interaction (annexe h).

### **3.2. Le poids des graines par gousse (PGr/Go)**

Le taux de fertilité des gousses exprimé en poids (poids des graines par gousse PGr/Go) est considéré parmi les composantes du rendement les moins sensibles au stress hydrique au même titre que le nombre de graines par gousse (NGr/Go), le poids moyen de la graine (PMGr) et de la gousse (PMGo) (Petersen, 1985 ; Fiegenbaum et al. 1991).

Ainsi, le poids des graines par gousses varie de 1.29 g/gousse pour les phases les plus sensibles p1 et p2 de l'essai de 1992 à 1.8 g/gousse aux phases les moins sensibles p5 et p6 de l'essai de 1994, ce qui représente une moyenne sur les trois essais de 82% par rapport à la phase la moins sensible (p5) et 91% par rapport à l'ETM.

Sachant que le poids des gousses et des graines par plante dépendent directement du produit du nombre de gousses par plante et du poids de graines par gousse, ces résultats paraissent contradictoires et quelque peu injustifiés. Ils s'expliquent par le phénomène de compensation entre le nombre de graines par gousse qui augmente lorsque le poids moyen de la graine diminue (fig.15d).

La figure 8 montre que la sensibilité au stress hydrique de la composante poids de graines par gousse diminue avec le développement des gousses. Néanmoins, elle présente deux périodes de plus grande sensibilité au stress. La première s'étale de la période pré-florale à la période post-florale dans laquelle se décident les composantes exprimées en nombre (nombre de graines, nombre de gousses par plante et nombre de graines par gousse). La deuxième correspond à la phase de remplissage des gousses (grossissement des graines) p6 et p7. En effet, une restriction hydrique durant cette période provoque un blocage d'une partie des assimilats, ce qui provoque une diminution du poids moyen de la graine, donc une diminution du poids total de la gousse. Comme nous l'avons signalé ci-dessus, les enveloppes des gousses étant moins sensibles au stress que les graines, ces dernières seront les plus diminuées en poids.

Il faut signaler aussi (fig. 8), que la conduite sans restriction hydrique (ETM) n'améliore pas le poids des graines par gousse, puisque le niveau de production du traitement non stressé (ETM) des trois essais est pratiquement identique à la production des traitements p1, p2 et p3 et même moins pour l'essai de 1993. Par contre, le nombre et le poids des gousses et des graines par plante sont toujours améliorés en conditions ETM (fig. 6a, 6b et 11a). Sur pois, Fougereux et al. (1997) obtiennent une amélioration des principales composantes du rendement en régime ETM.

La comparaison de l'effet moyen inter-annuelle du poids des graines par gousse (PGr/Go) fait ressortir une nette différence entre les trois essais, puisque le poids des graines par gousse varie de 1.38 g en 1992 à 1.62 g en 1994, soit une augmentation de 17.4%. Ceci est probablement dû à un faible poids moyen de la graine pour l'année 1992 (fig. 9), puisque le nombre de graines par gousse est relativement élevé (fig. 5b) mais avec un nombre de gousses par plante faible (fig. 5a et 5c).

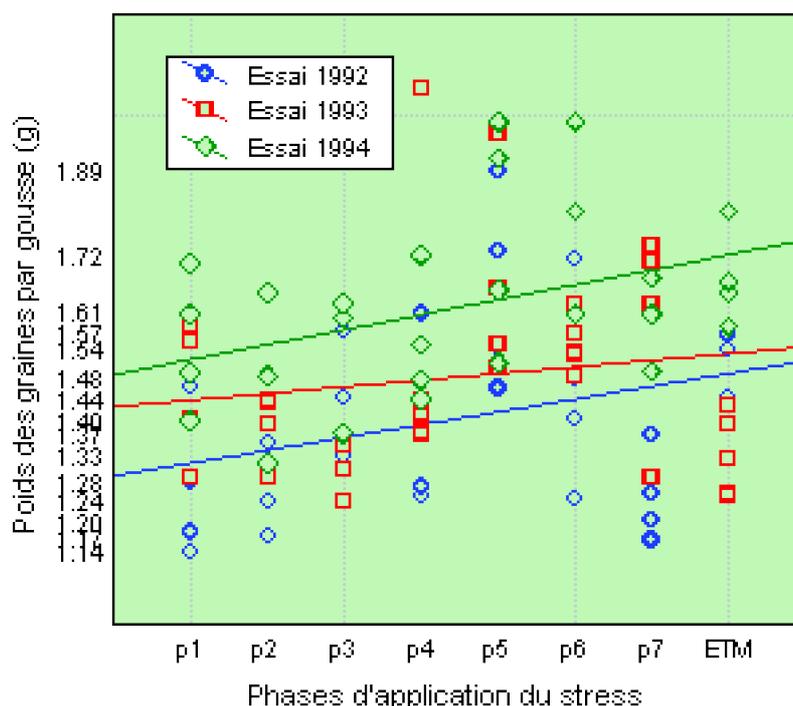


Figure 8 : Effet du stress hydrique sur le poids des graines par gousse (PGr/Go)

Ces différentes contradictions montrent la grande difficulté d'estimer la production d'une légumineuse telle que le haricot en se basant seulement sur une ou deux composantes du rendement sans prendre en considération l'interaction de celles-ci. En d'autres termes, il faut considérer le phénomène de compensation entre les composantes du rendement d'une plante et même entre les plantes cultivées dans une parcelle donnée (nombre de pieds par m<sup>2</sup> et/ou la charge fructifère de chaque plante).

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative entre les années, seulement significative entre les phases et non significative entre les deux facteurs (annexe i).

### 3.3. Poids moyen de la graine (PMGr)

Comparé aux autres composantes du rendement, le poids moyen de la graine (PMGr) semble être très peu sensible au stress hydrique (Petersen, 1985 ; Fiegenbaum et al. 1991) sur haricot, (Kuhad et al. 1990) sur *Vigna*, particulièrement durant la période pré-florale et d'élongation des gousses. Néanmoins, à l'exception de l'année 1992, il semble que sa sensibilité augmente sensiblement lorsque le stress est appliqué durant les phases de remplissage des gousses (p6 et p7) (fig. 9).

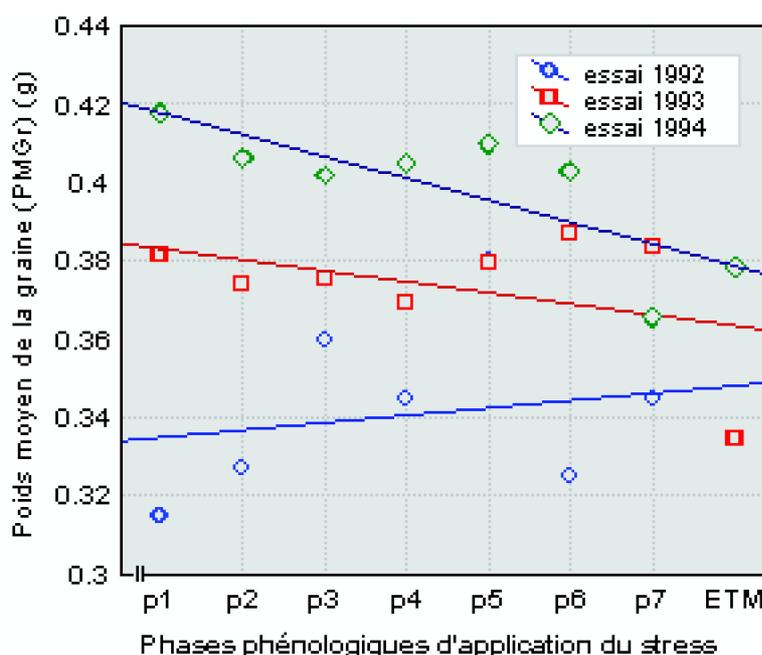


Figure 9 : effet du stress hydrique sur le poids moyen de la graine interactif de 2 facteurs –  $F(14,72)=3.47; p<.0003$

Ce manque de sensibilité est confirmé par l'analyse statistique qui ne montre aucune différence significative pour les facteurs étudiés et leur interaction (annexe j). La comparaison de l'effet moyen inter-annuelle montre une différence relativement faible. En effet, la différence du poids moyen de la graine varie entre 0.34 g et 0.42 g, respectivement en 1992 et 1993 à la phase p1. Cette différence varie de 0.35 à 0.38 à la phase p7 en 1993.

Il faut signaler que le régime hydrique ETM a produit les poids moyens de la graine les plus faibles pour tous les traitements et pour les trois années, avec une diminution moyenne de 5% par rapport à la phase la plus sensible (p7) et 11% par rapport à la phase la moins sensible (p4)

Comme pour les nombres d'organes floraux, la sensibilité des poids par plante est d'autant plus importante que le stress est appliqué durant les phases florales et post-florales (p2 et p3). Au contraire, les poids moyens de la graine et de la gousse sont plus sensibles à la fin de la période de reproduction, particulièrement durant les phases de remplissage des gousses (p6 et p7) (Laupretre et Benoit, 1989, sur haricot, Deumier, 1987 ; Bouthier, 1992a; Bouthier et Gaillard, 1994, sur pois et Leterme et Merrien, 1991 sur soja). En fait, cela montre que les poids d'organes (graines ou gousses) constituent le terme d'ajustement de la plante en cas de stress en fin de cycle, tandis que les poids par plante, résultantes du produit du nombre d'organes et de leur poids moyen sont plus influencés par le nombre, qui reste le terme d'ajustement le plus important.

### 3.4. Production de matière sèche et rendement en grains (poids des graines par plante)

Dans les conditions de restriction hydrique, le poids des graines par plante (PGr/Pt) est

d'autant plus pénalisé que le stress hydrique intervient au début de la période de reproduction (phases p1, p2, p3). Durant ces trois phases, la sensibilité est sensiblement la même (fig. 10),

Au-delà de la période florale et post-florale, la sensibilité des organes fructifères au stress hydrique diminue avec leur développement. Ainsi, les résultats des trois expérimentations montrent que pour un même taux de tarissement en eau du sol les plantes stressées à la phase bouton (p1) ne produisent que 11 à 19 g/plante selon les années, soit une production moyenne sur 3 ans de 51% par rapport à la phase la moins sensible (p7) et 44% par rapport au témoin non stressé (ETM).

Néanmoins, pour l'essai de 1992, on remarque une sensibilité anormalement élevée des phases d'élongation et de remplissage des gousses (p4 à p7).

En effet, la production moyenne des plantes stressées à la phase p7 en 1992 ont produit en moyenne 20 g/plant, alors que les plantes du même traitement (p7) des essais de 1993 et 1994 ont produit respectivement 35 et 38 g/plante, ce qui représente, pratiquement le double. La faiblesse des niveaux de production des phases p6 et p7 est le résultat du nombre réduit du nombre de gousses par plante, comme le montre la figure 5a. L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre les phases, les années et non significative pour leur interaction (annexe g).

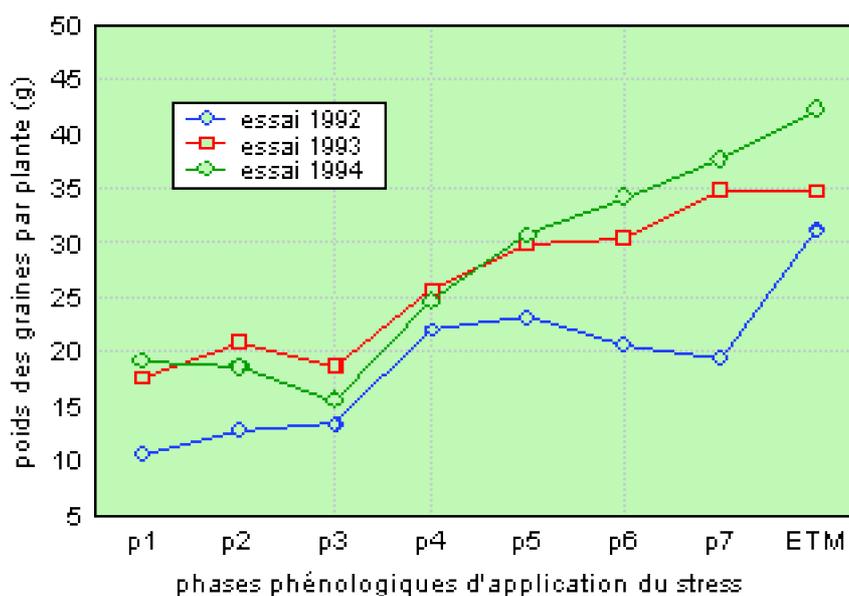


Figure 10 : Effet du stress hydrique sur le poids des graines par plante interaction de 2 facteurs –  $F(14,72)=1.32$ ;  $p<.2167$

La matière sèche totale produite varie de 30 g par plante pour un stress appliqué au stade bouton de l'essai de 1992 à 92 g pour un stress appliqué à la phase p7 de l'essai de 1994. Les plus fortes diminutions de la production sont enregistrées au niveau des traitements p1 et p3, avec 30% de moins par rapport à la phase la moins sensible (p7) et moins 47% par rapport au traitement p8 (ETM) (fig. 10 et 11a).

La figure 11a relative aux composantes exprimées en poids montre une forte similitude entre la production de biomasse et le poids des graines et des gousses.

## Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines

Néanmoins, en 1992, une faible production de biomasse a produit un poids de gousses plus important, contrairement à 1993 et 1994 dans lesquelles une forte production de biomasse a produit relativement moins de gousses.

Ceci est confirmé par la figure 12a dans laquelle l'indice de récolte est généralement plus élevé pour l'année de 1992 pour les sept phases phénologiques, à l'exception du traitement ETM.

De plus, on note une corrélation positive entre la production de biomasse et la production de gousses par plante. Mais, pour une même production de biomasse, le nombre de gousses est plus faible en 1992 qu'en 1993 (Fig. 11b).

Ceci montre qu'il n'existe pas une relation étroite entre biomasse et production de gousses.

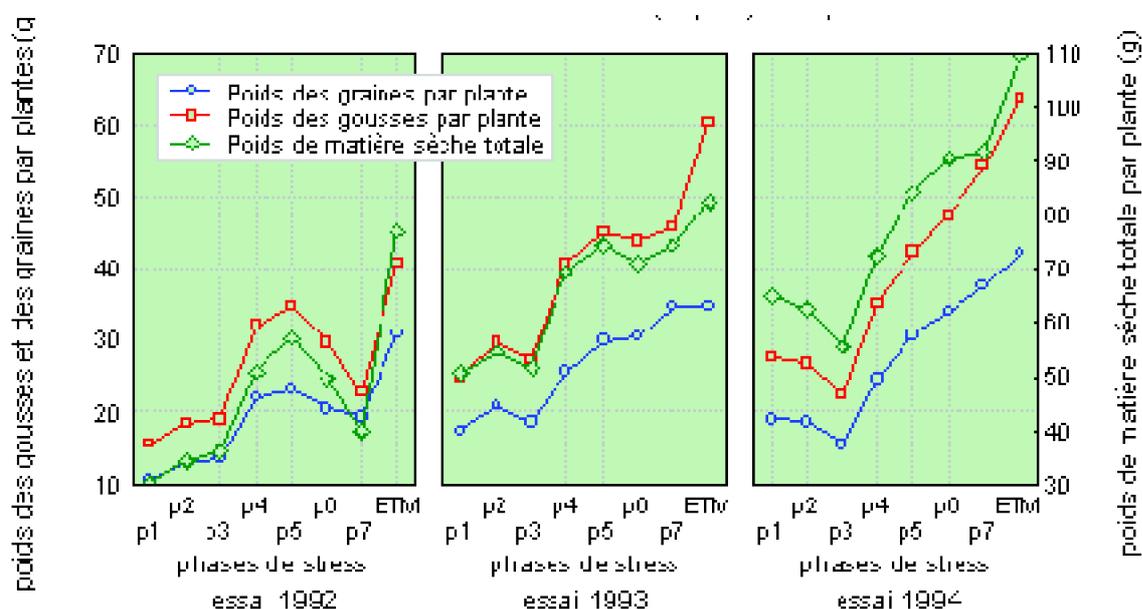


Figure 11a : Effet du stress hydrique sur les composantes exprimées en poids interaction de 2 facteurs – Rao  $R(42,208)=4.40$ ;  $p<.0000$

Pour des conditions expérimentales, pratiquement identiques, les productions peuvent être très différentes entre années. Ainsi, dans la figure 11c, on note une production deux fois plus importante en 1994 qu'en 1992.

Statistiquement, la différence est très hautement significative pour les facteurs années, hautement significative entre les phases et non significative pour leur interaction (annexe k).

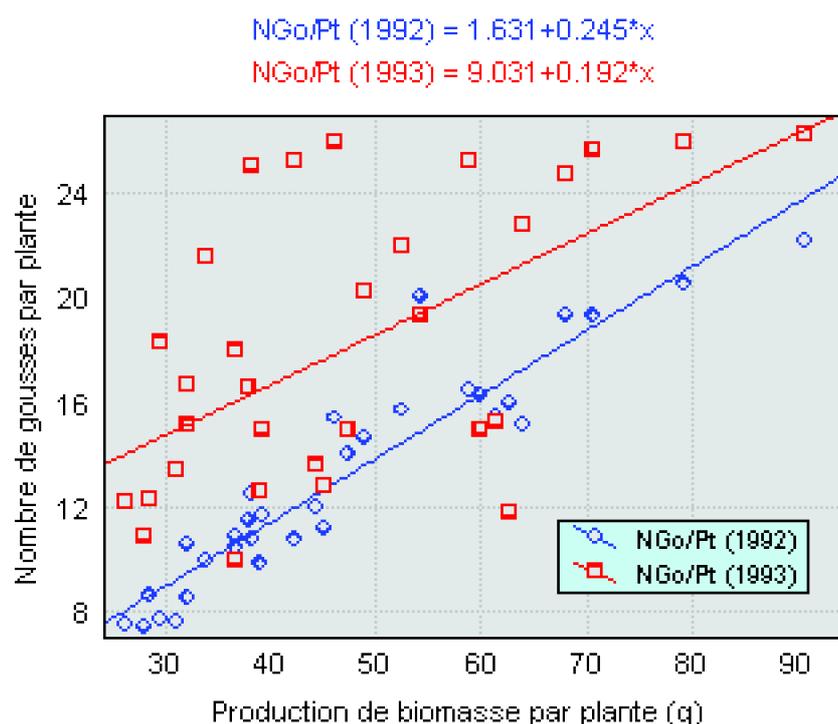


Figure 11b : Relation entre la production de MST et le NGo/PT

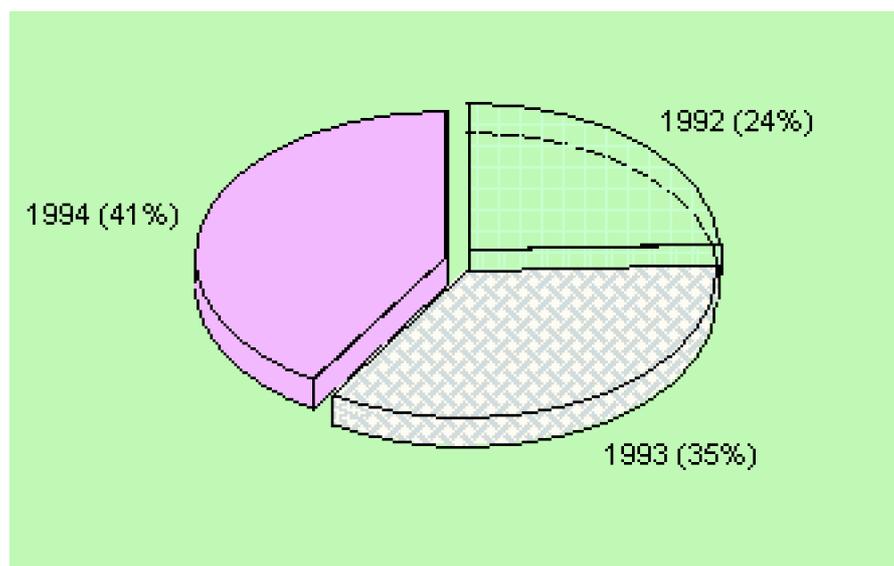


Figure 11c : Effet moyen inter annuel du stress hydrique sur la production de matière sèche totale (g/plante)  $F(2, 14) = 50.66$ ;  $p < .0000$

## 4. Interaction entre les composantes du rendement

### 4.1. Effet du stress hydrique sur l'indice de récolte (IR)

L'indice moyen des trois essais varie de 0.32 pour les phases les plus sensibles p1 et p3 à 0.45 pour la phase la moins sensible p7 (fig. 12a). Ceci est confirmé par l'analyse

statistique qui ne montre aucune différence significative entre les phases, significative entre les années et non significative pour leur interaction (annexe I).

L'eau se comporte comme une lame à double tranchant, son excès peut être aussi néfaste que son manque.

La figure 12a ci dessous met en relief la faiblesse de l'indice de récolte du traitement p8 (ETM) pour les trois essais. En effet, les traitements non stressés ont un indice de récolte de 10% plus faible que celui des traitements stressés à la phase p7. Néanmoins, la production en (poids) du traitement ETM est de loin plus élevée que celle de tous les autres traitements stressés (p1 à p7).

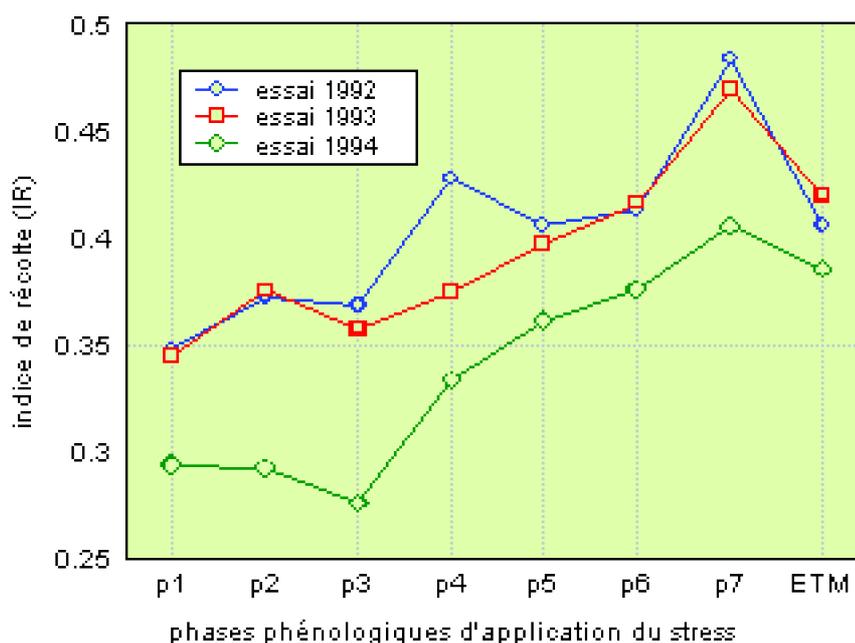


Figure 12a : Effet du stress hydrique sur l'indice de récolte(IR) interaction de 2 facteurs –  $F(14.72)= 57 ; p<.8780$

L'indice de récolte a un comportement différent du rendement ou de la production par plante : en 1992, la production des gousses par plante (fig. 11a) est la plus faible tandis que l'indice de récolte de 1992 est plus élevé (35%) que celui de 1994 (fig. 12a).

L'indice de récolte, comme le poids moyen de la graine, est souvent négativement corrélé avec les autres composantes du rendement (fig. 15c et b).

#### **4.2. Effet du stress hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE)**

La figure 13 confirme la grande sensibilité au stress hydrique des phases phénologiques pré et post-florales. En effet, ces dernières se caractérisent par une mauvaise valorisation de l'eau d'irrigation pour les trois principales variables observées (production de graines, de gousses et de matière sèche).

La comparaison de la productivité de l'eau des différentes phases phénologiques montre que pendant les phases sensibles (p1 à p3) la production de graines est d'environ 0.5 g/litre en 1992 à 1.2 g/litre en 1994.

En 1992 et 93, les phases où l'eau est la plus efficace correspondent aux phases d'élongation des gousses (p4 et p5) et à un degré moindre à p6. En effet, durant ces phases, la productivité de l'eau varie de 1 à 1.4 g/litre en 1992 et 93 pour la production de graines et 2.2 à 2.8 g/litre pour la production de matière sèche totale.

Pour l'essai de 1994, la meilleure efficacité correspond à la phase p7 pour la production de graines et au régime ETM et p7 pour la production de matière sèche totale, avec respectivement 3.5 et 5 g/litre. En fait, ces phases à forte efficacité de l'eau ne doivent pas être automatiquement interprétées comme des phases sensibles mais seulement des phases à croissance rapide de la plante entière, des gousses et des graines. Cheraga et Guetour (1998) montrent une plus forte dynamique de croissance des gousses de haricot durant les phases d'élongation de celles-ci (p4 et p5).

De plus, le régime ETM semble améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau malgré la surconsommation enregistrée durant toute la durée du cycle végétatif de la culture (+ 5000 g d'eau/plante) (tableau V). Ceci montre l'intérêt de bien gérer les irrigations, puisqu'on peut obtenir une meilleure productivité de l'eau même pour les régimes conduits sans restriction hydrique.

Pour des conditions expérimentales analogues, Forster et al. (1995) obtiennent une efficacité d'utilisation de l'eau de 0.25 et 0.62 g/litre pour la production de graines, et 1.8 et 0.2 g/litre pour la production de matière sèche, respectivement entre les traitements les plus stressés et les traitements conduits en ETM

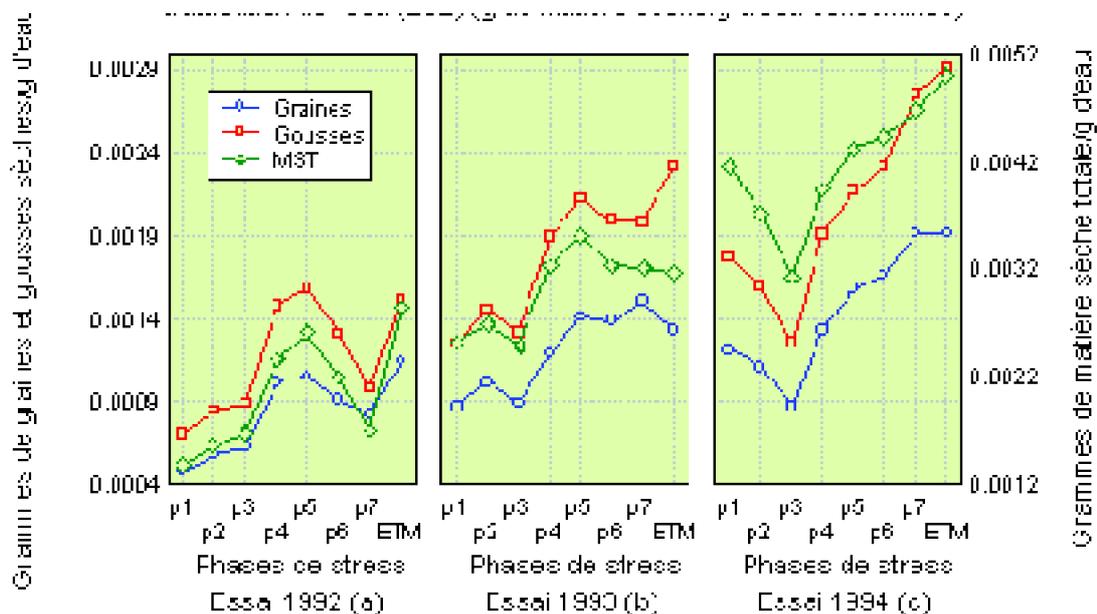


Figure 13 : mise en évidence de l'effet du stress hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) (g de matière sèche/g d'eau consommée)

La comparaison de l'efficacité inter-annuelle montre que celle-ci est meilleure pour l'essai de 1994 dans lequel la production en gousses et en graines a été nettement plus élevée que pour l'essai de 1992. La mauvaise performance de 1992 peut être due avant tout à la période de culture (tableaux IIIb et V). En effet, la période de reproduction de l'essai de 1992 a coïncidé avec le froid du mois de novembre. Les plantes ont donc subi

un stress de basses températures en plus du stress hydrique. Par contre, les essais de 1993 et particulièrement celui de 1994 n'ont subi que le stress hydrique, puisque les températures des mois d'avril et surtout de mai ont tendance à être plutôt élevées que basses, notamment pendant le jour, ce qui a permis aux plantes de mieux exprimer leur potentiel en dehors de la période de stress de chaque phase. De plus, le déficit de consommation durant le stress a varié de 3.6 à 5.4 litres/plante durant les phases d'élongation et de remplissage des gousses pour l'essai de 1992, par contre, pour l'essai de 1994, ce déficit n'a varié que de 1.5 à 3.6 litres/plante. Ce ci est confirmé par un flux d'évapotranspiration plus intense en 1992 qu'en 1994, puisque la consommation ETM cumulée durant le cycle a été de 27 litres/plante en 1992 pour seulement 22 litres en 1994.

Il faut noter la mauvaise performance difficilement explicable de la phase p7 de l'essai de 1992 et p3 de l'essai de 1994 (fig. 13).

La seule explication possible viendrait de la durée du stress de la phase p7 de l'essai de 1992 et p3 de l'essai de 1994. En effet, bien que le taux de tarissement de l'eau du sol des conteneurs durant le stress soit pratiquement identique, la durée du stress a été la plus longue pour p7 (14 jours) et pratiquement la plus longue pour p3 (11 jours) pour 1994. De plus, ces deux phases ont coïncidé généralement avec les périodes froides de chaque essai (tableau V).

L'analyse statistique pour les trois composantes (poids de graines, poids de gousses et MST) révèle l'existence d'une différence très hautement significative entre les années, seulement significative entre les phases et non significative pour leur interaction (annexes m1, m2 et m3).

#### **4.3. Effet du stress hydrique sur l'indice de réponse à la sécheresse**

L'indice de réponse à la sécheresse (IRS) est utilisé pour représenter l'aptitude d'une espèce à maintenir un niveau de production relativement élevé en condition de sécheresse (stress temporaire ou permanent). Cet indice donne la production relative du traitement stressé par rapport au traitement non stressé (ETM).

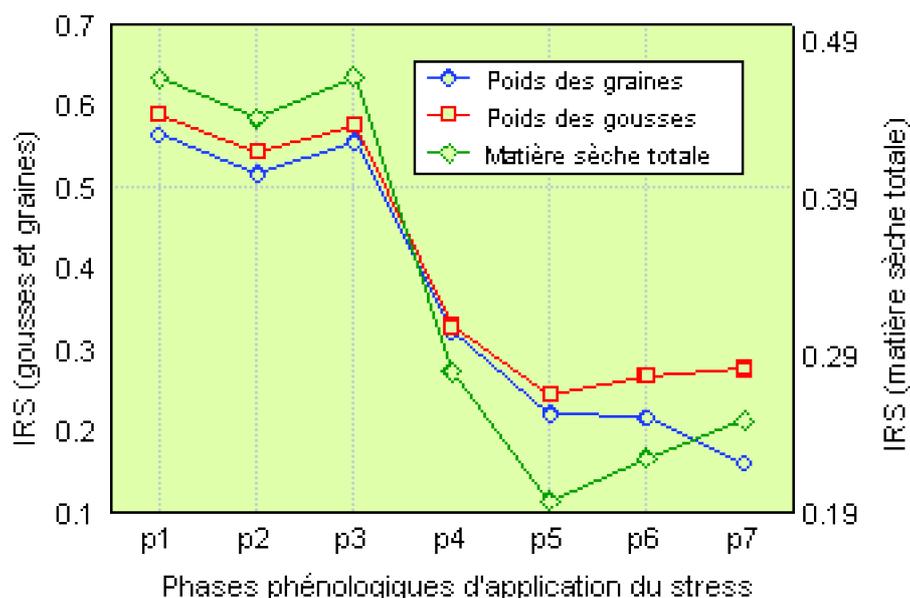


Figure 14a : Effet de la phase d'application du stress sur l'indice de réponse à la sécheresse (IRS) interaction de 2 facteurs –  $(18,28)=4.41$  ;  $p<.0002$

La figure 14a confirme la grande différence de sensibilité au stress hydrique des différentes phases phénologiques, particulièrement entre les phases pré florales (p1 à p3) pour lesquelles l'indice de réponse à la sécheresse (IRS) se situe près de 0.55 pour le poids de graines et de gousses par plante et les phases post-florales (p6 à p7) où l'IRS vaut 0.25 pendant le grossissement des graines. Pour la plante entière, l'IRS varie de 0.46 à 0.2, respectivement pour les phases p1 à p3 et p6 à p7. Sur *Vigna*, Sepaskhah et Liampour (1996) obtiennent des indices qui varient de 0 à 0.76 selon les régimes hydriques.

Concernant la comparaison de l'indice de réponse à la sécheresse inter-annuelle, la figure 14b met en relief la grande différence de sensibilité entre les années de 1992 et 1994 d'une part et 1993 d'autre part. La même figure montre que la production de matière sèche est plus résistante à la sécheresse que les poids de gousses et de graines. De plus, les graines (poids de graines) semblent être plus résistantes à la sécheresse que les gousses entières, sauf pour l'essai de 1992 dans lequel le poids de gousses affiche une plus grande réponse que les composantes poids de graines et MST.

L'analyse de la variance des trois composantes (poids de graines, poids de gousses et MST) montre qu'à l'exception du facteur années de la variable poids de gousses, il existe une différence significative pour les deux facteurs étudiés (années et phases), par contre, cette différence est non significative pour leur interaction (annexes n1, n2 et n3).

Nous signalons la mise en garde faite par Samper et Wayne Adams (1985) quant à la fiabilité aléatoire de la variable poids des graines pour l'étude de l'indice de réponse à la sécheresse du haricot, particulièrement pour les essais multiloaux ou réalisés à des périodes différentes (comme c'est le cas pour nos trois années d'expérimentation). A ce sujet, White et Castillo (1989) considèrent que le rendement potentiel d'une plante dépend avant tous des facteurs environnementaux du milieu dans lequel elle évolue. Ceci

confirme le caractère aléatoire de prendre l'indice de réponse à la sécheresse comme indicateur de résistance d'une plante à la sécheresse.

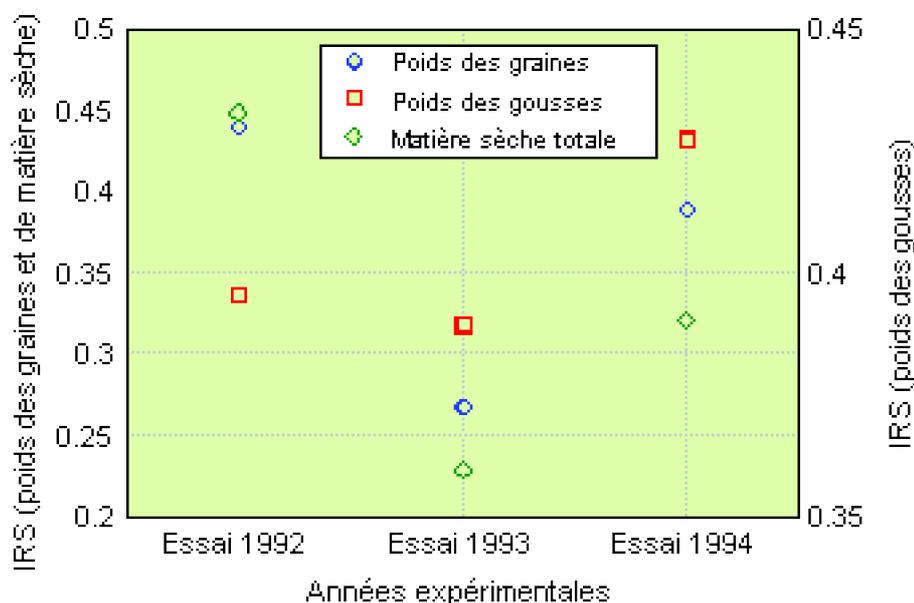


Figure 14b : Effet du stress hydrique sur l'indice de réponse à la sécheresse (IRS) – effet inter-annuel (6,20)=25.19;  $p < .0000$

#### 4.4. Le phénomène de compensation entre les composantes du rendement

Comme toutes les légumineuses, les composantes du rendement du genre *Phaseolus* se caractérisent par un effet de compensation entre les composantes du rendement, suite aux interactions qui se produisent entre les composantes du rendement qui s'élaborent sur une même plante en étant à des phases phénologiques différentes.

L'effet de compensation se caractérise par un coefficient de corrélation négatif entre deux composantes du rendement qui sont sensées être complémentaires. Ainsi, chez les plantes non stressées (ETM), les composantes poids moyen de la graine (PMGr) et le nombre de graines par gousse (NGr/Go) sont négativement corrélées avec le nombre de gousses par plante (NGo/Pt). En d'autres termes, le poids moyen de la graine et le nombre de graines par gousse diminuent lorsque le nombre de gousses par plante augmente (fig.15a et b). Au contraire, le nombre de graines par plante (NGr/Pt) et le poids de graines par plante (PGr/Pt) ne sont que très faiblement corrélés avec le nombre de graines par gousse (NGr/Go).

Les mêmes phénomènes sont observés chez les plantes stressées, dans l'ensemble. Néanmoins, on note une exception pour le nombre de graines par gousses (NGr/Go) et le poids moyen de la graine (PMGr) qui sont inversement proportionnels. De plus, le poids moyen de la graine présente une légère corrélation positive avec le nombre de gousses par plante, ce qui n'est pas le cas pour le régime ETM. Ceci est probablement dû à l'effet du stress hydrique qui provoque une diminution du nombre de graines par gousse lorsque le nombre de gousses par plante reste inchangé ou augmente légèrement, d'où un meilleur développement de chaque graine par manque de concurrence entre les graines a

l'intérieur de chaque gousse (fig. 15c et d). Ceci est confirmé par une corrélation négative entre le nombre de graines par gousse (NGr/Go) et le poids moyen de la graine (PMGr).

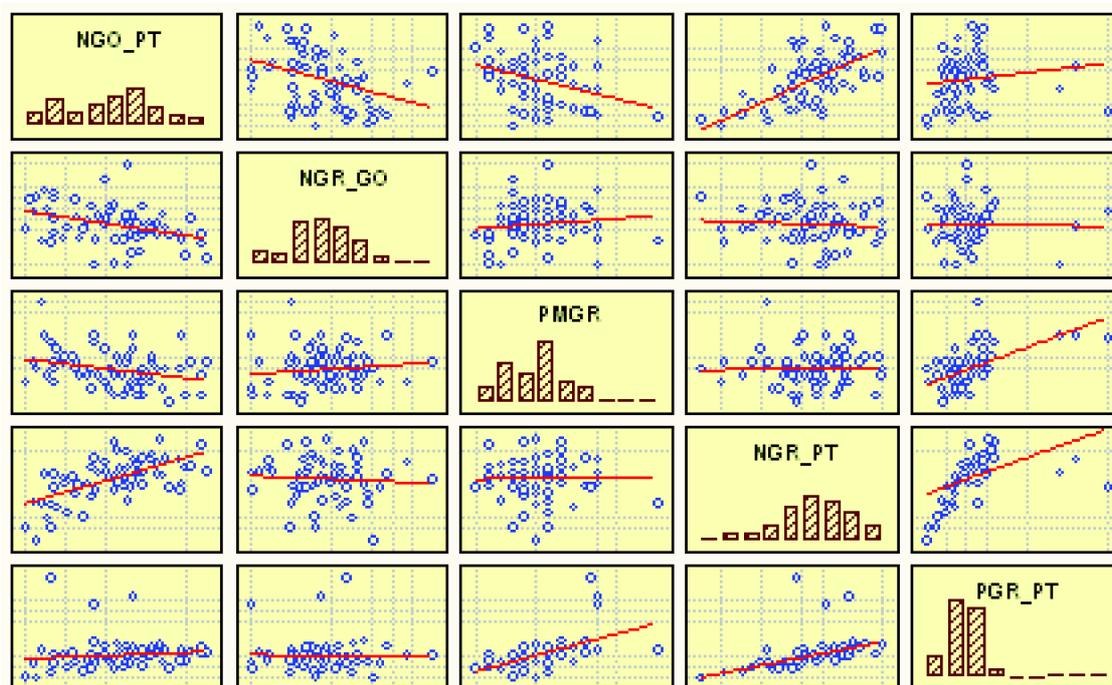


Figure 15a : Mise en évidence du phénomène de compensation entre les principales composantes du rendement (régime ETM)

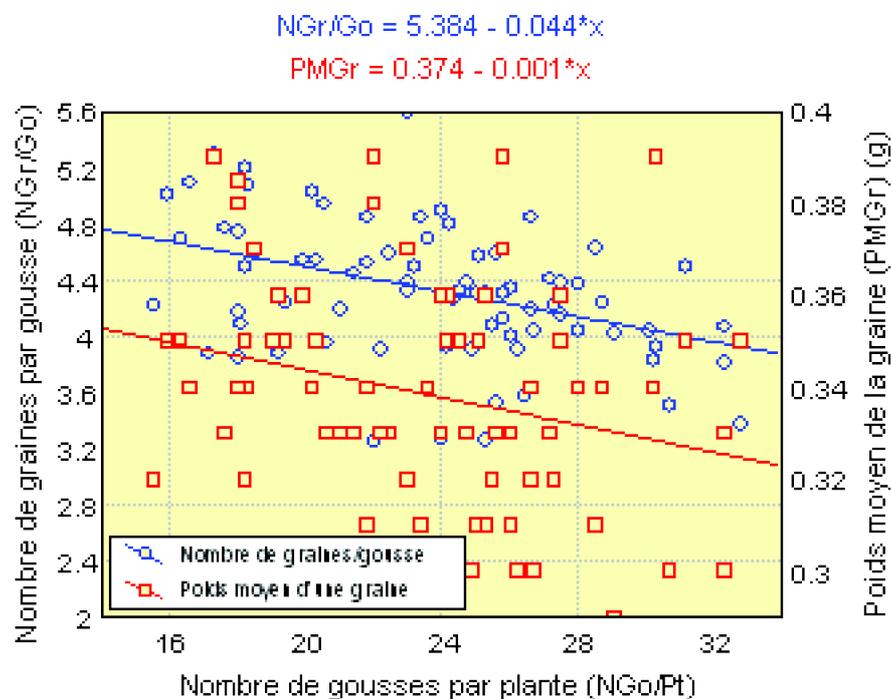


Figure 15b : Mise en évidence de l'effet de compensation entre le NGr/Go, PMGr et NGo/Pt (régime ETM)

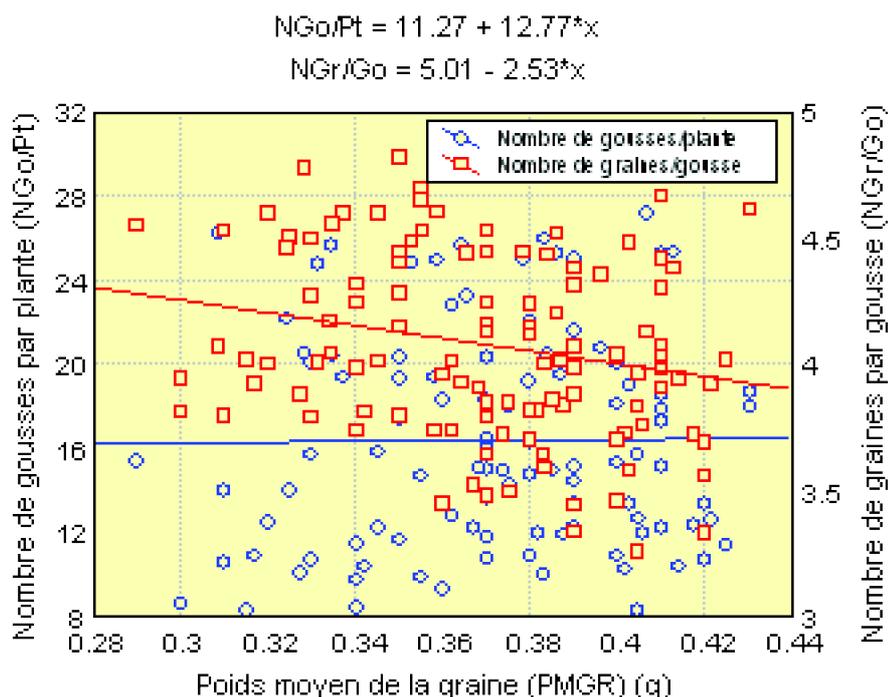


Figure 15c : Mise en évidence du phénomène de compensation entre le  $N\text{Go}/\text{Pt}$ ,  $N\text{Gr}/\text{Go}$  et le  $\text{PMGr}$  (g) (régime stressé)

La figure 15d ci dessous montre une très bonne corrélation entre la production de matière sèche (MST) et la production de graines ( $\text{PGr}/\text{Pt}$ ), d'où la faible corrélation entre les deux composantes qui est représentée par l'indice de récolte (IR).

Ces résultats semblent logiques si l'on considère que chaque plante a un potentiel de production propre pour une composante donnée, si cette dernière s'améliore sans un apport extrinsèque à la plante, cette amélioration se fera aux dépens des autres composantes qui s'élaborent, souvent au même moment du cycle de développement de la plante. On peut résumer de la façon suivante : un développement excessif de la biomasse se fait toujours au dépens des organes fructifères à cause de la compétition trophique entre organes végétatifs et reproducteurs, accentuée éventuellement par une mauvaise répartition de la lumière vers les étages fructifères les plus bas (Wery et Turc, 1990).

L'exemple type du phénomène de compensation est donné par la figure 13d dans laquelle les résultats annuels des trois essais sous serre montrent toujours une augmentation du nombre de graines par gousse ( $N\text{Gr}/\text{Go}$ ) lorsque le nombre de gousses par plante ( $N\text{Go}/\text{Pt}$ ) diminue et vice-versa.

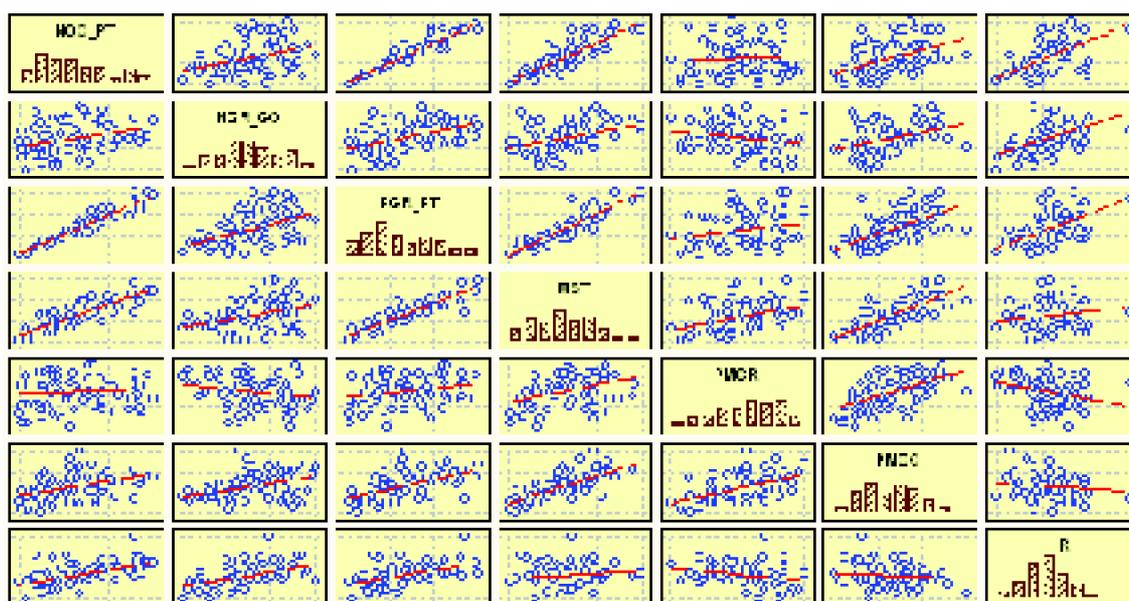


Figure 15d : Mise en évidence du phénomène de compensation entre les principales composantes du rendements (régime stressé)

Il faut signaler aussi que le niveau de compensation dépend aussi des conditions de culture, puisqu'en conditions ETM, le poids moyen de la graine est légèrement corrélé positivement avec le nombre de graines par gousse, alors que ces deux composantes sont négativement corrélées en conditions de stress. De plus, le nombre de graines par gousse et le nombre de gousses par plante sont positivement corrélés en condition ETM et négativement corrélés en conditions de restriction hydrique

Parmi d'autres déjà cités (chapitre étude bibliographique), Ney et al (1994) montrent que le nombre de graines et le poids moyen d'une graine au niveau d'une plante sont inversement proportionnels. Wery (1986) considère également ce phénomène comme une compensation entre certaines composantes du rendement, pour la culture du pois chiche. La baisse du niveau de production d'une composante du rendement est parfois compensée par l'augmentation d'une autre. Sur *Vigna*, Kuhad et al (1990) obtiennent sous stress une diminution de 33 à 52% pour la production de graines par plante, et seulement 4 à 9% pour le poids moyen de la graine. Pour le haricot, de Balatier (1987) et Fédérici et al. (1990) obtiennent même une diminution du poids moyen de la graine pour un nombre de gousse par plante élevé. Sur pois, Fougereux et al. (1997) obtiennent une diminution du poids moyen de graine et du rendement pour une augmentation du nombre d'organes fructifères et du nombre de graines par plante.

## 5. Discussion et conclusion

### 5.1. Discussion

Les résultats obtenus montrent la grande différence de sensibilité au stress hydrique des poids d'organes, en particulier des poids par plante. Ainsi, mis à part le phénomène d'avortement des organes fructifères, qui conditionne simultanément les niveaux de

production en poids et en nombre, toutes les composantes réagissent différemment au stress hydrique selon la phase phénologique de son application, de son intensité, mais très rarement de l'année d'expérimentation.

La comparaison de la sensibilité au stress hydrique des composantes exprimées en poids montre que le taux d'avortement et le poids des graines par plante sont les plus sensibles, avec une chute de production de 69 à 74% pour le premier et 63% pour le second. Contrairement aux variables par plante (poids de graines par plante et poids de gousses par plante, résultantes du produit des poids élémentaires par des nombres), le poids des graines par gousse et le poids moyen de la graine montrent une très faible sensibilité au stress, particulièrement lorsqu'il est appliqué durant la phase pré-florale et d'élongation des gousses.

Apparemment, le stress peut avoir un effet positif sur le poids moyen de la graine, comme le montrent les résultats de l'essai de 1992, dans lequel le poids moyen de la graine a été amélioré d'environ 5% pour un stress appliqué à p3 par rapport à la phase p7. Ceci est probablement dû au fait que le poids des graines et le nombre de gousses par plante a été le plus bas pour un stress appliqué à la phase de nouaison (p3), ce qui a permis une amélioration du poids moyen de la graine aux dépens du nombre de gousses.

En effet, l'analyse des résultats inter-annuels montre que le poids des graines par gousse est plus élevé pour l'année 1992 que pour l'année 1993. En contrepartie, le poids des gousses par plante est plus élevé pour l'année 1993 que pour l'année 1992, (pratiquement pour les sept phases d'application du stress).

Ce phénomène se rencontre souvent chez les légumineuses à grosses graines, dans lesquelles l'effet d'un facteur dépressif du milieu provoque des effets de compensation non proportionnels entre les composantes du rendement (Petersen et Davis, 1982). La diminution du poids des graines par plante causée par le stress, qui a provoqué une diminution du nombre de graines a « permis » au poids moyen de la graine de se maintenir à un niveau relativement élevé.

L'analyse des deux courbes poids moyen de la graine (PMGr) et poids des graines par gousses (PGr/Go) montre des similitudes entre elles, ce qui montre que le poids de graines par gousse, résultat d'un nombre de graines par gousses, puis de leur remplissage est plus influencé par le premier (le nombre, plus variable) que le second (le poids moyen de la graine).

Les effets dépressifs d'un stress hydrique dépendent de la phase phénologique à laquelle il est appliqué. Ainsi, pour la plupart des composantes du rendement les phases les plus sensibles correspondent à la période dite de floraison qui englobe les phases p1, p2 et p3. Néanmoins, les composantes poids moyen de la graine et poids de graines par gousse semblent être aussi sensibles durant la période de remplissage des gousses (grossissement de la graine) qui correspond aux phases p6 et p7.

L'interdépendance des facteurs : efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) et indice de réponse à la sécheresse (IRS) montre l'existence d'une similitude des deux facteurs. En effet, ces deux facteurs sont améliorés avec l'état de développement des organes fructifères. En d'autres termes, en cas de stress hydrique pendant les phases pré-florales ou immédiatement post-florales, la chute de production est plus élevée que pour un même

stress appliqué durant les phases d'élongation et de remplissage des gousses. Ceci est dû à une mauvaise réponse à la sécheresse des premières phases de la période de reproduction par rapport aux phases finales de celle-ci.

Néanmoins, cette sensibilité peut varier d'une année à une autre, comme le montre la figure 14b dans laquelle la résistance à la sécheresse a été plus faible durant les années 1992 et 1994 par rapport à l'année 1993. Ceci montre que l'IRS dépend avant tout des caractéristiques intrinsèques de la variété mais aussi des conditions qui permettent dans certains cas une production relativement importante du traitement ETM par rapport à ETR, ce qui entraîne une production relative (ETR/ETM) faible. De plus, le fait de prendre le résultat moyen du stress appliqué à toutes les phases peut être une source d'erreur. Dans ce cas, il serait préférable d'interpréter l'IRS au niveau de chaque phase phénologique.

### 5.2. Conclusion

Les résultats obtenus durant les trois expérimentations montrent l'importance du phénomène de chevauchement des organes fructifères appartenant à des phases phénologiques différentes sur une même plante durant la période de reproduction.

Le chevauchement est maximum durant les quinze jours qui suivent le début de la floraison. Durant cette période, la présence simultanée d'organes fructifères à des phases phénologiques différentes ne permet pas de définir avec précision la phase phénologique la plus sensible au stress hydrique. Ainsi, en cas de stress, on obtient un effet moyen subit par l'ensemble des organes fructifères présents sur une même plante au moment du stress.

Le marquage systématique des différents organes fructifères au terme de leur période de stress montre une très grande différence de sensibilité de la chute des gousses selon les sept phases phénologiques de la période de reproduction. Les phases les plus sensibles correspondent à la période florale et post-florale (p2 et p3), avec une sensibilité plus accentuée pour la phase nouaison (p3). La période de remplissage des gousses et de maturation (p6 et p7) semble être très peu sensible au stress hydrique, tout au moins pour les composantes du rendement exprimées en nombre.

Concernant la sensibilité des composantes du rendement au stress hydrique, la comparaison de celles-ci montre que la composante nombre de gousses par plante, qui dépend du taux d'avortement, est de loin la plus sensible (Fiegenbaum et al. 1991) sur haricot, (Ney et Turc, 1993) sur pois, avec une réduction de production de la phase la plus sensible (p1) de 42% et 54%, respectivement par rapport à la phase la moins sensible (p7) et par rapport au témoin non stressé (ETM). Pour le nombre de graines par gousses, cette réduction est de 17% et 14%.

La production de gousses par plante et de graines par gousse est d'autant plus élevée que la couverture des besoins en eau durant la période de stress est meilleure (fig. 5a et b). Ceci confirme l'interdépendance qui existe entre le niveau de stress provoqué par un déficit de couverture des besoins en eau et la production de gousses et de graines par plante.

En conditions de restriction hydrique, pour lutter contre le phénomène d'avortement des organes fructifères, les irrigations de complément doivent être concentrées durant la phase de transition fleur épanouie (p2) et nouaison (p3), le maximum de fleurs épanouies correspond à la période de 12 à 24 jours après le début de la floraison pour les cultures de printemps et d'automne, soit une durée moyenne de 12 jours. Cette durée diminue avec les températures élevées (cultures d'été), et augmente avec les températures basses (cultures de printemps et d'automne).

Les résultats obtenus montrent une grande différence de sensibilité au stress hydrique entre le poids élémentaire (de la graine) et les poids résultants (poids de graines par gousse ou par plante). Ainsi, mis à part le phénomène d'avortement des organes fructifères, qui conditionne simultanément les niveaux de production en poids et en nombre, toutes les composantes réagissent différemment (à des degrés différents) au stress hydrique selon la phase phénologique de son application, de son intensité mais très rarement de l'année d'expérimentation.

La comparaison de la sensibilité au stress hydrique des composantes exprimées en poids montre que les poids des graines et des gousses par plante sont les plus sensibles à cause de leur dépendance du taux d'avortement des organes fructifères, du nombre de gousses par plante et du poids des graines par gousse, donc de leur nombre.

Contrairement aux variables intégrées poids de graines par plante et poids de gousses par plante, le poids des graines par gousse et le poids moyen de la graine montrent une très faible sensibilité au stress, particulièrement lorsque celui-ci est appliqué durant la phase pré-florale et d'élongation des gousses. Le stress peut avoir un effet positif sur le poids moyen de la graine, comme le montre les résultats de l'essai de 1994, dans lequel le poids moyen de la graine a été amélioré d'environ 5% par rapport à la phase p7. Ceci est probablement dû au fait que le poids des graines et le nombre de gousses par plante a été le plus bas pour un stress appliqué à la phase de nouaison (p3), ce qui a conduit à un nombre de gousses par plante plus faible, et en bonnes conditions ultérieures, à un bon remplissage, donc à un poids moyen de la graine plus élevé que les autres années.

## **B. ESSAI EN PLEIN CHAMP**

Comme pour le chapitre "A" (essai sous serre), les variables étudiées se résument aux principales composantes du rendement exprimées en nombre, en poids, l'interaction de certaines composantes du rendement exprimées par leurs indices de production ou production relative, l'indice de réponse à la sécheresse et l'efficacité d'utilisation de l'eau totale et d'irrigation.

Le comptage et les mesures des différentes variables de l'essai en plein champ étant faits au niveau de la surface de chaque parcelle élémentaire, l'interprétation des résultats est toujours faite sur la production par m<sup>2</sup>. Contrairement à l'essai sous serre où les résultats sont présentés par plante, car la parcelle élémentaire de l'essai sous serre est

un toujours un même nombre d'individus (moyenne d'un lot de six plantes correspondant aux six conteneurs de chaque traitement avec une densité de une plante par conteneur).

## 1. Effet du régime hydrique sur les composantes du rendement

### 1.1. Les composantes exprimées en nombre

#### 1.1.1. Le nombre de gousses par m<sup>2</sup>

Les composantes exprimées en nombre ont leur importance au même titre que celles exprimées en poids, néanmoins, certaines espèces telles que le pois chiche produisent naturellement un nombre important de gousses qui portent en moyenne moins d'une graine par gousse.

Pour cela, il est plus logique de prendre comme référence le nombre de graines par m<sup>2</sup> qui représente le produit commercialisable recherché par l'agriculteur.

En ce qui concerne l'effet des phases d'irrigation sur les composantes du rendement exprimées en nombre, à l'exception du régime ETM qui a produit un maximum et le sec qui a produit un minimum de graines et de gousses (156 et 50 gousses par m<sup>2</sup> pour le haricot), on note un meilleur effet de l'irrigation apportée à la phase de grossissement des graines (GG), particulièrement pour le pois et la féverole qui ont produit respectivement 150 et 166 gousses par m<sup>2</sup> (fig. 17).

Il est à signaler le nombre élevé de gousses produites par le pois chiche. Cette performance n'est pas due à une meilleure réponse de la phase GG mais à un caractère intrinsèque de l'espèce *Cicer* qui produit beaucoup de graines par rapport aux autres légumineuses avec moins d'une graine par gousse

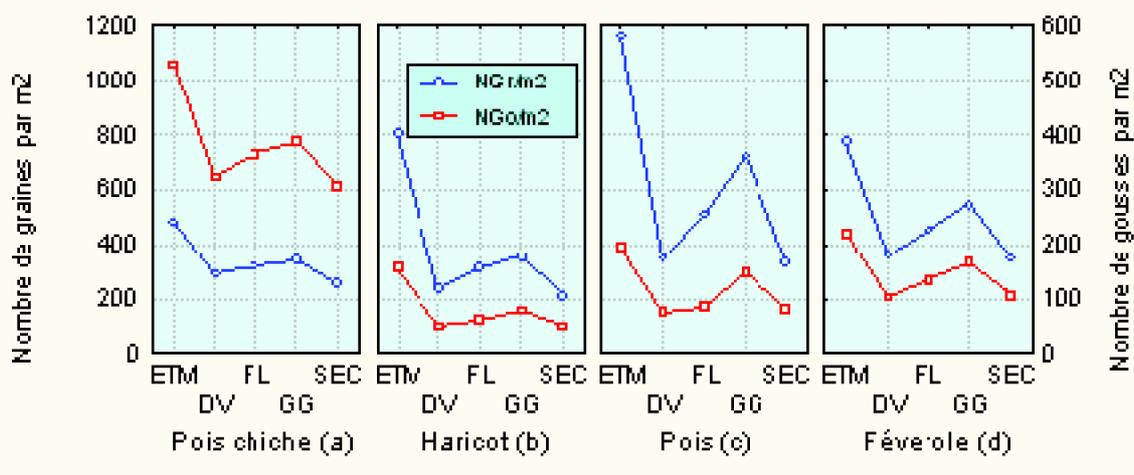


Figure 16 : Effet de la phase d'irrigation de complément sur les composantes du rendement exprimées en nombres  $F(24,116)=13.42$  ;  $p<.0.000$

#### 1.1.2. Le nombre de graines par m<sup>2</sup>

Si on considère l'effet des cinq régimes hydriques sur le nombre de graines par m<sup>2</sup>, on remarque, selon les figures 16 et 17 que le pois produit nettement plus que les trois autres espèces, avec 1160 graines par m<sup>2</sup>, pour seulement 486, 801 et 775, respectivement pour le pois chiche, le haricot et la féverole conduits comme témoins en ETM.

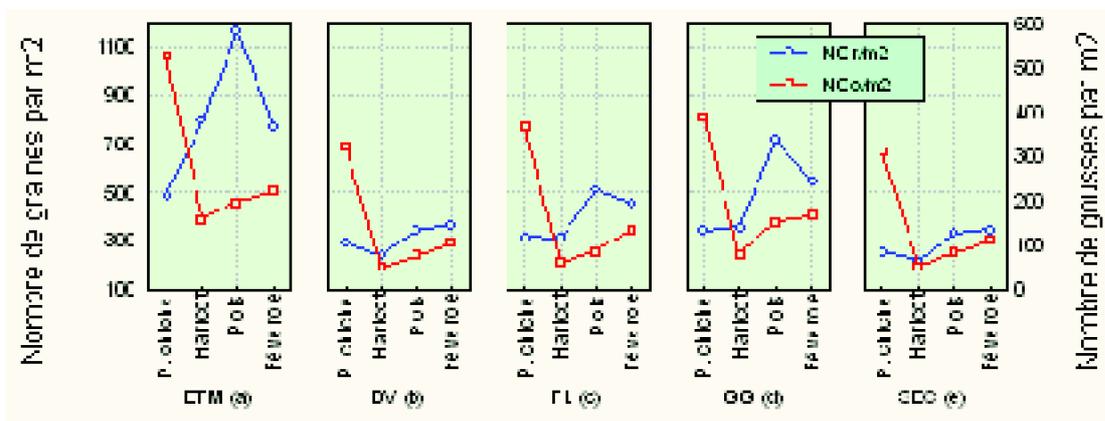


Figure 17 : Effet de la phase d'irrigation sur les composantes du rendements exprimées en nombre  $F(24,118)=13,42 ; p<0.000$

En culture pluviale, le pois produit plus que le pois chiche et le haricot mais légèrement moins que la féverole, ce qui prouve sa plus grande sensibilité au déficit hydrique, puisque sa production représente 28% par rapport au traitement T1 (ETM) et 46% par rapport au traitement T4 (GG).

Sous irrigation de complément, le pois et la féverole ont mieux valorisé l'eau avec respectivement 720 et 550 graines par m<sup>2</sup> pour une irrigation à la phase GG.

La figure 17 confirme l'interdépendance qui existe entre les composantes Nombre de graines et Nombre de gousses par m<sup>2</sup>. En effet, l'allure de la courbe de production de gousses est analogue à celle de la production de graines, ce qui est logique puisque le nombre de graines par m<sup>2</sup> dépend avant tout du nombre de gousses et à un degré moindre du nombre de graines par gousse.

Il faut signaler que le pois chiche a produit moins de graines que de gousses par m<sup>2</sup> puisque son taux de fertilité (nombre de graines par gousse) est inférieur à un.

### 1.1.3. Le nombre de graines par gousse

Une irrigation de complément durant la phase de grossissement des graines (GG) semble améliorer le nombre de celles ci (fig. 16 et 17), sans pour autant améliorer leur taux de fertilité (nombre de graines par gousse). Par contre, une irrigation durant la phase floraison (FL) et pré-florale (DV) améliore sensiblement le taux de fertilité des gousses (Nombre de graines par gousse) (fig. 18). Les mêmes résultats sont obtenus par Mouhouche et al. (1998) sur haricot.

En effet, dans ce cas l'apport d'eau coïncide avec la phase d'initiation des organes fructifères et leurs ovules qui constituent les futures graines. La figure 18 met en relief l'importance des irrigations de complément, puisque le meilleur taux de fertilité est enregistré au niveau du traitement FL pour le haricot et le pois avec respectivement 5.2 et

6 graines par gousse.

La meilleure fertilité des gousses du pois chiche et de la féverole est obtenue avec le traitement ETM et à un degré moindre avec le traitement DV.

Les résultats obtenus pour la composante nombre de graines par gousse montrent l'intérêt d'une bonne maîtrise de la période d'apport d'eau, puisqu'une irrigation à la phase FL a permis d'obtenir une plus grande fertilité des gousses que le régime ETM, particulièrement pour le haricot et le pois.

Les analyses statistiques des composantes exprimées en nombre (nombre de graines, des gousses par m<sup>2</sup> et nombre de graines par gousse) montrent qu'à l'exception du facteur régime d'irrigation de la composante nombre de graines par gousse, les traitements des deux facteurs F1, F2 et leur interaction sont très hautement significatifs (annexes p1, p2 et p3).

## 1.2. Les composantes exprimées en poids

L'étude comparée de la production en poids de gousses, bien qu'elle soit difficile à faire à cause de l'intérêt stratégique et nutritionnel de la récolte de chacune des quatre espèces à cause de leur destination. En effet, certaines sont exclusivement destinées à l'alimentation humaine, telles que le pois chiche et le haricot, alors que d'autres sont cultivées à double fin ou exclusivement pour l'alimentation animale (le pois et la féverole). De plus, certaines espèces peuvent être consommées sous forme de gousses à l'état frais, alors que d'autres ne se consomment qu'à l'état sec (cas du pois chiche). De ce fait, la notion de rendement économique n'aura d'intérêt que sur la base du prix de vente du produit récolté.

Néanmoins, d'un point de vue expérimental, la comparaison peut toujours être faite, particulièrement pour le choix de telle ou telle espèce en fonction du but recherché par les producteurs de légumineuses alimentaires à grosses graines, notamment en conditions de restriction hydrique, dans lesquelles le choix est conditionné par le ou les espèces qui valorisent au mieux l'eau consommée par la culture.

### 1.2.1. Le poids des gousses par m<sup>2</sup>

La figure 19 met en relief l'importance de l'interaction des deux facteurs (F1 et F2) sur la production de gousses à l'état sec. Ainsi, à l'exception des deux témoins (ETM et SEC) qui ont enregistré la plus grande différence pour les quatre espèces, la plus grande production est obtenue par la féverole irriguée à la phase GG (360 g par m<sup>2</sup>). La plus faible production est enregistrée par la phase DV du haricot (77 g par m<sup>2</sup>), ce qui représente une production de 21% et 15% par rapport à GG et ETM de la féverole.

La faiblesse du niveau de production de la phase DV du haricot est probablement accentuée par le fait que ce traitement T2 (DV) n'a pas bénéficié de l'irrigation de complément, suite à une forte pluie enregistrée juste avant le début de la phase DV (tableau VI).

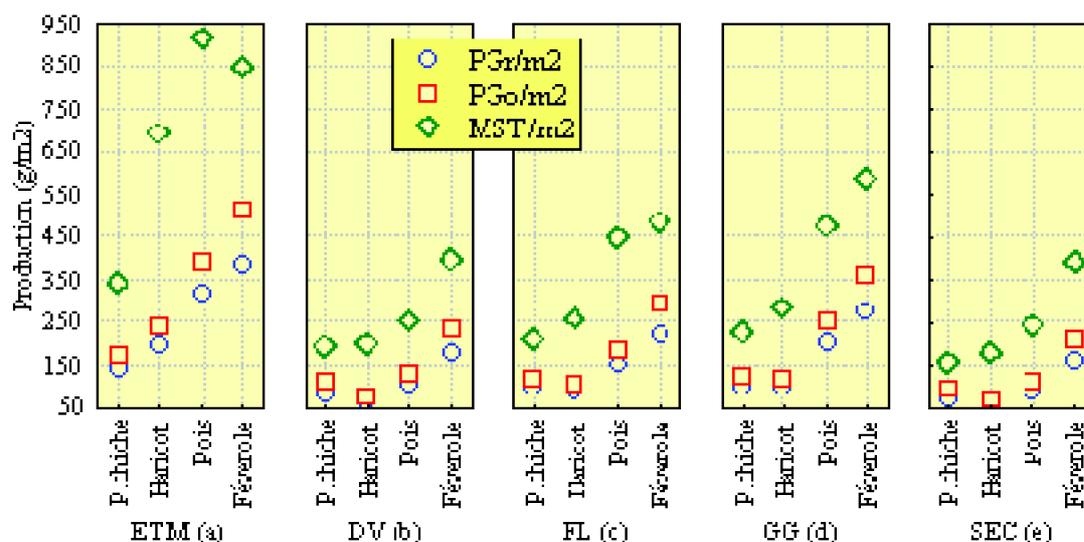


Figure 19 : Effet de l'irrigation de complément sur les composantes du rendement exprimées en poids par m<sup>2</sup>  $F(36,172)=9.20$  ;  $p<0.000$

### 1.2.2. Le poids des graines par m<sup>2</sup>

L'interdépendance qui existe entre le poids et le nombre de gousses et des graines montre une grande analogie entre la courbe de production des gousses et des graines

Pour le facteur espèce, on constate que la féverole et le pois produisent toujours plus que le haricot et le pois chiche, avec 383 et 321 g par m<sup>2</sup> de graines (sèches) pour la féverole et le pois et seulement 196 et 138 g par m<sup>2</sup> pour le haricot et le pois chiche conduits en ETM. La production du régime pluvial varie de 161 à 56 g par m<sup>2</sup>, respectivement pour la féverole et le haricot, soit une différence de 350% entre les deux espèces (fig. 19 et 20).

Pour les traitements conduits sous irrigation de complément (T2, T3, et T4), le meilleur poids des graines est enregistré chez la féverole avec 270 g et 99 g pour le haricot et le pois chiche. Forster et al. (1995) obtiennent pour le haricot 75 g de graines/m<sup>2</sup> pour le régime pluvial et 125 g par m<sup>2</sup> pour le traitement conduit sans restriction hydrique. Sur fève Pilbeam et al. (1990) montrent l'importance des irrigations de complément pour l'amélioration des composantes du rendement.

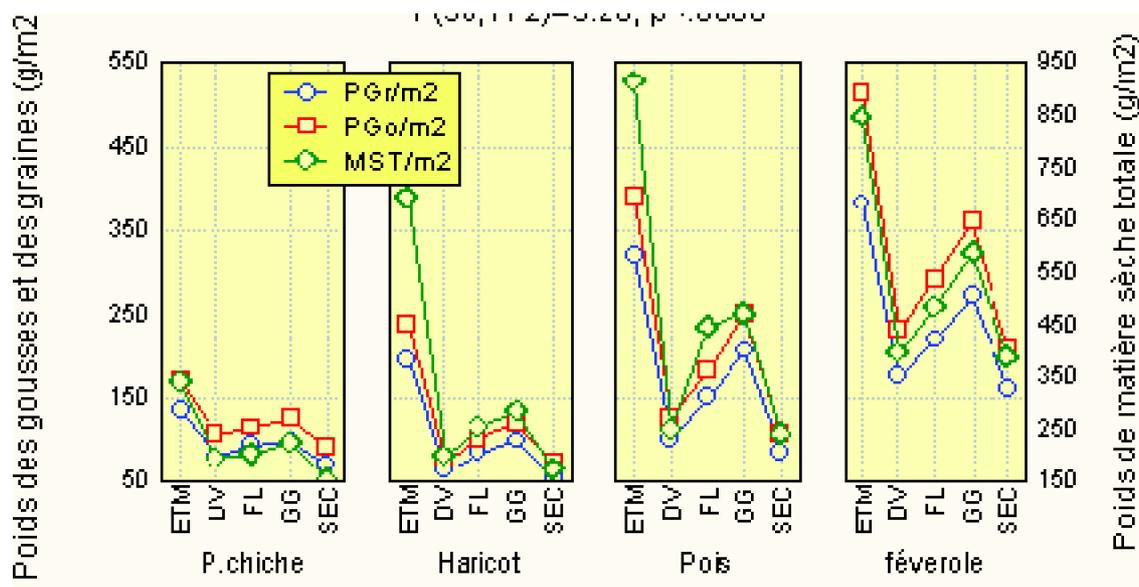


Figure 20 : Effet de l'irrigation de complément sur les composantes du rendement exprimées en poids  $F(36,172)=9.20 ; p<.0000$

### 1.2.3. Le poids des graines par gousse

Les figures 21a et b mettent en relief l'effet néfaste de la sécheresse (T5) sur le poids des graines par gousse. Cette composante trouve son importance dans le fait qu'un poids de graines par gousse élevé implique nécessairement un nombre de graines par gousse plus élevé et/ou un poids moyen de la graine relativement élevé (fig. 21c).

A l'exception de la féverole, le poids des graines par gousse semble être plus amélioré par un apport d'eau à la phase floraison (FL), particulièrement pour le haricot et le pois.

Un apport d'eau à la phase pré-florale (traitement T2) (fin de la phase de développement végétatif) semble n'avoir aucun intérêt pour le poids des graines par gousse, particulièrement pour le pois.

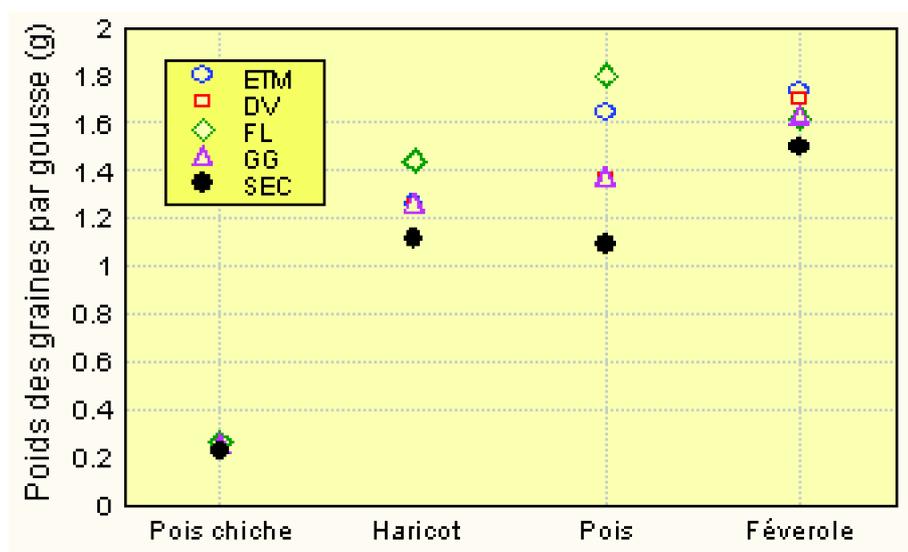


Figure 21a : Effet de la phase d'irrigation sur le poids des graines par gousse  
 $F(17,60)=29,96 ; p<.0000$

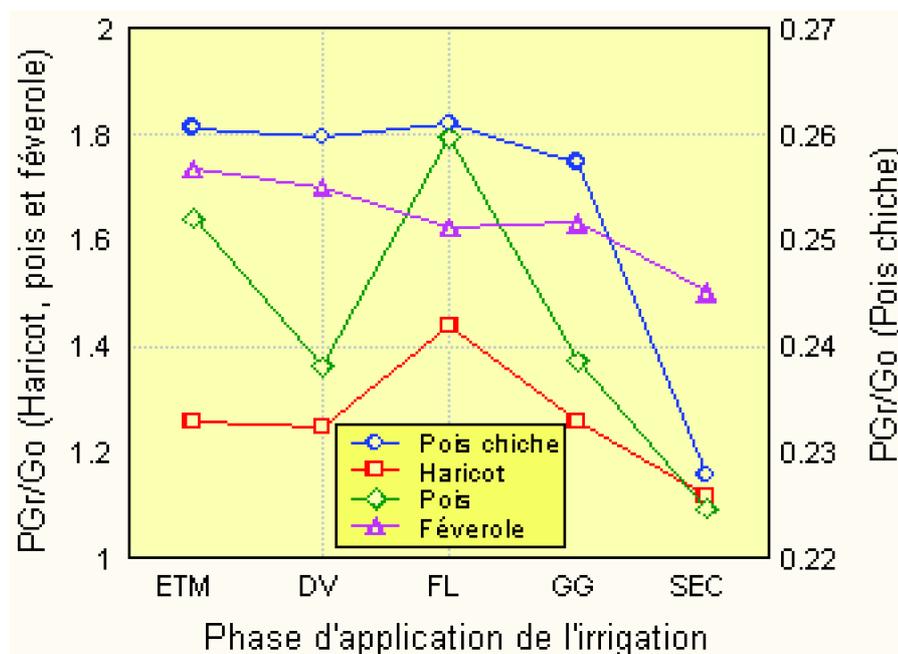


Figure 21b : Effet de la phase d'irrigation sur le poids des graines par gousse  
 $F(12,60)=29.96 ; p<.0000$

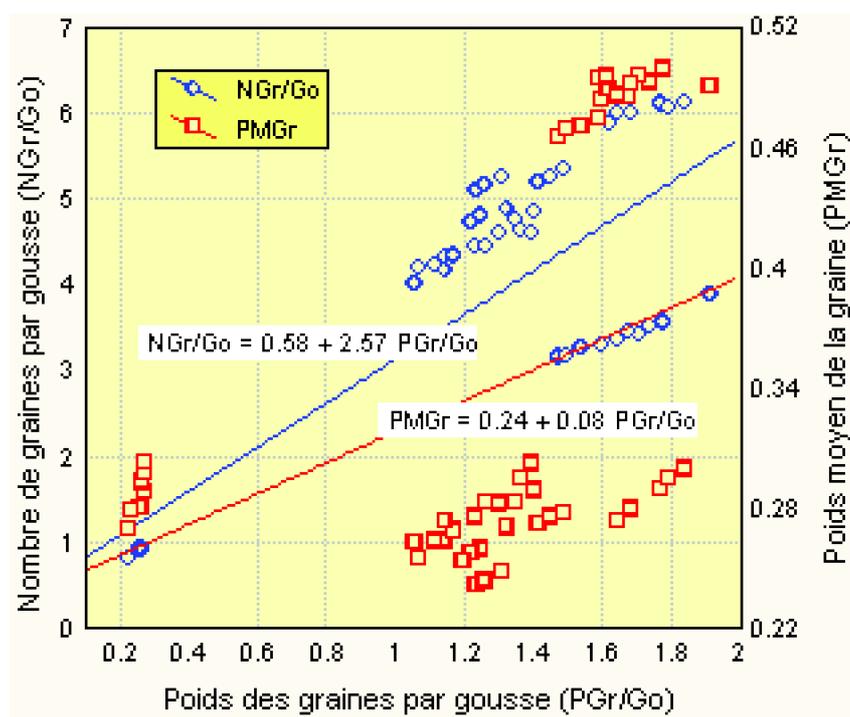


Figure 21c : Corrélation entre le poids des graines par gousses, le poids moyen d'une graine et le nombre de graines par gousses

#### 1.2.4. Le poids de matière sèche totale par m<sup>2</sup>

L'analyse détaillée de l'effet de l'irrigation de complément sur les composantes exprimées en poids au niveau de chaque espèce et chaque phase d'apport montre que la conduite sans restriction hydrique (ETM) favorise beaucoup plus la production de biomasse (fig. 19 et 20) et le poids des graines par gousses (fig. 21b) que les autres composantes particulièrement pour le pois chiche et la féverole. Par contre le traitement SEC s'est caractérisé par une production de biomasse et un nombre de graines par gousses relativement faible. Les apports d'eau durant la phase pré-florale (DV) n'ont pratiquement aucun intérêt sauf pour la féverole pour la composante poids des graines par gousses (fig. 21b).

Les analyses statistiques des composantes exprimées en poids montrent qu'à l'exception du facteur régime d'irrigation de la composante poids des graines par gousses, les traitements des deux facteurs F1, F2 et leur interaction sont très hautement significatifs (annexes o1, o2, o3 et o4).

### 1.3. Etude comparée de l'effet des irrigations sur les composantes du rendement

Dans ce chapitre, nous essayons de mettre en relief l'effet de l'irrigation de complément sur le comportement des composantes du rendement, particulièrement entre celles exprimées en poids et celles exprimées en nombre.

Le poids moyen de la gousses et de la graine étant issu du rapport de leur poids et de

## Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines

leur nombre par m<sup>2</sup>, leur variation peut indiquer le degré de sensibilité des deux composantes dont ils sont issus.

Les figures 22 et 23 mettent en évidence le comportement du poids moyen de la gousse et du nombre de gousses par m<sup>2</sup>, d'une part et la matière sèche totale, d'autre part. En effet, un apport d'eau avant la phase floraison (DV et FL) a un effet identique sur toutes les principales composantes du rendement, par contre, un apport d'eau post-floral diminue le poids moyen de la gousse et accroît sensiblement la production de biomasse et le nombre de gousses par m<sup>2</sup> pour les quatre espèces.

Si ce résultat est confirmé, il s'avère quelque peu contradictoire car le grossissement de la gousse se fait beaucoup plus en fin de période de reproduction, comme pour les graines qui sont

plus sensibles à un apport d'eau floral (FL) et pré-floral pour l'élaboration du nombre de graines, en revanche, pour leur poids moyen, elles sont beaucoup plus sensibles à un apport post-floral (GG).

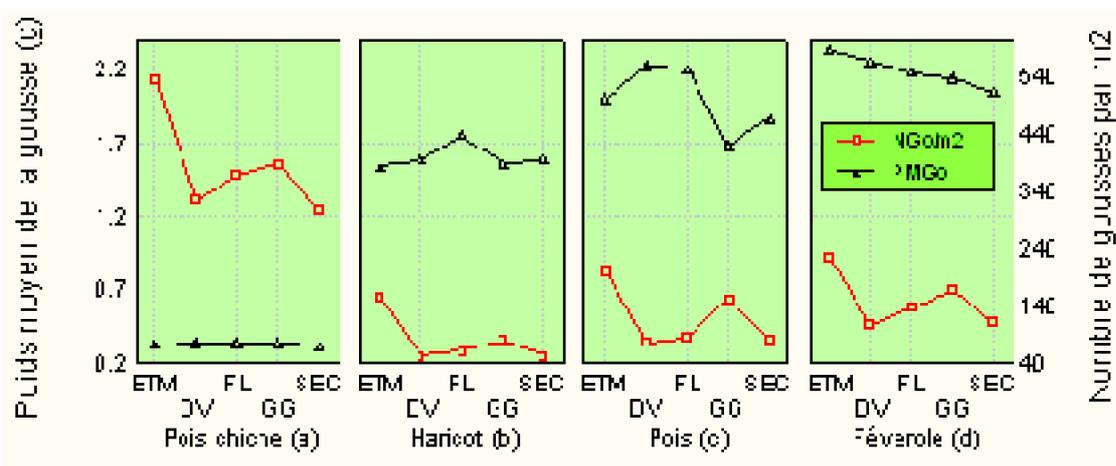


Figure 22 : Effets comparés des irrigations sur le nombre de gousses par m<sup>2</sup> et le poids de la gousse  $F(24,118)=5.42$  ;  $p<0.000$

Néanmoins, il reste à définir l'importance des enveloppes de la gousse par rapport aux graines car celles-ci se développent durant la phase dite d'élongation des gousses qui dure environ une dizaine de jours entre les phases FL et GG (Cheraga et Guentour, 1998). Dans ce cas, elles n'auront pas bénéficié de l'apport de la phase GG, ce qui a probablement provoqué une diminution de leur poids moyen.

Les traitements témoins ETM et SEC ont tendance à produire un poids moyen de graine et de gousse faible. Ceci est probablement dû aux effets néfastes du déficit hydrique qui ne permet pas un transfert normal des assimilats vers les gousses et les graines pour le traitement SEC, par contre pour le traitement ETM, la production d'un nombre élevé de gousses et de graines provoque une diminution du poids moyen de la gousse et du poids moyen de la graine, suite à concurrence qui se produit entre les gousses elles même et les graines à l'intérieur des gousses (fig. 24).

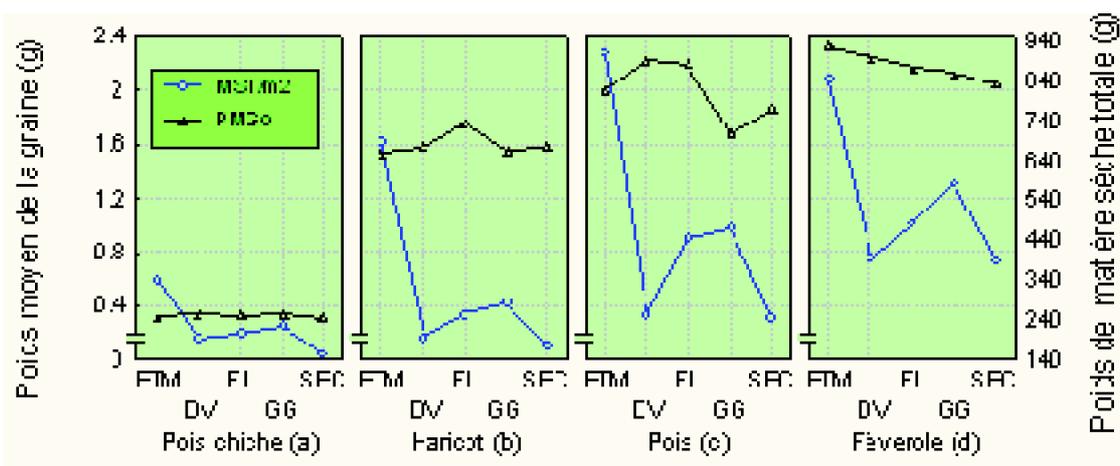


Figure 23 : Effets comparés des irrigations sur la matière sèche totale et le poids moyen de la gousse  $F(24,118)=13.72$  ;  $p<0.000$

Il faut signaler aussi qu'à l'exception de la féverole, le régime SEC enregistre un indice de récolte plus élevé que le régime ETM et DV, malgré un poids de gousses et de graines faible comparé aux autres traitements. Ceci est probablement le résultat de l'interaction qui s'effectue entre un poids de graines relativement élevé et une production de biomasse proportionnelle à la quantité d'eau consommée durant le cycle. Deschamps et Wery (1985) ; Wery et al. (1988) ont signalé le risque de développement de la biomasse au dépens de la production de graines en cas de surconsommation d'eau (fig. 24).

Les analyses statistiques des composantes issues de l'interaction des composantes du rendement (indices de production) montrent qu'à l'exception du facteur régime d'irrigation des composantes poids moyen de la gousse (PMGo), poids moyen de la graine (PMGr) et l'indice de récolte (IR), les traitements des deux facteurs F1 et F2 et leur interaction sont très hautement significatifs (annexes q1, q2 et q3).

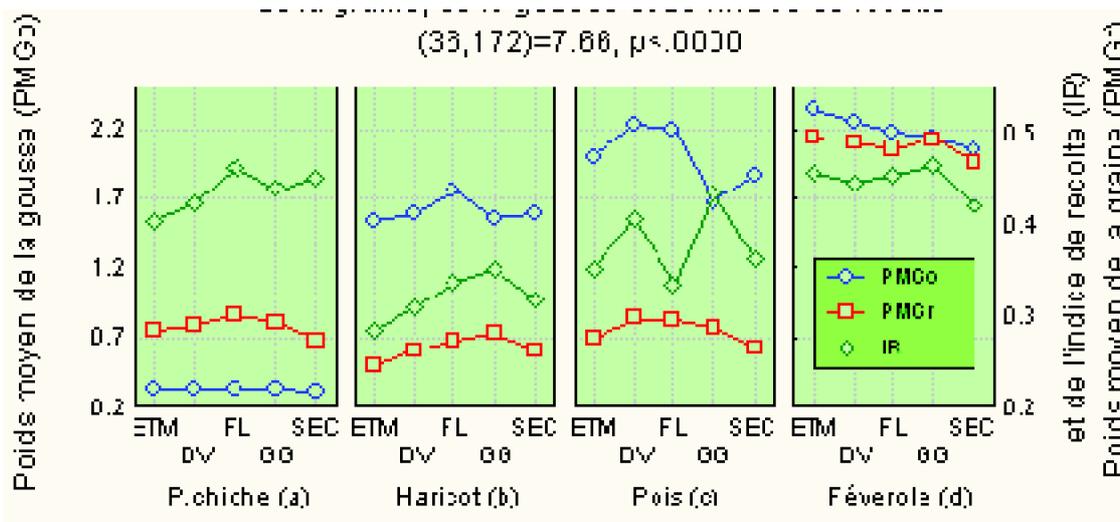


Figure 24 : Effets des d'irrigations sur le poids moyen de la graine, de la gousse et de l'indice de récolte  $(36,172)=7.66$  ;  $p<.0000$

## 2. Effet du régime hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau

### 2.1. Production de graines

Les figures 25, 26 et 27 mettent en évidence la différence du niveau de valorisation de l'eau totale consommée et/ou de l'eau d'irrigation de complément pour la production des principales variables du rendement (production de graines de gousses et de matière sèche).

On note une différence dans la valorisation de l'eau selon sa période d'apport, en effet, cette valorisation est de l'ordre de 0.3 g par litre de graines pour le régime conduit en ETM (T1) du pois chiche à 2,3 g par litre pour un appoint en phase de grossissement des graines (GG) de la féverole et du pois. Avila Marioni (1993) obtient des résultats analogues sur haricot (0.21 à 0.34 g par litre). Sur la même espèce et avec mulch Barros et Hauks (1993) obtiennent 0.4 et 0.6 g par litre de graines respectivement pour une consommation totale de 230 et 400 mm.

Pour un complément d'eau apporté durant les phases les plus sensibles du haricot, l'efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de graines peut être très élevée (0.8 à 1.5 g par litre) (Laurent, 1992). Sur pois, Malik et Bhandari, (1994) obtiennent entre 0.9 et 1.6 g par litre. Cette valorisation peut atteindre 3 g par litre (Bouthier et Gaillard 1994 ; 1995). Il faut signaler que ce niveau de valorisation est relativement élevé. Pour cela, il est à considérer avec beaucoup de précautions.

En climat méditerranéen et sur fève, Loss et al. (1997) obtiennent une efficacité de 1.1 à 2.3 g par litre pour la production de biomasse totale et 0.4 à 0.9 g par litre pour la production de graines pour une consommation d'eau moyenne de 240 mm.

Sur soja, Dardanelli et al. (non daté) obtient une efficacité de 0.57 à 0.87 g par litre pour une consommation de 510 à 750 mm.

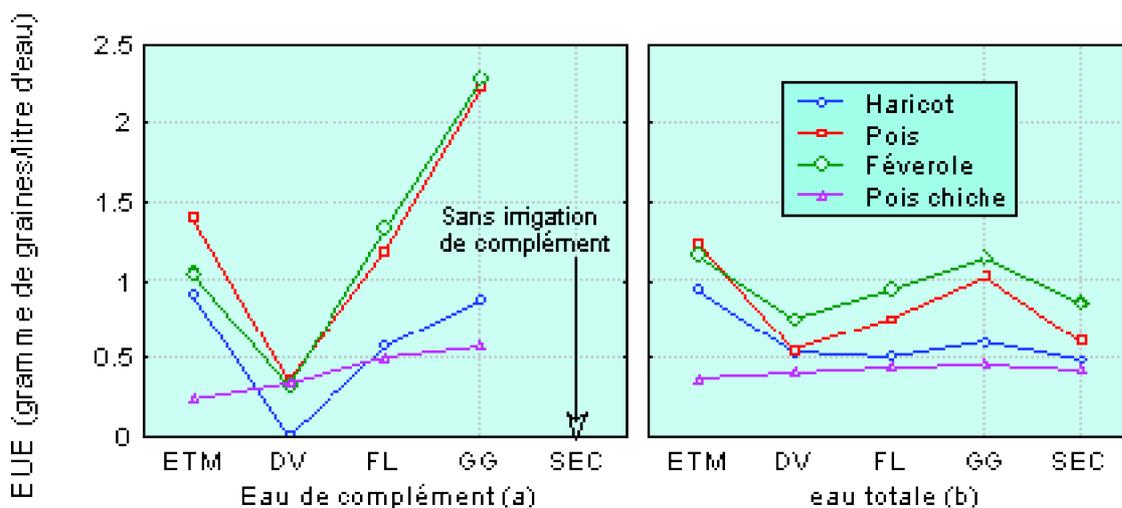


Figure 25 : Effet du régime hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau production de graine (gramme de graine/litre d'eau)

La figure 25 montre une très faible valorisation de l'eau totale ou de complément par le haricot, particulièrement lorsque l'apport a lieu pendant le développement végétatif, et surtout le pois chiche, dont l'efficacité d'utilisation de l'eau est presque indépendante de la période d'apport.

Si l'on considère l'effet moyen de l'eau totale et de complément, on remarque une meilleure valorisation de l'eau pour un appoint d'irrigation à la phase de grossissement des graines (T4) (Acosta Gallegos et Shibata, 1989), particulièrement pour la féverole et le pois, par contre un apport d'eau à la phase de développement végétatif (T2) semble n'avoir aucun effet puisque l'efficacité de l'eau est analogue à celle du régime pluvial (T5) pour l'eau totale. Néanmoins, le pois chiche, comparé aux autres espèces, semble avoir une bonne tolérance au manque d'eau puisque l'efficacité du régime pluvial (T5) est aussi bonne que celles des traitements irrigués. Au contraire, l'efficacité de l'eau est légèrement diminuée lors du traitement à ETM, même si le rendement est augmenté (fig. 25 a et b).

### **2.2. Production de gousses**

L'efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de gousses à l'état sec est analogue à la variable production de graines avec une légère amélioration de l'efficacité, particulièrement pour l'eau d'appoint apportée à la phase grossissement des graines de la culture de féverole. Cette efficacité varie de 0.25 g par litre pour le traitement ETM du pois chiche à 3.2 g par litre pour le traitement GG de la féverole (fig. 26 a). Le pois chiche semble mieux valoriser l'eau totale que l'eau d'irrigation avec une efficacité de 0.5 g par litre. Pour le traitement GG, l'efficacité de l'eau totale est de l'ordre de 1.5 g par litre pour la féverole, soit une diminution de plus de 50% par rapport à l'efficacité de l'eau d'irrigation pour le même traitement (GG) et la même espèce (féverole) (fig. 26 a et b).

Les traitements conduits en culture pluviale (T5) n'étant pas irrigués pour les quatre espèces, pour cela, les valeurs de l'efficacité de l'eau d'irrigation n'apparaissent pas dans la figure 26 a. La même remarque est à retenir pour la phase DV du haricot qui n'a pas été irriguée suite à une précipitation tardive qui a maintenu le sol à une humidité proche de la capacité de rétention au moment de l'irrigation.

Concernant la comparaison de l'effet de l'eau d'irrigation et de l'eau totale, la figure 26 met en relief l'efficacité élevée de la féverole et du pois, particulièrement pour un appoint d'eau à la phase GG. Selon la même figure, l'eau est faiblement valorisée par la culture du pois chiche lorsqu'elle est apportée durant la phase pré-florale qui correspond à la fin du stade de développement végétatif (DV), notamment pour la culture du haricot.

## Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines

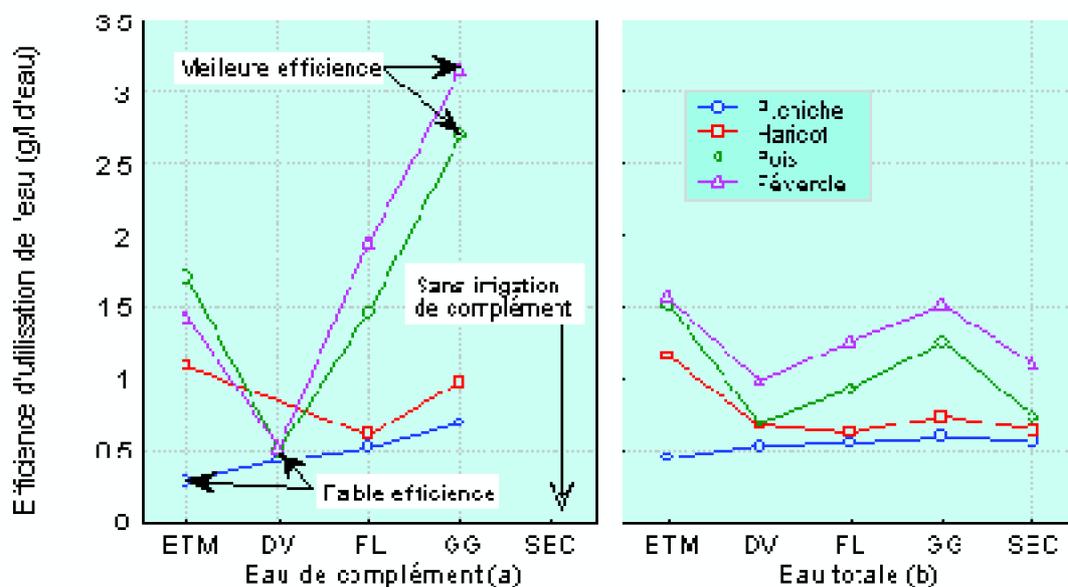


Figure 26 : Effet du régime hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau production de gousses(gramme de gousses/litre d'eau)

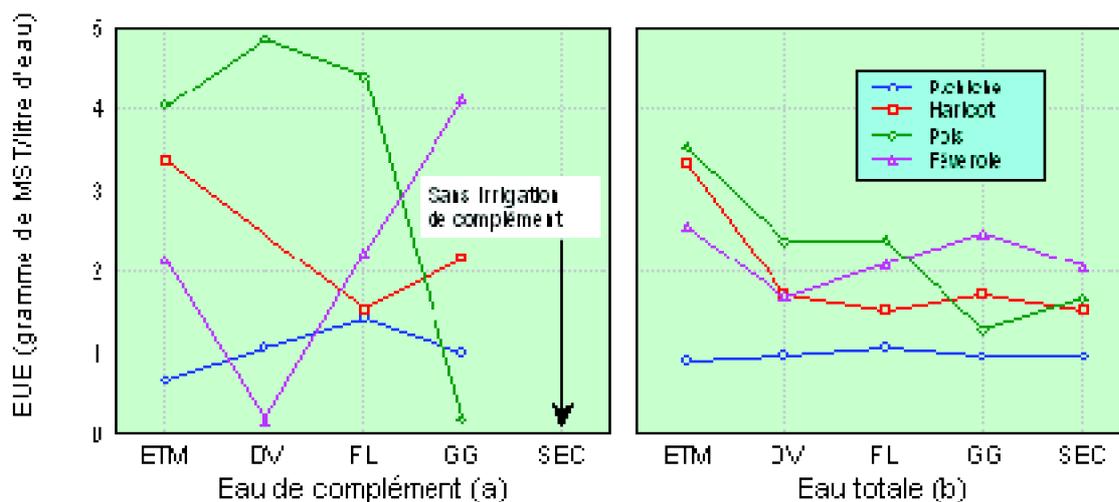


Figure 27 : Effet du régime hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau production de matière sèche totale (gramme de MST/litre d'eau)

### 2.3. Production de biomasse

La comparaison de la composante production de biomasse par rapport à la production de graines et de gousses montre que le régime ETM favorise beaucoup plus la production de biomasse que le produit commercialisable (graines et gousses). En effet l'efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de biomasse est toujours plus élevée pour le traitement ETM que pour

Les autres régimes hydriques pour les quatre espèces. Néanmoins, le pois chiche semble peu valoriser l'eau totale consommée avec une productivité de 1 g par litre, comparé au pois et au haricot qui dépassent 3 g par litre pour le régime ETM et 2 à 2.5 g

par litre pour un appoint d'eau à la phase grossissement des graines (GG) (fig. 27 b).

Sur fève, Loss et al. (1997) obtiennent une efficacité de 1,1 à 2,3 g par litre pour la production de biomasse totale pour une consommation d'eau moyenne de 240 mm.

Dardanelli et al. (non daté) obtiennent une efficacité de 1,2 à 1,7 g par litre pour une consommation de 510 à 750 mm

Concernant l'eau d'irrigation, l'accroissement de la production de biomasse est nettement plus élevé pour un appoint d'eau à la phase GG et le régime ETM, sauf pour le pois dans lequel la productivité de l'eau est plus élevée lorsqu'elle est apportée durant les phases florales et pré-florales (fig. 27 a). La même figure montre qu'un appoint en phases florales et pré-florales améliore plus la biomasse que les graines et les gousses du pois. De plus, la féverole se caractérise par une très mauvaise valorisation de l'eau apportée à la phase pré-florale avec une productivité de l'ordre de 0.2 g par litre. Ces résultats confirment ceux de Karamanos (1978) qui mettent en relief la grande sensibilité au stress hydrique de la phase post-florale (GG) de la culture de fève, par opposition à la phase pré-florale.

La figure 27 montre une grande différence dans la valorisation de l'eau totale et de complément par les quatre légumineuses alimentaires. Ainsi, l'eau est mieux valorisée par la culture du pois, sauf pour un appoint d'eau à la phase grossissement des graines, par contre le pois chiche se caractérise par une très mauvaise valorisation de l'eau, particulièrement pour les régimes ETM et SEC.

L'analyse statistique de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de graines, de gousses et de matière sèche montre une différence significative entre les traitements du facteur F1 et du facteur F2 mais pas d'interaction entre les deux facteurs (annexes r1, r2 et r3).

### **3. Effet du régime hydrique sur l'indice de réponse à la sécheresse**

---

L'indice de réponse à la sécheresse (IRS) indique le niveau d'aptitude d'une espèce à maintenir un niveau de production relativement élevé en condition de sécheresse (stress temporaire ou permanent). Cet indice donne la production relative du traitement stressé par rapport au traitement non stressé (ETM), de ce fait, l'indice de réponse à la sécheresse du traitement non stressé est toujours égal à zéro, par contre le traitement le plus stressé n'ayant aucune production aura un IRS égal à l'unité (1).

L'étude comparative de l'indice de réponse à la sécheresse (IRS) des quatre espèces sous les cinq régimes hydriques différents fait ressortir trois classes de réponses. En effet, le haricot se caractérise par une grande sensibilité à la sécheresse, avec un indice qui varie de 0.44 à 0.75 pour les trois variables étudiées, par contre le pois chiche semble être très résistant, avec un indice de 0.27 à 0.57. Le pois et la féverole présentent une réponse moyenne, avec un indice de 0.29 à 0.75 (fig. 28). La même figure montre une plus faible réponse à la sécheresse de la biomasse par rapport aux composantes poids des graines et poids des gousses. Nous signalons que Samper et Wayne Adams (1985) considèrent que la comparaison de l'indice de réponse à la sécheresse de plusieurs espèces peut être entachée d'erreur à cause de la diversité qui peut exister entre les

différentes espèces et des conditions de culture parfois différentes.

L'interdépendance du poids des graines et du poids des gousses donne, généralement, une similitude dans la valeur de leur indice de réponse à la sécheresse.

L'analyse statistique révèle une différence très hautement significative pour tous les traitements des deux facteurs F1 et F2. Néanmoins, la différence de sensibilité entre les quatre espèces n'est que significative et que l'interaction est nulle entre les deux facteurs (annexes s1, s2 et s3).

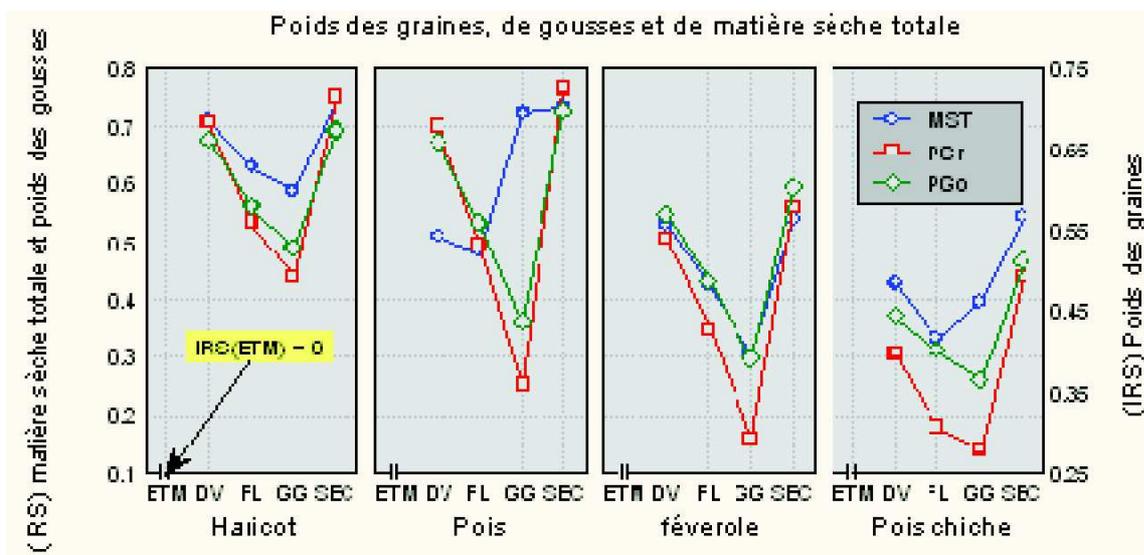


Figure 28 : Indice de réponse à la sécheresse (IRS) Poids des graines, de gousses et de matière sèche totale

## 4. Discussion

A l'exception du poids des graines par gousse, l'allure des courbes de production des autres composantes du rendement exprimées en nombre ou en poids (poids des gousses par m<sup>2</sup>, poids de matière sèche par m<sup>2</sup>) est analogue à celle de la production en poids des graines par m<sup>2</sup>. Néanmoins, il faut noter que le pois a produit 70 g par m<sup>2</sup> de plus de matière sèche que la féverole en régime ETM et 145 g par m<sup>2</sup> en moins en régime pluvial, ceci montre sa plus grande sensibilité au déficit hydrique par rapport à la féverole.

L'étude comparée de l'effet de la phase d'application de l'irrigation de complément sur les principales composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines montre que la féverole et le pois valorisent mieux les irrigations de complément que le haricot et le pois chiche. Cette amélioration est surtout provoquée par une augmentation du nombre de gousses par m<sup>2</sup> qui améliore le nombre de graines par m<sup>2</sup>, même si le nombre de graines par gousses n'est pas toujours amélioré, particulièrement pour le genre *Vicia*, pour laquelle la diminution du nombre de graines par gousses a entraîné une diminution du nombre de graines par m<sup>2</sup>, même pour un nombre de gousses relativement élevé.

Concernant l'effet du régime hydrique sur la meilleure productivité de l'irrigation de

complément, les résultats obtenus montrent clairement la plus grande sensibilité de la phase floraison (FL) et surtout grossissement de la graine (GG), dans lesquelles l'apport d'eau a permis une amélioration des composantes exprimées en poids et en nombre, à l'exception de la composante poids des graines par gousse qui a été améliorée par un apport d'eau à la phase floraison et diminuée pour un apport à la phase grossissement des graines. Il semble aussi que cette diminution soit provoquée par une diminution du nombre de graines par gousse, ce qui est normal.

Comme il fallait s'y attendre, les deux témoins (ETM et SEC) ont eu des productions très contrastées, puisque leur différence dépasse, parfois les 250%, particulièrement pour la féverole.

Il faut signaler la mauvaise performance des quatre espèces pour un apport d'eau à la phase pré-florale qui a produit, pratiquement la même quantité que le régime pluvial (non irrigué).

Les composantes issues du rapport de deux composantes du rendement ont sensiblement le même comportement à l'égard de la phase d'apport de l'irrigation de complément. Néanmoins, un apport à la phase GG semble privilégier l'indice de récolte (IR) au dépens du poids moyen de la gousse, à l'exception de la culture du pois chiche dans laquelle l'indice de récolte a diminué.

Nos résultats confirment l'existence du phénomène d'interaction entre certaines composantes du rendement exprimées en poids et celles exprimées en nombres. En effet on constate que lorsque le niveau de production est moyen pour une composante donnée, le phénomène d'interaction n'est pas apparent, comme c'est le cas des productions des régimes ETM, DV et FL de la figure 24. Par contre, lorsque le niveau de production d'une ou plusieurs variables est extrême, le phénomène d'interaction se manifeste, particulièrement entre les composantes exprimées en nombre et celles exprimées en poids à cause de l'interaction entre le nombre d'organes fructifères produit et le poids de chaque organe ou des composantes de celui-ci, comme le montre la figure 24 pour le poids moyen de la gousse qui est extrêmement bas comparé à l'indice de récolte du régime hydrique (GG).

L'étude comparée de l'effet combiné des deux facteurs étudiés F1 et F2 montre une différence de valorisation entre l'eau d'irrigation et de l'eau totale. En effet, pour l'eau d'irrigation, la meilleure efficacité d'utilisation de l'eau est obtenue pour un supplément d'eau à la phase de grossissement des graines (GG), par contre, le régime ETM s'est caractérisé par une efficacité moyenne, ceci est probablement dû à une surconsommation d'eau, particulièrement pour le pois chiche. Les apports d'eau pré-floraux (FL) semblent n'avoir aucun intérêt, sauf pour la production de matière sèche totale du pois.

Concernant l'eau totale (pluie + irrigation), la meilleure efficacité est enregistrée par le régime ETM et un apport d'eau à la phase grossissement des graines (GG).

Comme pour l'eau d'irrigation, les apports d'eau à la phase de développement végétatif (DV) n'ont pas permis d'améliorer l'efficacité de l'eau puisque leur niveau est analogue au régime pluvial (SEC), sauf pour le pois et le haricot pour la production de matière sèche totale.

Pour les trois composantes du rendement exprimées en poids, la féverole et le pois ont mieux valorisé l'eau totale et d'irrigation. Les plus faibles valorisations ont été enregistrées par le pois chiche, particulièrement par le régime ETM.

L'analyse de l'indice de réponse à la sécheresse (IRS) montre la plus grande sensibilité de la phase GG pour les quatre espèces. La variable poids des graines est de loin la plus sensible au déficit hydrique.

## Conclusion générale

Nos expérimentations se caractérisent par un marquage systématique des organes fructifères ayant effectivement subi un stress hydrique (essais sous serre) ou ayant bénéficié d'un appoint d'eau (essai en plein champ).

Cette méthode a permis de lever la contrainte de l'effet de chevauchement des différentes phases phénologiques qui caractérisent les légumineuses alimentaires, dans lesquelles on trouve au même moment des organes fructifères ayant un état de développement très différent (du bouton floral à la gousse en phase de remplissage des graines).

La méthode de marquage permet d'étudier la réaction individuelle de chaque organe fructifère à un stress hydrique ou à un complément d'eau, puisque toutes les observations et mesures se font sur chaque gousse arrivée à maturité et non pas sur l'ensemble des gousses récoltées sur une même plante mais ayant subi un stress ou un appoint d'eau en étant à des phases de développement différentes. Elle permet aussi d'éviter de considérer que la sensibilité des organes fructifères est identique quel que soit leur état de développement

### **Essai sous serre**

Bien que le phénomène d'avortement des organes fructifères soit souvent sous-estimé par rapport aux autres composantes du rendement, il reste la composante la plus importante pour les prévisions du rendement en graines ou en gousses, puisqu'il conditionne toutes les composantes exprimées en nombre ou en poids. Néanmoins, dans

certains cas, un taux d'avortement élevé peut améliorer la qualité des graines et des gousses en améliorant le poids moyen de la graine (PMGr) ou de la gousse (PMGo), suite à un taux de fertilité des gousses élevé.

Parmi les composantes exprimées en nombre, le nombre de gousses par plante (NGo/Pt) semble être le plus sensible comparé au nombre de graines par plante (NGr/Pt) ou par gousse (NGr/Go). De plus, le nombre de graines par gousse est négativement corrélé avec le nombre de gousses par plante. Ceci est probablement dû au phénomène de concurrence entre les deux composantes.

Parmi les composantes exprimées en poids, le poids des graines par plante (PGr/Pt) représente la composante la plus déterminante comparée au poids des gousses entières par plante (PGo/Pt) ou le poids des graines par gousse (PGr/Go). Cette dernière étant inversement proportionnelle au poids des graines et des gousses par plante. Ce résultat confirme l'hypothèse de concurrence entre le nombre de graines par plante (NGr/Pt) et par gousse (NGr/Go).

Les composantes issues du rapport de deux composantes du rendement semblent être très peu sensibles au stress hydrique. Ainsi, le poids moyen de la graine (PMGr) et l'indice de récolte (IR) semblent être insensibles au régime hydrique. En effet, le PMGr peut être parfois amélioré sous l'effet de la contrainte hydrique. Ce qui semble logique puisque le stress provoque une diminution du nombre de gousses par plante (NGo/Pt) ou de graines par gousse (NGr/Go). Il peut aussi diminuer en régime hydrique optimal. Ceci est le résultat de l'effet de compensation entre le nombre de graines par plante et leur poids moyen ou le poids des graines par plante et sa biomasse totale (MST).

La plupart de nos résultats confirment l'existence du phénomène de compensation ou d'interaction entre les composantes du rendement au niveau d'une même plante, particulièrement entre les composantes exprimées en nombre et celles exprimées en poids.

En effet, une diminution du nombre de gousses ou de graines par plante provoque, souvent une augmentation du poids moyen de la graine (PMGr) ou de la gousse (PMGo).

Le nombre et le poids des graines par gousses (NGr/Go) et (PGr/Go) provoquent une amélioration du poids moyen de la graine et de la gousse, ceci est mis en relief par les figures 13 c et d.

L'interaction entre les composantes du rendement rend difficile les prévisions du rendement, donc de production d'une spéculation donnée. En effet, une production destinée à une consommation en vert (à l'état frais) doit privilégier les composantes NGo/Pt et PMGo, par contre, une récolte en sec doit privilégier les composantes NGr/Pt et PMGr.

Les prévisions du rendement doivent prendre en considération les principales composantes exprimées en nombre et en poids afin d'éviter les risques d'erreurs provoquées par les phénomènes de compensation et d'interaction entre les différentes composantes du rendement.

Concernant la sensibilité des phases phénologiques, à l'exception du poids moyen de la graine et parfois de la gousse, les phases les plus sensibles correspondent aux phases

florales et Immédiatement pré et post-florales (p1, p2 et p3), avec une plus grande sensibilité de la phase de transition entre la corolle ouverte et le début d'élongation de la gousse qui correspond à la phase nouaison (p3). Les phases les moins sensibles correspondent à la phase de grossissement des graines (p6 et p7). Néanmoins, un stress appliqué durant ces deux dernières phases affecte plus la composante poids moyen de la graine (PMGr) et à un degré moindre, le PMGo.

### Essai en plein champ

Concernant l'essai en plein champ, les résultats obtenus montrent l'importance de l'irrigation de complément pour l'amélioration du rendement. En effet, les appoints d'eau améliorent le rendement à des degrés différents en fonction de la composante considérée, de la phase d'application de l'appoint d'eau et de l'espèce.

Ainsi, les irrigations de complément améliorent beaucoup plus le poids que le nombre de graines par m<sup>2</sup>, probablement à cause d'un bon transfert des assimilats et une bonne amélioration du poids moyen de la graine.

La comparaison de l'effet de l'appoint d'eau en fonction de la phase d'application sur les quatre espèces montre que la meilleure phase d'application de l'irrigation correspond à la phase grossissement des graines (GG). Par contre la phase la moins sensible correspond au stade de développement végétatif (DV). Néanmoins le nombre et le poids des graines par gousses semblent être plus sensibles à un appoint au stade floraison, ce qui semble normal puisque les composantes exprimées en nombre se décident généralement au début de la phase de reproduction.

La comparaison des deux régimes hydriques ETM et SEC montre que le régime sans restriction hydrique (ETM) produit jusqu'à trois fois plus que le régime pluvial (SEC), notamment pour la production de matière sèche totale qui est très favorisée par un apport permanent d'eau. En effet, il semble que le régime ETM favorise plus le développement de la biomasse que le poids des graines, tout en améliorant le rendement. Ces résultats montrent l'intérêt de pratiquer des irrigations de complément, sans exagérer sur les quantités d'eau apportées pour éviter une production de biomasse excessive, ce qui diminuerait l'efficacité d'utilisation de l'eau, suite à une diminution de l'indice de récolte

L'effet moyen des cinq régimes hydriques sur les quatre espèces fait ressortir une meilleure production en nombre de graines par m<sup>2</sup> pour le pois et en poids de graines par m<sup>2</sup> pour la féverole.

Le pois chiche et le haricot ont produit seulement 25% par rapport au poids de graines de la féverole.

Concernant l'efficacité d'utilisation de l'eau, l'essai en plein champ met en relief la bonne performance de la féverole et du pois, particulièrement pour le régime ETM et un appoint au stade grossissement de la graine (GG). Le pois chiche et le haricot valorisent moins l'eau totale et d'irrigation particulièrement pour le régime ETM pour le pois chiche et un appoint d'eau au stade de développement végétatif pour le haricot.

De plus en culture pluviale (SEC), le pois chiche produit pratiquement autant que le régime ETM. Ceci confirme le caractère rustique du genre *Cicer*. Ce caractère est mis en relief par l'indice de résistance à la sécheresse qui est deux fois plus important pour le

pois chiche par rapport au haricot et au pois.

En guise de conclusion commune aux deux modes de culture, nous avons noté un décalage de la phase la plus sensible au stress hydrique entre les essais sous serre et l'essai en plein champ. En effet, en plein champ la phase la plus sensible à un apport d'eau correspond à la phase de grossissement des graines, alors que sous serre la phase la plus sensible au stress hydrique correspond à la phase nouaison. Ce décalage est estimé à 8 à 12 jours. Il peut s'expliquer soit par une mauvaise estimation des phases d'application de l'appoint d'eau ou à une réelle différence de sensibilité des phases en fonction du mode de culture (sous serre ou plein champ). Pourtant, notre hypothèse de départ est que la phase la plus sensible au stress est généralement celle qui répond mieux à un appoint d'eau en conditions de sécheresse.

Les composantes du rendement exprimées en nombre sont plus pénalisées par un stress floral ou immédiatement post-floral, par contre, les composantes exprimées en poids sont plus sensibles au stress terminal qui correspond à la phase de remplissage des gousses.

Le phénomène de compensation entre les composantes du rendement est une réalité qu'il faudra prendre en considération dans toute prévision de production.

Afin de mieux valoriser l'eau d'irrigation, il est important de procéder aux irrigations de complément et d'éviter tout stress hydrique entre la phase de nouaison et de grossissement des graines.

En cas de restriction d'eau, le rationnement des irrigations doit correspondre à la phase de développement végétatif (phase pré-florale) et durant la maturation (phase post-grossissement des graines).

La valorisation de l'eau doit prendre en considération, en plus de la production physique, la production économique ou financière qui dépend des frais générés par l'opération de l'irrigation, particulièrement le prix du m<sup>3</sup> d'eau et le prix à la production du kg de récolte.

Enfin, la notion de valorisation de l'eau doit prendre en considération l'efficacité d'utilisation de l'eau totale consommée et/ou de l'eau d'irrigation apportée durant le cycle. En effet, en plus du prix du m<sup>3</sup> d'eau d'irrigation, de sa productivité et du prix à la production du kg de récolte, il faut maîtriser la phase phénologique à laquelle le stress ou l'appoint d'eau sera appliqué. Ceci est mis en exergue par l'indice de résistance à la sécheresse qui peut passer du simple au double, et même plus selon la phase considérée d'une même espèce.

### **Perspectives**

Nos résultats constituent une ébauche sur l'effet du régime hydrique sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines les plus produites en Algérie.

Pour les consolider, il serait judicieux de s'intéresser à d'autres aspects qui nous ont quelque peu échappés, faute de moyens dont nous avons disposé durant notre période expérimentale.

En effet, dans les zones arides et semi-arides, l'étude des aspects du stress hydrique doit prendre en considération le stress thermique et parfois salin qui sont toujours cumulatifs et indissociables avec le stress hydrique. Ce dernier se caractérise, non seulement par son intensité durant une phase phénologique donnée, mais aussi, par sa durée qui peut englober plusieurs phases phénologiques successives ou par sa fréquence qui peut toucher des phases phénologiques non successives.

Pour mieux expliquer la réaction des plantes aux stress abiotiques, il est préférable de compléter l'approche purement physique du stress par une approche physiologique des plantes vis à vis des stress abiotiques.

Enfin, nos résultats auront plus d'intérêt s'ils sont généralisés aux espèces herbacées (non pérennes), aux espèces herbacées à croissance indéterminée et aux espèces ligneuses.



---

## BIBLIOGRAPHIE

- Abdalla M. M. F. et Fischbeck (1978).** Growth and fertility of five stocks of field beans grown under three temperatures regimes, and the effect of natural water stress on seed index of a collection of *Vicia faba* L. *J. Agronomy and Crop Science*, 147, 81-91.
- Abd-el-Wahab A. M. and Zahran H. H. (1979).** The effects of water stress on N<sub>2</sub>(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) - fixation and growth of four legumes. *Agricultura* 28 (3),383-400.
- Acosta-Gallegos J. A. and White J. W. (1995).** Phenological Plasticity as an Adaptation by Common Bean to Rainfed Environments. *Crop Sci.* 35: 199-204.
- Acosta-Gallegos Jorge A. and Josue Kohashi Shibata (1989).** Effect of Water Stress on Growth and Yield of Indeterminate Dry-Bean (*Phaseolus vulgaris*) Cultivars. *Field Crops Research* 20, 81-93.
- Anonyme (1990).** New Emphasis on Adaptation to Drought and Infertile Soils. CIAT Report (1990) pp. 17-22.
- Avila Marioni M.R. (1993).** Evaluacion de quatro especies cultivables, en una area agricola de alta siniestrabilidad por sequia en el Norte de Mexico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Mexico.
- Bachchhav S. M. Jadhav A. S. and Bote N. L. (1993).** Effect of irrigation and nitrogen on yield, nitrogen uptake and consumptive use of water by summer greengram (*Phaseolus radiatus*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 63, (6), 372-374.
- Badji M. , Feyen J. et Bastanie L. (1982).** Effet du déficit en eau du sol sur

l'évapotranspiration et la production de féverole: une évolution de modèles. *Agronomie*, 2 (3), 213-218.

**Barros L.C.J. et Hauks R.J. (1993)**. Evapotranspiration and yield of beans as affected by mulch. *Agron. J.* 85, 692\_697.

**Barrs H.D. (1993)** Controlled environment studies of the effects of variables atmospheres water stress on photosynthesis, transpiration and water status of *Zea mays* L. and other species. *In* : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes du Coll. Uppsala, 1970, 249-258.

**Bartels Dorothea, Furini Antonella, Ingram Jonathan et Salamini Francesco (1996)**. Responses of plants to deshydration stress : a molecular analysis. *Plant Growth Regulation* 20, 111-118.

**Beech D. F. and Leach G. J. (1988)**. Response of chickpea accessions to row spacing and plant density on a vertisol on the Darling Downs, south-eastern Queensland. Dry matter production and seed yield. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 28, 367-376.

**Bender J., Tingey D. T., Jager H. J., Rodecap K. D. and Clark C. S. (1991)**. Physiological and Biochemical Response of Bush Bean (*Phaseolus vulgaris*) To Ozone and Drought Stress. *J. Plant Physiol.* Vol. 137, 265-570.

**Berger A. (1973)**. Le potentiel hydrique et la résistance à la diffusion dans les stomates indicateurs de l'état hydrique de la plante. *In* : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970, 201-212.

**Berger A. (1985)**. L'eau dans la plante. Réponse physiologique à la contrainte hydrique. *In* : Les bases de la bioclimatologie. INRA, Méribel, 18-22 mars 1985, 79-83.

**Biederbeck V. O. , Bouman T. O. , Looman J. , Slinkard A. E. , Bailey L. D. , Rice W. A. and Janzen H. H. (1993)**. Productivity of Four Annual Legumes as Green Manure in Dryland Cropping Systems. *Agron. J.* 85, 1035-1043.

**Biederbeck V. O. and Bouman O. T. (1994)**. Water Use by Annual Green Manure Legumes in Dryland Cropping Systems. *Agron. J.* 86, 543-549.

**Birand (1961)**. Relations entre le développement des racines et des parties aériennes chez certaines plantes xérophytes et leur résistance à la sécheresse. *Proc. Of the Madrid Symposium*, UNESCO, 175-182.

**Blum A. (1996)**. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation* 20, 135-148.

**Bonhomme R., Drouet J.L. et Améglio T. (1995)**. Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. Actes de l'École-Chercheurs, INRA, Bioclimatologie, Le Croisic, 3-7 avril 1995, 647-669.

**Bourdu R. (1983)**. Bases physiologiques de l'action des températures. *In* : Physiologie du maïs, Royan, 15-17 mars 1983, 389-424.

**Bouthier A. (1992a)**. Irrigation du pois de printemps. Une rentabilité à nouveau confirmée en 1992. *Perspectives Agricoles* n° 175, 61-64.

**Bouthier A. (1992b)**. Pois protéagineux : Suivi de parcelles de pois de printemps en Poitou-Charentes. *Perspectives Agricoles* n° 168, 53-64.

- 
- Bouthier A. et Gaillard B. (1994).** Pois de printemps: Irrigation. La technicité, gage de réussite. *Perspectives Agricoles* n° 187.
- Bouthier a., Deumier J. M. et Gaillard B. (1995).** Pois: acquis 1995: Irrigation. Peut-on proposer des conduites restrictives? *Perspectives Agricoles* n° 198.
- Bouwkamp J. C. and Summers W. (1982).** Inheritance of resistance to temperature - drought stress in the snap bean. *The Journal of Heredity* 73, 385-386.
- Bruce R.R. et Tomas A.W. (1985).** Irrigation practice for crop culture in the South-eastern United States. In *Advances in Irrigation* (D. Hillel, ed.), Vol. 3, pp. 52-106. Academic Press, New York.
- Cabibel B. et Isbérie C. (1997).** Flux de sève et alimentation hydrique de cerisiers irrigués ou non en localisation. *Agronomie* 17, 97-112.
- Caramigeas F. (1986).** La production et le développement du haricot (*Phaseolus vulgaris*) à Maurice. Institut de recherches de l'Industrie Sucrière de Maurice (MSIRI), 80 p + annexes.
- Carrouee B. et Ailliot B. (1992).** Analyse des résultats de sols profonds d'Eure-et-Loir en 1991. *Perspectives Agricoles* n° 168, 60-64.
- Castillo M., Fernandez D., Fernandez P., Molina B. and Kazandjian A. (1990).** Metabolismo del Nitrogeno en *Phaseolus vulgaris* L. Bajo Deficit Hidrico. *Tirrialba* Vol. 40, n° 4, 515-519.
- Castonguay Y. and Markhart A. H. (1992).** Leaf Gas Exchange in Water-Stress Common Bean and Tepary Bean. *Crop Sci.* 32: 980-986.
- Castonguay Y. et Markhart A. H. (1991).** Saturated Rates of Photosynthesis in Water Stress Leaves on Common Bean and Tepary Bean. *Crop Sci.* 31: 1605-1611.
- Castrillo M. and Trujillo I. (1994).** Ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase activity and chlorophyll and protein contents in two cultivars of French bean plants under water stress and rewatering. *PHOTOSYNTHETICA* 30 (2): 175-181.
- Cheraga H et Guentour, (1998).** Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur la croissance et les composantes du rendement du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Mémoire d'ingénieur, INA, El-Harrach, 35p.
- Cornic G., Papegeorgiou I. and Louason G. (1987).** Effect of a Rapid and a Slow Drought Cycle Followed by Rehydration on Stomatal and non-Stomatal Components of Leaf Photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L.. *J. Plant Physiol.* Vol. 126, 309-318.
- Cruziat P. (1974).** Détermination des pertes en eau subies par les différents organes d'une plante soumise au dessèchement. *Ann. Agron.* 25 (4), 539-554.
- Cruziat P. (1995).** La circulation de l'eau dans les plantes. *PHM Revue Horticole* N° 363, 16-23.
- Curvetto N. and Delmastro S. (1990).** A biochemical and physiological proposal for stomatal movement: possible involvement of adenosine 3', 5' -cyclic monophosphate. *Plant Physiol. Biochem.*, 28 (3), 367-378.
- Dardanelli J.L., Suero E.E., Andrade F.H. et Andriani J. (non daté).** Water deficit during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. Univ. Nac. de Mar del Plata. CC 276 - 7620 Balcarce - Bs.As. Argentina.
-

- Daunay M.C. (1985).** Exemple d'adaptation au régime hydrique au climat chez l'aubergine In : Les bases de la bioclimatologie. INRA, Méribel, 18-22 mars 1985, 133-134.
- Davies W. J. (1978).** Some Effects of Abscissic Acid and Water Stress on Stomata of *Vicia faba* L. *Journal of Experimental Botany*, vol. 29, 108, 175-185.
- de Balatier J. (1987).** Quelles sont les effets de la sécheresse sur les flageolets? *UNILET* n° 56, 26-27.
- De Magalhaes A. A., Millar A. A. and Choudhury E. N. (1979).** Efeito do déficit fenológico de água sobre a produção de feijão. *Turrialba* 29 (4), 269-273.
- de Magalhaes A. A. e Milar Agustin (1978).** Effect of Different Water Stress Days During Reproduction Phase on the Yield of Bean. *Pesq. Agropec. bras. Brasília* 13 (3): 55-60.
- de Parcevaux S. et Perrier A. (1973).** Bilan énergétique de la feuille. Application de l'étude des cinétiques de température à la détermination des résistances aux flux gazeux. In : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes du Coll. Uppsala, 1970, 127-135.
- De Raissac M. (1992).** Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées. *L'Agronomie Tropicale* 46, 1, 29-38.
- Delli R. (1994).** Suivi du stress hydrique par marquage des organes fructifères du pois chiche (*Cicer arietinum*). Mémoire d'ingénieur, INA El-Harrach, 60p.
- Delver P. (1962).** Properties of saline soils in Irak. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 10(3), 194-210.
- Derieux M. (1983).** Sélection et adaptation. In Physiologie du maïs. INRA, Royan 15-17 mars 1983. P 503-525.
- Deschamps M. et Wery J. (1987).** Effet de l'eau et de l'azote sur la croissance et la nutrition azotée du pois et du pois-chiche. Nutrition azotée des légumineuses, Versailles, 19-21 Novembre 1985, Ed. INRA, Paris, 1987 (les Colloques de l'INRA, n° 37).
- Deumier J. M. (1987).** L'irrigation du pois protéagineux de printemps. *bulletin FNAMS semences* n° 99, 45-47.
- Deumier J. M. (1988).** Pois de printemps. Alimentation en eau et élaboration du rendement. Conséquences sur la conduite des irrigations. *Perspectives Agricoles* - n° 125, 68-71
- Deumier J. M., Bouthier A. et Gillet J. P. (1990).** Irrigation du pois. Le point après quatre années de référence. *Perspectives Agricoles* - n° 143, 72-83.
- Deumier J. M., Bouthier A. et Gillet J. P. (1991).** Irrigation des pois. Rentabilité confirmée sur pois de printemps. *Perspectives Agricoles* - n° 154, 3-14.
- Deumier J.M. (1990).** Irrigation des pois protéagineux. *Bulletin FNAMS Semences* 111, 26-29.
- El-Shazly M. S. and Warboys I. B. (1989).** The Use of Transparent Flexible Tube for Studying the Root Extenuation and Elongation of Beans (*Vicia faba*). *Expl. Agric.* volume 25, 35-37.

- English-Loeb G. M. (1990).** Plant drought stress and outbreaks of spider mites: A field test. *Ecology* 7 (4), 1401-1411.
- Farats M. A. (1989).** suivi hydrique du haricot à l'échelle d'une petite région et ajustement d'un modèle de simulation du bilan hydrique. Mémoire de fin d'études, CNEARC Montpellier, 48 p.
- Federici C. T., Ehdaie B. and Waines J. G. (1990).** Domesticated and Wild Tepary Bean: Field Performance With and Without Drought Stress. *Agron. J.* 82: 896-900.
- Fiegenbaum V. Dora Suely S., Dos Santos, Vera Delfina C., Mello Benedito G., Dos Santos F., Maria Angela A., Tillman e Joao B. Da Silva. (1991).** Physiological Quality Evaluation of Bean Seeds Submitted to Hydric deficit During Flowering. *Pesquisa Agropecuaria Brasil* 26 (11-12), 1885-1892.
- Fischer R.A. (1973).** The effect of water stress at various stages of development on yield processes in wheat. *In: Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970, 233-241.*
- Fischer R.A. et Maurer R. (1978).** Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29, 897-912.
- Floor Drees E. M. (1984).** The Influence of Drought Stress on Flowering and Abscission of *Phaseolus vulgaris* L.. *Annual Report of the bean improvement Cooperative* Vol. 27, 191-192.
- Food Agriculture Organisation (FAO) (1987).** Production Yearbook Vol. 40, page 107, FAO, Rome.
- Foster E. F., Pajarito A. and Acosta-Gallegos J. A. (1995).** Moisture Stress Impact on N Partitioning, N Remobilization and N Use Efficiency in Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural Science* 124, 27-33.
- Fougereux J.A., Doré T., Ladonne F. et Fleury A. (1997).** Crop ecology, production and management. Water stress during reproductive stages affects seed quality and yield of pea (*Pisum sativum* L.). *Crop Sci.* 37, 1247-1252.
- Fouilloux G., Amarger N. et Nguyen J. (1985).** Quelques aspects de la fixation de l'azote chez le haricot. *Nutrition azotée des légumineuses*, Versailles, 19-22 Novembre. Ed. INRA, Paris, 1987 (Les Colloques de l'INRA, n° 37).
- Green C. F., Hebblethwaite P. D. and Ison Deborah A. (1985).** A quantitative analysis of varietal and moisture status effects on the growth of *Vicia faba* in relation to radiation absorption. *Ann. appl. Bio.* 106, 143-155.
- Guehl J.M. (1995).** Détermination de l'efficience d'utilisation de l'eau à la discrimination isotopique du carbone. Actes de l'Ecole-Chercheurs, INRA, Bioclimatologie, Le Croisic, 3-7 avril 1995, 231-244.
- Guérif M., Lagouarde J.P. et Nicolas H. (non daté).** Variables de fonctionnement de couverts végétaux issues de données de télédétection dans les domaines optique et infrarouge thermique. 81-108
- Guérin V., Pladys D., Trinchant J. C. and Rigaud J. (1991).** Proteolysis and nitrogen fixation in *faba*-bean (*Vicia faba*) nodules under water stress. *Physiologia Plantarum* 82, 360-366.
- Guérin V., Trinchant J. C. and Rigaud J. (1990).** Nitrogen Fixation (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> Reduction)

- by Broad Bean (*Vicia faba* L.). Nodules and Bacteriods Under Water restricted Condition. *Plant Physiol.* 92, 595-601.
- Guilioni L., Lecoeur J. et Wery J. (1998).** Pois protéagineux. Quel est l'impact des "coups de chaleur". *Perspectives Agricoles* N° 236, 64-70.
- Guimaraes C. M. (1986).** Drought Resistance in Bean (*Phaseolus vulgaris*). *Annual report of the Bean Improvement Cooperative* Vol. 29: 130-131.
- Guimaraes C. M., Brunini O. and Stone L. F. (1993).** Differential root density and water extraction rate of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Drought sensitive and tolerant cultivars. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* vol. 36, 78-79.
- Gupta A. K., Singh J., Kaur N. and Singh R. (1993a).** Effect of polyethylene glycol-induced water stress on germination and reserve carbohydrate metabolism in chickpea cultivars differing in tolerance to water deficit. *Plant Physiol. Biochem.*, 31 (3), 369-378.
- Gupta A. K., Singh J., Kaur N. and Singh R. (1993b).** Effect of polyethylene glycol-induced water stress on uptake, interconversion and transport of sugars in chickpeaseedlings. *Plant Physiol. Biochem.* 31 (5), 743-747.
- Hallard J. (1982).** Semences potagères et florales. La sélection des haricots. *Bulletin semences* n° 81, 33-38.
- Henkel P.A. (1961).** Drought resistance in plants : Methods of recognition and of intensification. Plant-water relationships in arid and semi-arid conditions. *Proc. Of the Madrid Symposium*, UNESCO, 167-174.
- Hernandez-Armenta R., Wien H. C. et Eaglesham A. R. J. (1989a).** Maximum Temperature for Nitrogen Fixation in Common Bean. *Crop Sci.* 29, 1260-1265.
- Hernandez-Armenta R., Wien H. C. et Eaglesham A. R. J. (1989b).** Carbohydrate partitioning and nodule Function in common bean after heat stress. *Crop Sci.* 29, 1292-1297.
- Hiroshi Suge (non daté).** Dehydration and drought resistance in *Phaseolus vulgaris* as affected by mechanical stress. Report of the Institute for Agricultural research. Tohoko University (Japan).
- Hoddinott J., Ehret D. L. and Gorham Paul R. (1979).** Rapid influence of water stress on photosynthesis and translocation in *Phaseolus vulgaris*. *Can. J. Bot.* 57: 768-776.
- Hukkeri S. B. and Sharma A. K. (1980).** Irrigation requirement of field-pea for grain. *Indian J. agric. Sci.* 50 (2): 157-160.
- Husain M. M., Reid J. B., Othman H. and Gallagher J. N. (1990).** Growth and water use of *faba* beans *Vicia faba* in sub-humid climate. I. Root and Shoot adaptations to drought stress. *Field Crop Research* 23, 1-17.
- ICRISAT (1984).** Chickpea. *Annual Report 1984. Icrisat* 131-163.
- ITCF (1988).** Le pois-chiche: culture - utilisation. 12 p.
- ITCF, (1989).** Irrigation du pois : D'importants gains de rendement. *Cultivar* 254, 74-76.
- ITGC (1998).** Etude sur les perspectives de réhabilitation des légumineuses alimentaires en Algérie. Atelier ITGC, 22 février 1998, El-Harrach, Alger, pp 12.
- Jensen Anders B., Piter K. Busk, Mercé Figueras, M. Mar Alba, Giovanna**

- 
- Peracchia, Ramon Messeguer, Adela Goday et Montserrat Pagès (1996).** Drought signal transduction in plants. *Plant Growth Regulation* 20, 105-110.
- Jorge Jara R. (1990).** Repuesta a Sequia de Cinco Variedades de Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Estudio Preliminar. *Agro-Ciencia* 6 (2): 95-101.
- Jorge Jara R. y Juan Izquierdo F. (1988).** Repuesta Termica del Frijol Negro (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agro-Ciencia* 4(1): 11-20.
- Jorge Jara R., Juan Izquierdo F. and Ricardo Matta C. (1988).** Repuesta fisiomorfologica y productiva del frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.). Frente al deficit higrico. *Agro-Ciencia* 4(1): 21-26.
- Juan Tosso T. (1988).** Plant water relationship in beans (*Phaseolus vulgaris* L.). I. Soil-water depletion under different irrigation levels. *Agricultura Tecnica* 48 (3): 197-205.
- Kapuya J. A., Barendse G. W. M. and Linskins H. F. (1985).** Water Stress Tolerance and Proline Accumulation in *Phaseolus vulgaris*. *Acta Bota. Neetl.* 34 (3), 293-300.
- Karamanos A. J. (1978).** Water Stress and Leaf Growth of Field Beans (*Vicia faba* L.) in the Field: Leaf Number and Total Leaf Area. *Ann. Bot.* 42, 1393-1402.
- Karamanos A. J. (1986).** effects of Plant Water Status on Leaf Area Development and Yield of the *Vicia faba* Crop. *Vortr. Pflanzenzchtg* 11, 25-39.
- Karamanos A. J. et Gimenez C. (1991).** Physiological Factors Limiting Growth and Yield of *Faba* Beans. *Option Méditerranée: séries Séminaires* n° 10.
- Karamanos A. J., Elston J. and Wadsworth R. M. (1982).** Water Stress and Leaf Growth of Field Beans (*Vicia faba* L.) in the Field: Water Potentials and Laminar Expansion. *Ann. Bot.* 49, 815-826.
- Katerji N. et Itier B. (1985).** Critères physico-chimiques de stress hydrique. Application au déclenchement de l'irrigation. In : Les bases de la bioclimatologie. INRA, Méribel, 18-22 Mars 1985, 127-129.
- Khairallah M.M., Adams M.W. and Sears B.B. (1990).** Mitochondrial DNA polymorphisms of Malawian beans lines : further evidence for two major gene pools. *Theor. Appl. Genet.* 80, 753-761.
- Koehler H. H. and Burke D. W. (1988).** Nutrient and Sensory Properties of Dry Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) Grown Under Various Cultural Conditions. *Journal of Food Science - Volume 53, N° 4*, 1135-1139.
- Kramer P.J. (1980).** Drought, stress and the origin of adaptations. In : Adaptation of plants to water and high temperature stress. N.C. Turner, P.J. Kramer Eds., New York, Wiley Interscience, p. 7-20.
- Laumonier R. (1979).** Culture des légumineuses. In Cultures légumières et maraîchères, tome III, 121-171.
- Laupretre J. M. et Benoit M. (1989).** Diagnostic Agronomique de la culture de Frijol (*Phaseolus vulgaris*) - Cycle de primera 1989 - Dans les communautés de El Chile et Subuli. Région VI, Nicaragua. Mémoire de fin d'études, ISA de Lille, 66 p.
- Laurent E. (1992).** les haricots ne supportent pas le stress. bulletin *FNAMS Semences* n° 119, 38-40.
- Lecoeur J., Wery J. et Turc O. (1992).** Characterisation of the various types of
-

- mechanisms of adaptation to drought in field grown chickpeas( *Cicer arietinum* ). Proc. 2<sup>nd</sup> ESA Congress, Warwick Univ., 96-97.
- Ledraa S. (1993).** Contribution à la détermination de l'humidité optimale de la phase germination levée du haricot. Mémoire d'ingénieur, INA El-Harrach, 64p.
- Leterme Ph. Merrien A. (1991).** L'alimentation hydrique du soja. *Perspectives Agricoles* n° 161, 23-27.
- Levitt J., Sullivan C.Y., Krulle E. (1960).** Some problems in drought resistance. *Bull. Res. Counc. Isr.*, sect. D, 8 : 173-180.
- Loss S.P., Siddique K.H.M. and Tennant D. (1997).** Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-type environments. III. Water use and water use efficiency. *Field Crops Research* 54, 153-162.
- Maiti P. K. and Mukherji S. (1982).** Light and hormone effects on mungbean (*Phaseolus aureus* L.) seed germination under water stress. *Science and Culture* 48 (10), 343-345.
- Malik R. S. and Bhandari A. R. (1994).** Water requirement of pea (*Pisum sativum*) in Inceptisol of mid-Himalayas. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 64 (12): 847-849.
- Mandal B. K., Dasgupta S. et Ray P. K. (1986a).** Water use by wheat, chickpea and mustard grown as sole crops and intercrops. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 56 (3): 187-193.
- Mandal B. K., Dasgupta S. et Ray P. K. (1986b).** Yield of wheat, mustard and chickpea grown as sole and intercrops with four moisture regimes. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 56 (8): 577-583.
- Marcellos H. et Constable G. A. (1986).** Effects of plant density and sowing date on grain yield of faba beans (*Vicia faba* L.) in northern New South Wales. *Aust. J. Exp. Agric.* 26, 493-496.
- Martin I., Tenorio J. L. et Ayerbe L. (1994).** Yield Growth and Water Use of Conventional and Semileafless Peas in Semiarid Environments. *Crop Sci.* 34: 1576-1583.
- Masood A. et Kuchwaha B. L. (1985).** Technology for increasing gram production. *Indian Farming*, 35 (4): 12-16
- Mazliak P. ( 1982)** Croissance et développement. Physiologie végétale II. Collection Herman, 465p.
- Migahid A.M. (1961).** The drought resistance of Egyptian desert plants. *Proc. Of the Madrid Symposium*, UNESCO, 213-233.
- Monneveux P. et Belhassen E. (1996).** The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant Growth Regulation* 20, 85-92.
- Mouhouche B. (1994a).** Etude de l'effet du stress hydrique par la méthode de marquage des organes fructifères du haricot nain. *Annales de l'INA* 15 (1-2): 75-87.
- Mouhouche B. (1994b).** Effet du stress hydrique sur les composantes du rendement du haricot nain. *In* : Efficient and ecologically sound use of irrigation water with special reference to European countries. 17<sup>th</sup> European Regional Conference on Irrigation and Drainage. Varna, Bulgaria, 16-22 mai 1994, 11-17.
- Mouhouche B. (1996).** Effets du stress hydrique sur les composantes du rendement de

- la culture de fève (*Vicia faba* L.). In : Rehabilitation of *Faba* Bean.. Premier Séminaire du Réseau Maghrébin de recherche sur fève (REMAFEVE), Rabat, Maroc, 24-27 mai, 81-88.
- Mouhouche B. (1998).** Effets du stress hydrique sur les composantes du rendement de la culture de fève (*Vicia faba* L.). *Annales de l'Institut National Agronomique-El-Harrach* – Vol. 19, N° 1 et 2, 106-113.
- Mouhouche B. et Yahiaoui R. (1991).** Influence du stress hydrique sur la production agricole : cas du haricot nain (*Phaseolus vulgaris*). *Revue El-Ardh* N° 8, 14-15.
- Mouhouche B. et Boulassel A. (1997).** Gestion rationnelle des irrigations de complément des cultures de légumineuses et de céréales. *Recherche Agronomique* 1, 21-31.
- Mouhouche B., Ruget F. et Delécolle R. (1998a).** Effects of water stress applied at different phenological phases on yield components of dwarf bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomie*. 18, 197-205.
- Mouhouche B., Ruget F., Halitim A. et Delécolle R. (1998b).** Effets des irrigations d'appoint appliquées à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines. 1<sup>er</sup> Séminaire National sur les Légumineuses Alimentaires. Hammam-Bou- Hdjar, 10-12 Mai 1998.
- Mullet John E. et Whitsitt Mark S. (1996).** Plant cellular responses to water deficit. *Plant Growth Regulation* 20, 119-124.
- Namuco O.S. et O'Toole J.C. (1986).** Reproductive stage water stress and sterility. I. Effect of stress during meiosis. *Crop Science* 26, 2, 317-320.
- Ney B. and Turc O. (1993).** Heat unitbased description of the reproductive development of pea. *Crop Sci.* 33, 510-514.
- Ney B., Duthion C. et Fontaine E. (1993).** Timing of Reproductive Abortion in Relation to Cell, Water Content and Growth of Pea Seeds. *Crop Sci.* 33: 267-270.
- Ney B., Duthion C. et TURC O. (1994).** Phenological Response of Pea to Water Stress During Reproductive Development. *Crop Sci.* 34: 141-146.
- O'Toole J. C., Ozbun J. L. and Wallace D. H. (1977).** Photosynthetic Response to Water Stress in (*Phaseolus vulgaris*). *Physiol. Plant* 40: 111-114.
- Ollier Ch. et Poirée M. (1983).** Irrigation : les réseaux d'irrigation. Théorie, technique et économie des arrosages. Editions Ayrolle, Paris.
- Oppenheimer (1961).** L'adaptation à la sécheresse : le xérophytisme. *Proc. Of the Madrid Symposium*, UNESCO, 115-153.
- Orphanos P. I. (1993).** Irrigation and NP Fertilisation of *Phaseolus* Beans. Technical Bulletin 154. Agricultural Research Institute, Nicosia Cyprus. 17p.
- Osuna Garcia J. A. Ortega Delgado M. L. y Munoz Orozco A. (1988).** Contenido de Almidon en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo riego-sequia. *Agrociencia* N°. 72, 161-172.
- Pardossi A., Vernieri P. and Tognoni F. (1992).** Involvement of Abscissic Acid in Regulating Water Status in *Phaseolus vulgaris* L. During Chilling. *Plant Physiol.* 100 (3), 1243-1250.
- Parsons Lawrence R. and Howe Teresa K. (1984).** Effects of Water Stress on the

Water Relations of *Phaseolus vulgaris* and the drought Resistance *Phaseolus acutifolius*. *Physiol. Plant* 60: 197-202.

**Passin N. H., Benedito G. Dos Santos, Filho Dora Suely B., Dos Santos e Vera Delfina C. Mello (1991).** Performance of Bean Seeds From Plants Submitted to Water Deficit in Two Growing Stages. *Pesq. Agropec. bras., Brasília*, 26 (2), 183-192.

**Passioura J.B. (1996).** Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation* 20, 79-83.

**Patakas A., Noitsakis B., Stavrakas D. (1997).** Water relation parameters in *Vitis vinifera* L. in drought period. Effects of leaf age. *Agronomie* 17, 129-138.

**Pena Ramos A. y Abel Munoz Orozco (1988).** Respuestas de Tres Especies Cultivadas a Condiciones Deficientes de Humedad Edáfica. *Agrociencia* n° 74, 321-243.

**Pena Vadivia C.B. (1985).** Effects of mild water stress on *Phaseolus vulgaris* L. photosynthetic machinery. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* vol. 28, 51-52.

**Pena-Cabriales J. J. and Castellanos J. Z. (1993).** Effects of Water stress on N<sub>2</sub> Fixation and Grain Yield of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant and Soil* 152: 151-155.

**Penuelas J., Biel C. and Estiarte M. (1993).** Change in Biomass, Chlorophyll Content and Gas Exchange of Beans and Papers Under Nitrogen and Water Stress. *Photosynthetica* 29 (4): 535-542.

**Petersen A. C. (1985).** Effect of water stress on *Phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius* Gray. var. latifolius freeman. Thèse de Ph. D., University of Minnesota, 213 p.

**Petersen A. C. and Davis D. (1982).** Yield response of *Phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius* subjected to water stress. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* Vol. 25, 53-54.

**Pilbeam C. J., Hebblethwaite P. D. and Yusuf A. A. (1990).** Irrigation effects on development and yield of determinate and indeterminate forms of Autumn sown. *J. Sci. Food Agree.* 53, 443-454.

**Plies-Balzer E., Kong T., Schubert S. et Mengel (1995).** Effect of water stress on plant growth, nitrogenous activity and nitrogen economy of four different cultivars of (*Vicia faba* L.). *Eur. J. Agron.*, 4(2), 167-173.

**Rajagopal V. and Andersen S. (1980).** Water stress and root formation in pea cuttings. *J. Agron.* 48: 144-149.

**Raymond M. A., Stark J. C. and Murray G. A. (1987).** Irrigation Management Effects on Spring Pea Seed Yield and Quality. *HortScience* 22(6): 1262-1263.

**Raymond M. A., Stark J. C. and Murray G. A. (1988).** Final Irrigation Timing for Spring Pea Seed Production. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113(6): 827-830.

**Raynal-Roques A. (1994).** Les modes de vie. In *La botanique redécouverte* 255-257.

**Redden R. J., Diatloff A. et Usher U. (1990).** Field screening accessions of *Phaseolus vulgaris* for capacity to nodulate over a range of environments. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 30, 265- 270.

**Reid J. B. (1990).** Growth and Water Use of *Faba Beans (Vicia faba)* in Sub-humid climate. II Simulation Analysis of Crop Response To Drought. *Field Crop Research*

---

23, 19-38.

- Relave F. (1993).** Le pois-chiche: une alternative au pois et au blé dur pour le sud de la France. *Bulletin Semences* n° 124, 45-47.
- Rengasamy J. I. and Reid J. B. (1993).** Root System Modification of *Faba Beans* (*Vicia faba* L), and its Effects on Crop Performance. 2. Role of Water stress. *Field Crop Research* 33, 197-215.
- Robai A. (1998).** Contribution à la détermination de l'humidité optimale de la phases germination-levée de quatre légumineuses : haricot, pois-chiche, pois, fève. Mémoire d'ingénieur, INA- El-Harrach, 58p.
- Robelin M. (1983).** Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. *In* : Physiologie du Maïs. Royan, 15-17 Mars 1983, 445-476.
- Rode (1985).** Croissance et transfert d'assimilats. *In* : Les bases de la bioclimatologie. Méribel, 18-22 mars, 1985, 167-173.
- Romic D., Tomic F., Borosic J., Dolanjski D., Romic M., Jankovic M., Marusic J. et Geres D. (1994).** Effects of irrigation on components of secondary crops yields in Croatia. *In* : Efficient and ecologically sound use of irrigation water with special reference to European countries. 17<sup>th</sup> European Regional Conference on Irrigation and Drainage. Varna, Bulgaria, 16-22 mai 1994, 19-28.
- Salez P. and Saint Macary H. (1987).** Inoculation du haricot (*Phaseolus vulgaris*) par *Rhizobium phaseoli* au Cameroun. *L'AGRONOMIE TROPICALE* 42 (4):
- Samper C. and Wayne Adams M. (1985).** Yield Potentiel and Drought Susceptibility of Beans *Annual Report of Bean Improvement Cooperative* Vol. 28, 51-52.
- Samson C., Fetiarison R. et Montange D. (1989).** Nodulation du haricot en sol de rizière. *L'AGRONOMIE TROPICALE* 44, 105-???
- Sangakkara U. R. (1994).** Growth, yield and nodule activity of *Phaseolus vulgaris* L. as affected by Soil moisture. *J. Agronomy and Crop Science* 172, 62-68.
- Saxena M. C. (1984).** Effects of climatic stress and soil chemical toxicities on productivity of chickpea in West Asia and North Africa. Workshop ICRISAT 19-21 December 1984.
- Saxena M.C. (1993).** The challenge of developing biotic and abiotic stress resistance in cool-season food legumes. *In* : Breeding for stress tolerance in cool-season food legumes. K.B. Singh and M.C. Saxena eds. 1-14.
- Saxena M.C., Silim S.N. and Singh K.B. (1990).** Effect of supplementary irrigation during reproductive growth of winter and spring chickpea (*Cicer arietinum*) in a Mediterranean environment. *Journal of Agriculture Science* 114, 285-293.
- Schwartz A., Wei-Hua Wu, Tucker E. B. and Assmann S. M. (1994).** Inhibition of inward K<sup>+</sup> Channel and Stomatal Response by Abscisic Acid: An intercellular Locus of Phytohormone action. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol. 91, 4019-4023.
- Senthong C. et Pandey R.K. (1989).** Response of Five Food Legumes Crops to an Irrigation Gradient Imposed During Reproductive Growth. *Agronomy Journal* 81,
- Sepaskhah A.R. et Llampour S (1996).** Relationships between yield, crop water stress index (CWSI) and transpiration of cowpea (*Vigna sinensis* L.). *Agronomie* 16, 269-279.

- Sexton P.J., Boote K.J., White J.W., Peterson C.M. (1997).** Seed size and seed growth rate in relation to cotyledon cell volume and number in common bean. *Field Crop Research* 54, 163-172.
- Sexton P.J., White J.W., Boote K.J. (1994).** Yield-determining processes in relation to cultivar seed size of common bean. *Crop Sci.* 34, 84-91.
- Singh D. P., Singh Phool, Sharma H. C. and Turner N. C. (1987a).** Influence of water deficits on the water relations canopy gas exchange, and yield of chickpea (*Cicer arietinum*). *Field Crops Research*, 16, 231-241.
- Singh G. et Rai V. K. (1980).** Responses of two *Cicer arietinum* L. varieties to water stress. *Indian J. Ecol.* 7 (2), 246-253.
- Singh G. et Rai V. K. (1981).** Free proline accumulation and drought resistance in *Cicer arietinum*. *Biologia Plantarum* (Praha) 23 (2): 86-90.
- Singh G. et Rai V. K. (1982).** Response of two differentially sensitive *Cicer arietinum* L cultivars to water stress: protein content and drought resistance. *Biologia Plantarum* (Praha) 24 (1), 7-12.
- Singh R.A., Gupta S.C. and Moinbasha Syed (1987b).** Moisture needs of Indian mustard-chickpea intercropping. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 57 (8), 553-558.
- Sinha S.K. (1980).** Légumineuses alimentaires : répartition, adaptabilité, biologie du rendement. Bulletin FAO N° 3. Production végétale et protection des plantes.
- Slatyer R.O. (1973).** The effect of internal water status on plant growth, development and yield. *In* : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970, 177-191.
- Slavik B. (1973).** Transpiration resistance in leaves of maize grown in humid and dry air. : *In* : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes du Colloque d'Uppsala, UNESCO, 267-269.
- Smith M. (1992).** CROPWAT. Un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation. *Bulletin F.A.O. d'irrigation et de drainage* N° 46.
- Tabbada Reynaldo A. and Flores Ma. Agnes A. (1982).** Influence of soil water stress on vegetative and reproductive growth of *Phaseolus vulgaris* cv. White Baguio. *Kalikasan, Philipp. J. Biol.* 11 (2-3): 266-272.
- Tan Boun Suy (1978).** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez deux espèces du genre *Phaseolus* et leur hybride. *Bull. Rech. Agron. Gembloux* 13 (1) 73-82.
- Tardieu F. (1996).** Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress ? *Plant Growth Regulation* 20 : 93-104.
- Tardieu F., Ameglio T., Bréda N. et Dayau S. (1995).** Régulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse. Actes de L'Ecole-Chercheurs, INRA, Bioclimatologie. Le Croisic 3-7 avril 1995, 61-82.
- Trejo C. L. and Davies W. J. (1991).** Drought induced closure of *Phaseolus vulgaris* L. stomata precedes leaf water deficit and any increase in xylem ABA concentration. *Journal of Experimental Botany* Vol. 42, n°245, 1507-1515.
- Turc O., Lecoeur J., Combaud S. et Wery J. (1995).** Déficit hydrique et architecture

- 
- du pois. *Perspectives Agricoles* 203: 98-104.
- Turner N.C. (1979).** Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. *In* : Stress physiology of crop plants. H. Mussel, R.C. Staples Eds., New York Wiley Interscience, p. 343-372.
- Turner N.C. (1981).** Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil* 58, 339-366.
- Van Rheenen H.A., Saxena N.P., Singh K.B., Sethi S.C. and Acosta-Gallegos J.A. (1990).** Breeding des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970, 277-288.
- Vassey T. L. and Sharkey T. D. (1989).** Mild Water Stress of *Phaseolus vulgaris* Plants Leads to Reduced Starch Synthesis and Extractable Sucrose Phosphate Synthase Activity. *Plant Physiol.* 89, 1066-1070.
- Velich I. and Verro P. (1993).** Biotic and abiotic stress in *Phaseolus vulgaris* bean. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative*, Volume 36, 146-147.
- Venekamp J. H., Lampe J. E. M. and Koot J. T. M. (1989).** Organic Acids As a Sources for Drought-induced Proline Synthesis in Field Bean Plants (*Vicia faba* L.). *J. Plant Physiol.* Vol. 153, 654-655.
- Vernieri Paolo, Alberto Pardossi, Giovanni Serra and Franco Tognoni (1994).** Changes in abscissic acid and its glucose ester in *Phaseolus vulgaris* L. during chilling and water stress. *Plant growth regulation* 15: 157-163.
- Vieira Da Silva J.B. (1967).** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse dans le genre *Gossypium*. I. Transpiration des feuilles détachées et notion d'un indice de contrôle de la transpiration. *Coton et Fibres Trop.* 22, 2, 197-204.
- Vieira Da Silva J.B. (1973).** Influence de la sécheresse sur la photosynthèse et la croissance du cotonnier. *In* : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970, 213-.
- Walton D. C., Michael A. Harisson and Peter Cote (1976).** The effects of water stress on Abscissic-acid levels and metabolism in roots of *Phaseolus vulgaris* L. and other plants. *Planta* 131, 141-144.
- Wery J. (1986).** Un pois pas si chiche que cela!. bulletin FNAMS semences n° 97
- Wery J. (1990).** Adaptation to frost and drought stress in chickpea and implications in plant breeding. *Options Méditerranéennes - série Séminaires - n° 9 - 77-85.*
- Wery J. et Turc O. (1990).** Les besoins en eau des productions de semences de légumineuses. *Bulletin FNAMS Semences* N° 111, 22-25.
- Wery J., Deschamps M. et Leger-Cresson N. (1988).** Influence of some Agroclimatic Factors and Agronomic Practices on Nitrogen Nutrition of Chickpea (*Cicer arietinum* L.). D. P. Beck and L. A. Materon (editors), Nitrogen Fixation by Legumes in Mediterranean Agriculture.
- White J. W. and Castillo J. A. (1989).** Relative Effect of Root and Shoot Genotypes on Yield of Common Bean under Drought Stress. *Crop Sci.* 29, 360-362.
- White J. W. and Castillo J. A. (1992).** Evaluation of diverse Shoot Genotypes on Selected Root Genotypes of Common Bean Under Soil Water Stress. *Crop Sci.* 32: 762-765.
-

- White J. W., Castillo J. A. and Ehleringer J. (1990).** Associations between Productivity, Roots Growth and Carbon Isotope Discrimination in *Phaseolus vulgaris* under Water Stress. *Aust. j. Plant Physiol.* 17, 189-198.
- Winkel T. et Do F. (1992).** Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* L. R. Br.) à la sécheresse. *L'Agronomie Tropicale* 46, 4, 339-351.
- Yanes-Jimenez P. and Kohashi-Shibata J. (1987).** Effect of water stress on the ovules of *Phaseolus vulgaris* L.. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* 30: 293-300
- Ying Shen X. and Barbara D. Webster (1986).** Effects of Water Stress on Pollen of *Phaseolus vulgaris* L.. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111 (5): 807-810.
- Younis M. E., El-Chahaby O. A., Hasaneen M. N. A. and Gaber A. M. (1993).** Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress condition: XVII. Influence of different water treatments on stomatal apparatus, pigments and photosynthetic capacity in *Vicia faba*. *Journal of Arid Environments* 25, 221-232.
- Yu F. and Virginia S. Berg (1994).** Control of Parahelotropism in Two *Phaseolus* Species. *Plant Physiol* 106, 1567-1573.
- Zohary (1961).** On hydro-ecological relation of the near East desert vegetation. *Proc. Of the Madrid Symposium, UNESCO*, 199-212.

# ANNEXES

## I. Analyses de variance (annexes a1 – s3)

### A/ ESSAI SOUS serre (annexes a1 – n3)

---

**Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines**

| <i>Variables étudiées</i>                  | <i>Facteurs étudiés</i> | <i>ddl Factoriel</i> | <i>carré moyen</i> | <i>ddl Résidu</i> | <i>Carré moyen</i> | <i>F Observé</i> | <i>proba</i> |
|--|-------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------|
| Phase bouton (p1)                          | 1                       | 2                    | 9.96               | 12                | 13.96              | 0.71             | 0.51         |
| <b>(annexe a1)</b>                         | 2                       | 6                    | 3925.47            | 12                | 13.96              | 281.14           | 0.00         |
|  | 12                      | 12                   | 13.96              | C                 | 0.00               |                  |              |
| Phase fleur ouverte (p2)                   | 1                       | 2                    | 82.32              | 12                | 11.75              | 7.00             | 0.01         |
| <b>(annexe a2)</b>                         | 2                       | 6                    | 418.07             | 12                | 11.75              | 35.57            | 0.00         |
|  | 12                      | 12                   | 11.75              | C                 | 0.00               |                  |              |
| Phase de fin élancement de la gousse (p5)  | 1                       | 2                    | 44.00              | 12                | 22.54              | 1.95             | 0.18         |
| <b>(annexe a3)</b>                         | 2                       | 6                    | 924.98             | 12                | 22.54              | 41.03            | 0.00         |
|  | 12                      | 12                   | 22.54              | C                 | 0.00               |                  |              |
| Phase de fin remplissage de la gousse (p7) | 1                       | 2                    | 2.28               | 12                | 23.10              | 0.10             | 0.91         |
| <b>(annexe a4)</b>                         | 2                       | 6                    | 2327.04            | 12                | 23.10              | 100.73           | 0.00         |
|  | 12                      | 12                   | 23.10              | C                 | 0.00               |                  |              |

1/ Tableau d'analyse de variance à 2 critères de classification **FACTEUR 1**: années expérimentales (3) **FACTEUR 2**: dates de comptage des organes fructifères (7)  
**PHENOMENE DE CHEVAUCHEMENT ( annexes a1 à a4)**

| <i>Variables étudiées</i>                        | <i>Facteurs étudiés</i> | <i>ddl Factoriel</i> | <i>carré moyen</i> | <i>ddl Résidu</i> | <i>carré moyen</i> | <i>F observé</i> | <i>proba</i> |
|--|-------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------|
| Probabilité d'avortement des organes fructifères | 2                       | 1                    | 16068.15           | 6                 | 356.75             | 45.04            | 0.00         |
| <b>(annexe b)</b>                                | 1                       | 6                    | 13777.26           | 6                 | 356.75             | 38.62            | 0.00         |
|  | 12                      | 6                    | 356.75             | 154               | 40.65              | 8.78             | 0.00         |

2/ Tableau d'analyse de variance à 2 critères de classification **FACTEUR 1**: 7 Phases phénologiques d'application du stress **FACTEUR 2**: 2 régimes hydriques (stressé non stressé) **PROBABILITE D'AVORTEMENT (annexe b)**

| Variables étudiées                     | Facteurs étudiés | ddl Factoriel | carré moyen | ddl Résidu | carré moyen | F observé | proba |
|--|------------------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|
| Taux levurement                        | 1                | 2             | 130.94      | 12         | 75.45       | 1.77      | 0.21  |
| (différence par rapport à l'ETM)       | 2                | 7             | 755.10      | 12         | 75.45       | 10.11     | 0.01  |
| (annexe c)                             | 12               | 12            | 75.45       | 6          | 19.26       | 1.92      | 0.05  |
| Nombre de gousses par plante (NGo/Pl)  | 1                | 2             | 525.84      | 14         | 0.27        | 1406.35   | 0.01  |
| (annexe d)                             | 2                | 7             | 26.03       | 14         | 0.27        | 69.52     | 0.01  |
|  | 12               | 14            | 0.37        | 72         | 0.05        | 7.18      | 0.01  |
| Nombre de graines par plante (NGr/Pl)  | 1                | 2             | 10839.4     | 14         | 45.12       | 243.22    | 0.01  |
| (annexe e)                             | 2                | 7             | 355.95      | 14         | 45.12       | 12.974    | 0.01  |
|  | 12               | 14            | 45.12       | 72         | 28.59       | 1.5781    | 0.11  |
| Nombre de graines par gousses (NGr/Go) | 1                | 2             | 0.67        | 14         | 0.14        | 1.5       | 0.15  |
| (annexe f)                             | 2                | 7             | 0.19        | 14         | 0.14        | 1.74      | 0.19  |
|  | 12               | 14            | 0.14        | 72         | 0.12        | 1.17      | 0.12  |
| Poids des gousses par plante (PGo/Pl)  | 1                | 2             | 1682.79     | 14         | 6.41        | 26.41     | 0.01  |
| (annexe g)                             | 2                | 7             | 56.14       | 14         | 6.41        | 11.57     | 0.01  |
|  | 12               | 14            | 6.41        | 72         | 6.72        | 0.95      | 0.51  |
| Poids des gousses par plante (PGo/Pl)  | 1                | 2             | 2525.23     | 14         | 7.73        | 455.28    | 0.01  |
| (annexe h)                             | 2                | 7             | 151.76      | 14         | 7.73        | 19.84     | 0.01  |
|  | 12               | 14            | 7.73        | 72         | 12.81       | 0.60      | 0.55  |
| Poids des graines par gousses (FGo/Go) | 1                | 2             | 0.39        | 14         | 0.04        | 10.34     | 0.01  |
| (annexe i)                             | 2                | 7             | 0.13        | 14         | 0.04        | 3.39      | 0.02  |
|  | 12               | 14            | 0.04        | 72         | 0.02        | 1.56      | 0.11  |
| Poids moyen de la graine (PWGr)        | 1                | 2             | 0.00        | 14         | 0.00        | 3.83      | 0.05  |
| (annexe j)                             | 2                | 7             | 0.00        | 14         | 0.00        | 0.74      | 0.75  |
|  | 12               | 14            | 0.00        | 72         | 0.00        | 1.06      | 0.41  |
| Foible de matière sèche totale (MST)   | 1                | 2             | 7920.92     | 14         | 35.45       | 52.79     | 0.01  |
| (annexe k)                             | 2                | 7             | 490.86      | 14         | 35.45       | 5.16      | 0.01  |
|  | 12               | 14            | 65.45       | 72         | 1.588       | 0.74      | 0.73  |

3/ Tableau d'analyse de variance à 2 critères de classification FACTEUR 1: 3 années expérimentales FACTEUR 2: 8 phases phénologiques d'application du stress.  
COMPOSANTES DU RENDEMENT (annexes c à n3)

| Variables étudiées     | Facteurs étudiés | ddl Factoriel | carré moyen | ddl Résidu | carré moyen | F observé | proba |
|------------------------|------------------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|
| Indice de récolte (IR) | 1                | 2             | 0.02        | 14         | 0.00        | 8.06      | 0.00  |
| (annexe l)             | 2                | 7             | 0.00        | 14         | 0.00        | 0.99      | 0.47  |
|                        | 12               | 14            | 0.00        | 72         | 0.00        | 0.88      | 0.58  |

INDICE DE RECOLTE (annexe l)

**Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines**

| Variables étudiées   | Facteurs étudiés | ddl Factoriel | carré moyen | ddl Résidu | carré moyen | F observé | proba |
|----------------------|------------------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|
| Efficienc            | 1                | 2             | 724165.1    | 14         | 33829.9     | 21.41     | 0.00  |
| de l'eau (Production | 2                | 7             | 201024.2    | 14         | 33829.9     | 5.94      | 0.00  |
| de graines)          | 12               | 14            | 33829.80    | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe m1)</b>   |                  |               |             |            |             |           |       |
| Efficienc            | 1                | 2             | 400152.5    | 14         | 16337.9     | 24.49     | 0.00  |
| de l'eau (Production | 2                | 7             | 93974.10    | 14         | 16337.9     | 5.75      | 0.00  |
| de gousses)          | 12               | 14            | 16337.90    | 0          | 0.000       |           |       |
| <b>(annexe m2)</b>   |                  |               |             |            |             |           |       |
| Efficienc            | 1                | 2             | 153992.3    | 14         | 4374.04     | 35.66     | 0.00  |
| de l'eau (production | 2                | 7             | 12593.40    | 14         | 4374.04     | 2.88      | 0.04  |
| de MST)              | 12               | 14            | 4374.00     | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe m3)</b>   |                  |               |             |            |             |           |       |

*EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU (annexes m1 à m3)*

| Variables étudiées     | Facteurs étudiés | ddl Factoriel | carré moyen | ddl Résidu | carré moyen | F observé | proba |
|------------------------|------------------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|
| Indice de réponse      | 1                | 2             | 0.05        | 12         | 0.01        | 9.95      | 0.00  |
| à la sécheresse        | 2                | 6             | 0.09        | 12         | 0.01        | 17.11     | 0.00  |
| (Poids des graines)    | 12               | 12            | 0.01        | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe n1)</b>     |                  |               |             |            |             |           |       |
| Indice de réponse      | 1                | 2             | 0.00        | 12         | 0.01        | 0.36      | 0.70  |
| à la sécheresse        | 2                | 6             | 0.07        | 12         | 0.01        | 9.27      | 0.00  |
| (Poids des gousses)    | 12               | 12            | 0.01        | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe n2)</b>     |                  |               |             |            |             |           |       |
| Indice de réponse      | 1                | 2             | 0.08        | 12         | 0.00        | 22.62     | 0.00  |
| à la sécheresse        | 2                | 6             | 0.04        | 12         | 0.00        | 11.77     | 0.00  |
| (Matière sèche totale) | 12               | 12            | 0.00        | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe n3)</b>     |                  |               |             |            |             |           |       |

*INDICE DE REPONSE A LA SECHERESSE (annexes n1 à n3)*

**B/ ESSAI EN PLEIN CHAMP (annexes o1 – s3)**

| Variables étudiées   | Facteurs     |              | carré<br>moyen                   | ddl<br>Résidu  | carré<br>moyen                | F<br>observé              | proba                   |
|--|--------------|--------------|----------------------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|
|  | étudiés      | Factoriel    |                                  |                |                               |                           |                         |
| Poids des graines<br>par m <sup>2</sup> (PGr/m <sup>2</sup> )<br><b>(annexe o1)</b>      | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 95593.94<br>70305.75<br>4036.25  | 12<br>12<br>60 | 4336.25<br>4336.25<br>396.58  | 22.05<br>16.31<br>10.90   | 0.00<br>0.00<br>0.00    |
| Poids des gousses<br>par m <sup>2</sup> (PGo/m <sup>2</sup> )<br><b>(annexe o2)</b>      | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 177773.9<br>110970.2<br>7793.90  | 12<br>12<br>60 | 7793.9<br>7793.9<br>626.52    | 22.81<br>17.31<br>12.11   | 0.00<br>0.00<br>0.00    |
| Poids de matière sèche<br>par m <sup>2</sup> (MST/m <sup>2</sup> )<br><b>(annexe o3)</b> | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 407713.9<br>540434.5<br>31224.00 | 12<br>12<br>60 | 51224.0<br>31224.0<br>1561.20 | 13.81<br>17.31<br>20.00   | 0.00<br>0.00<br>0.00    |
| Poids des graines<br>par gousse (PGr/Gc)<br><b>(annexe o4)</b>                           | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 7.62<br>7.37<br>7.08             | 12<br>12<br>60 | 0.1<br>0.1<br>0.0             | 124.30<br>3.268<br>29.583 | 0.000<br>0.003<br>0.000 |
| Nombre de graines<br>par m <sup>2</sup> (NGr/m <sup>2</sup> )<br><b>(annexe p1)</b>      | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 307325.4<br>709759.9<br>49650.90 | 12<br>12<br>60 | 49650.9<br>49650.9<br>3897.14 | 5.15<br>14.30<br>13.43    | 0.01<br>0.00<br>0.00    |
| Nombre de gousses<br>par m <sup>2</sup> (NGo/m <sup>2</sup> )<br><b>(annexe p2)</b>      | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 373163.0<br>50723.40<br>2181.70  | 12<br>12<br>60 | 2181.70<br>2181.70<br>690.55  | 171.04<br>24.60<br>0.12   | 0.00<br>0.00<br>0.00    |
| Nombre de graines<br>par gousse (NGr/Gc)<br><b>(annexe p3)</b>                           | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 24.28<br>1.87<br>0.64            | 12<br>12<br>60 | 0.64<br>0.64<br>0.01          | 113.71<br>3.92<br>86.65   | 0.00<br>0.07<br>0.00    |
| Poids moyen<br>de la gousse (PMGo)<br><b>(annexe q1)</b>                                 | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 14.00<br>0.12<br>0.06            | 12<br>12<br>60 | 0.08<br>0.08<br>0.01          | 237.29<br>2.05<br>3.82    | 0.00<br>0.15<br>0.00    |
| Poids moyen<br>de la graine (PMGr)<br><b>(annexe q2)</b>                                 | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 0.22<br>0.00<br>0.00             | 12<br>12<br>60 | 0.00<br>0.00<br>0.00          | 651.41<br>4.02<br>16.31   | 0.00<br>0.08<br>0.00    |

1/ Tableau d'analyse de variance à 2 critères de classification **FACTEUR 1**: 4 espèces  
**FACTEUR 2**: 5 phses d'irrigation d'appoint. **COMPOSANTES DU RENDEMENT (**  
**annexes o1 à q2)**

| Variables étudiées                           | Facteurs     |              | carré<br>moyen       | ddl<br>Résidu  | carré<br>moyen    | F<br>observé          | proba                |
|--|--------------|--------------|----------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
|  | étudiés      | Factoriel    |                      |                |                   |                       |                      |
| Indice de récolte (IR)<br><b>(annexe q3)</b> | 1<br>2<br>12 | 3<br>4<br>12 | 0.07<br>0.00<br>0.00 | 12<br>12<br>60 | 0.0<br>0.0<br>0.0 | 26.55<br>1.87<br>1.97 | 0.00<br>0.18<br>0.04 |

**INDICE DE RECOLTE (annexe q3)**

**Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines**

| Variables étudiées   | Facteurs étudiés | ddl Factoriel | carré moyen | ddl Résidu | carré moyen | F observé | Proba |
|----------------------|------------------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|
| Efficienc            | 1                | 3             | 0.88        | 12         | 0.13        | 7.03      | 0.01  |
| de l'eau (Production | 2                | 4             | 1.00        | 12         | 0.13        | 7.98      | 0.00  |
| de graines)          | 12               | 12            | 0.13        | 20         | 0.13        | 0.96      | 0.51  |
| <b>(annexe r1)</b>   |                  |               |             |            |             |           |       |
| Efficienc            | 1                | 3             | 1.74        | 12         | 0.22        | 7.85      | 0.00  |
| de l'eau (Production | 2                | 4             | 1.55        | 12         | 0.22        | 7.01      | 0.00  |
| de gousses)          | 12               | 12            | 0.22        | 20         | 0.22        | 1.00      | 0.48  |
| <b>(annexe r2)</b>   |                  |               |             |            |             |           |       |
| Efficienc            | 1                | 3             | 4.34        | 12         | 1.87        | 2.32      | 0.13  |
| de l'eau (production | 2                | 4             | 3.50        | 12         | 1.87        | 1.87      | 0.18  |
| de MST)              | 12               | 12            | 1.87        | 20         | 0.76        | 2.46      | 0.04  |
| <b>(annexe r3)</b>   |                  |               |             |            |             |           |       |

**EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU (annexes r1 à r3)**

| Variables étudiées            | Facteurs étudiés | ddl Factoriel | carré moyen | ddl Résidu | carré moyen | F observé | proba |
|-------------------------------|------------------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|
| Indice de réponse             | 1                | 3             | 0.04        | 12         | 0.00        | 10.85     | 0.00  |
| à la sécheresse               | 2                | 4             | 0.25        | 12         | 0.00        | 68.69     | 0.00  |
| (Production de graines)       | 12               | 12            | 0.00        | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe s1)</b>            |                  |               |             |            |             |           |       |
| Indice de réponse             | 1                | 3             | 0.04        | 12         | 0.00        | 10.98     | 0.00  |
| à la sécheresse               | 2                | 4             | 0.24        | 12         | 0.00        | 63.15     | 0.00  |
| (Production de gousses)       | 12               | 12            | 0.00        | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe s2)</b>            |                  |               |             |            |             |           |       |
| Indice de réponse             | 1                | 3             | 0.05        | 12         | 0.01        | 5.7       | 0.0   |
| à la sécheresse               | 2                | 4             | 0.25        | 12         | 0.01        | 31.1      | 0.0   |
| (Production de matière sèche) | 12               | 12            | 0.01        | 0          | 0.00        |           |       |
| <b>(annexe s3)</b>            |                  |               |             |            |             |           |       |

**INDICE DE REPONSE A LA SECHERESSE (annexes s1 à s3)**

**II. MOYENNES DES VALEURS OBSERVEES DES VARIABLES ETUDIEES (annexes t1 - t9)**

## 1. Essais sous serre 1992, 93 et 94 : (annexes t1 à t6)

| Années<br>expérimentales | Date de marquage<br>(Jours après début<br>floraison) | Phases phénologiques de comptage des<br>organes fructifères de chaque plante (%) |       |       |       |
|--------------------------|--|--|-------|-------|-------|
|                          |  | P1   | P2    | P5    | P7    |
| 1992                     | 4  | 86.67  | 15.33 | 0.00  | 5.00  |
| 1992                     | 8  | 74.33  | 23.00 | 1.00  | 6.33  |
| 1992                     | 12   | 36.00  | 46.00 | 14.67 | 7.33  |
| 1992                     | 16   | 17.00  | 34.00 | 36.67 | 16.33 |
| 1992                     | 20   | 10.67  | 15.33 | 48.33 | 24.67 |
| 1992                     | 24   | 1.00   | 11.00 | 23.00 | 51.00 |
| 1992                     | 28   | 0.00   | 5.00  | 23.00 | 69.00 |
| 1993                     | 4  | 93.00  | 7.00  | 0.00  | 0.00  |
| 1993                     | 8  | 75.00  | 22.00 | 3.25  | 0.00  |
| 1993                     | 12   | 39.00  | 34.00 | 20.75 | .50   |
| 1993                     | 16   | 26.00  | 26.00 | 32.25 | 15.75 |
| 1993                     | 20   | 7.25   | 8.00  | 52.00 | 33.50 |
| 1993                     | 24   | .50  | 4.00  | 35.00 | 60.50 |
| 1993                     | 28   | 0.00   | 3.00  | 20.00 | 75.00 |
| 1994                     | 4  | 82.50  | 15.00 | 0.00  | 0.00  |
| 1994                     | 8  | 79.75  | 15.00 | 5.50  | 0.00  |
| 1994                     | 12   | 44.00  | 32.00 | 24.50 | 0.00  |
| 1994                     | 16   | 16.00  | 25.00 | 40.25 | 18.75 |
| 1994                     | 20   | 4.25   | 14.00 | 43.50 | 39.25 |
| 1994                     | 24   | .50  | 7.00  | 44.00 | 49.50 |
| 1994                     | 28   | 0.00   | 6.00  | 24.00 | 70.00 |

**Annexe t1:** moyennes des valeurs observées du taux de chevauchement des organes fructifères (en % par rapport au nombre total des organes de chaque plante) (Essais sous serre : 1992, 93 et 94)

**Annexe t2 :** Moyennes des valeurs observées de la probabilité d'avortement des organes fructifères (%) (Essais sous serre : 1992, 93 et 94)

**Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines**

---

| Années expérimentales | Phases d'application du stress | Régime hydrique |       |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------|-------|
|                       |                                | stressé         | ETM   |
| 1992                  | p1                             | 72,75           | 54    |
| 1992                  | p2                             | 72              | 48    |
| 1992                  | p3                             | 70,5            | 35    |
| 1992                  | p4                             | 47              | 14    |
| 1992                  | p5                             | 28              | 5     |
| 1992                  | p6                             | 14              | 1     |
| 1992                  | p7                             | 10              | 0,75  |
| 1993                  | p1                             | 68,5            | 57    |
| 1993                  | p2                             | 67              | 50,5  |
| 1993                  | p3                             | 63              | 38    |
| 1993                  | p4                             | 44,75           | 20    |
| 1993                  | p5                             | 22              | 6     |
| 1993                  | p6                             | 16,25           | 0,5   |
| 1993                  | p7                             | 13,75           | 0,25  |
| 1994                  | p1                             | 74,5            | 56,25 |
| 1994                  | p2                             | 72,25           | 42,5  |
| 1994                  | p3                             | 69,5            | 38,5  |
| 1994                  | p4                             | 52              | 28    |
| 1994                  | p5                             | 31              | 17,5  |
| 1994                  | p6                             | 14,75           | 7,25  |
| 1994                  | p7                             | 12              | 4,75  |

| Années<br>expérimentales | Phases<br>phénologiques | Régimes hydriques |       |
|--------------------------|-------------------------|-------------------|-------|
|                          |                         | Stressé           | ETM   |
| 1992                     | p1                      | 1.780             | 1.320 |
| 1992                     | p2                      | 2.180             | 1.450 |
| 1992                     | p3                      | 2.630             | 1.300 |
| 1992                     | p4                      | 2.140             | .630  |
| 1992                     | p5                      | 1.650             | .290  |
| 1992                     | p6                      | 1.170             | .100  |
| 1992                     | p7                      | .750              | .070  |
| 1992                     | ETM                     | .740              | .740  |
| 1993                     | p1                      | 1.720             | 1.450 |
| 1993                     | p2                      | 2.030             | 1.510 |
| 1993                     | p3                      | 2.330             | 1.180 |
| 1993                     | p4                      | 2.040             | .910  |
| 1993                     | p5                      | 1.290             | .350  |
| 1993                     | p6                      | 1.330             | 0.000 |
| 1993                     | p7                      | 1.000             | 0.000 |
| 1993                     | ETM                     | .770              | .770  |
| 1994                     | p1                      | 1.900             | 1.410 |
| 1994                     | p2                      | 2.250             | 1.370 |
| 1994                     | p3                      | 2.550             | 1.370 |
| 1994                     | p4                      | 2.720             | 1.270 |
| 1994                     | p5                      | 1.350             | .940  |
| 1994                     | p6                      | 1.000             | .580  |
| 1994                     | p7                      | .790              | .350  |
| 1994                     | ETM                     | 1.040             | 1.040 |

*Annexe t3 : Moyennes des valeurs observées du taux d'avortement journalier (en % par rapport au total) (Essais sous serre : 1992, 93 et 94)*

**Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines**

| Facteurs étudiés      |                               | Variables étudiées (composantes du rendement)            |       |        |       |   |       |         |      |                          |       |
|-----------------------|-------------------------------|--|-------|--------|-------|---|-------|---------|------|--------------------------|-------|
| Années expérimentales | Phase d'application du stress | Composantes exprimées en nombre par plante ou par graine |       |        |       | Composantes exprimées en poids par plante ou par graine |       |         |      | Rapports des composantes |       |
|                       |                               | SDSDF  | SDLDG | SDSDG  | SDGDF | FDSDG   | FDSDG | FDSDG   | MDT  | DMCA                     | DMCDS |
| 1992                  | p0                            | 2,52   | 41,2  | 33,56  | 11,61 | 12,62   | 1,268 | 31,70   | 3,15 | 1,294                    | 2,9%  |
| 1992                  | p3                            | 11,70  | 33,7  | 37,74  | 17,35 | 18,26   | 1,300 | 32,90   | 3,07 | 1,337                    | 3,9%  |
| 1992                  | p5                            | 9,32   | 3,56  | 33,84  | 13,35 | 19,14   | 1,425 | 36,00   | 3,60 | 2,042                    | 2,6%  |
| 1992                  | p1                            | 15,90  | 41,1  | 33,53  | 22,01 | 22,11   | 1,326 | 31,13   | 3,12 | 2,019                    | 2,3%  |
| 1992                  | p5                            | 14,71  | 4,7   | 34,40  | 17,32 | 24,72   | 1,422 | 30,15   | 3,01 | 1,333                    | 4,0%  |
| 1992                  | p6                            | 14,02  | 4,31  | 33,35  | 20,35 | 29,23   | 1,454 | 46,39   | 3,23 | 2,114                    | 4,1%  |
| 1992                  | p7                            | 13,20  | -1,60 | 16,17  | 15,35 | 22,87   | 1,252 | 29,93   | 3,18 | 1,633                    | 2,3%  |
| 1992                  | E, F, H                       | 10,35  | 4,50  | 21,52  | 21,01 | 20,75   | 1,327 | 29,13   | 3,35 | 2,005                    | 2,0%  |
| 1993                  | p1                            | 13,00  | 3,37  | 47,7   | 15,34 | 15,72   | 1,400 | 3,37    | 3,37 | 2,101                    | 3,3%  |
| 1993                  | p2                            | 14,95  | 3,12  | 55,7   | 20,79 | 29,67   | 1,391 | 24,35   | 3,74 | 1,929                    | 2,6%  |
| 1993                  | p3                            | 14,25  | 3,75  | 49,7   | 18,36 | 27,22   | 1,320 | 21,71   | 3,05 | 1,924                    | 2,3%  |
| 1993                  | p4                            | 13,35  | 3,31  | 33,64  | 13,65 | 20,85   | 1,300 | 26,33   | 3,01 | 1,340                    | 3,0%  |
| 1993                  | p5                            | 19,23  | 4,10  | 34,38  | 23,94 | 23,02   | 1,369 | 22,39   | 3,80 | 2,337                    | 2,9%  |
| 1993                  | p6                            | 19,30  | -1,02 | 23,09  | 20,43 | 13,90   | 1,336 | 21,06   | 3,87 | 2,051                    | 2,1%  |
| 1993                  | p7                            | 21,91  | 4,75  | 23,70  | 17,33 | 15,31   | 1,395 | 22,30   | 3,31 | 1,333                    | 2,0%  |
| 1993                  | E, F, H                       | 25,66  | 4,72  | 113,94 | 22,63 | 20,72   | 1,330 | 33,61   | 3,33 | 2,343                    | 2,0%  |
| 1994                  | p1                            | 12,35  | 3,12  | 45,3   | 15,11 | 27,12   | 1,333 | 63,04   | 4,17 | 2,250                    | 2,9%  |
| 1994                  | p2                            | 13,00  | 3,70  | 15,35  | 13,61 | 26,21   | 1,327 | 63,00   | 4,06 | 2,003                    | 2,9%  |
| 1994                  | p3                            | 11,35  | 3,12  | 33,33  | 13,43 | 23,72   | 1,400 | 33,20   | 4,02 | 2,155                    | 2,9%  |
| 1994                  | p4                            | 15,75  | 3,82  | 31,38  | 24,65 | 33,32   | 1,349 | 22,34   | 4,03 | 2,013                    | 2,3%  |
| 1994                  | p5                            | 17,25  | 4,50  | 21,55  | 20,71 | 22,23   | 1,368 | 31,31   | 4,10 | 2,111                    | 2,0%  |
| 1994                  | p6                            | 13,93  | 4,49  | 34,95  | 14,12 | 27,12   | 1,311 | 24,73   | 4,03 | 1,311                    | 2,9%  |
| 1994                  | p7                            | 23,23  | 4,22  | 102,60 | 23,63 | 24,25   | 1,323 | 21,15   | 3,83 | 2,332                    | 2,0%  |
| 1994                  | E, F, H                       | 25,09  | 4,25  | 111,36 | 22,13 | 23,83   | 1,380 | 1,05,72 | 3,78 | 2,545                    | 2,3%  |

**Annexe t4 : Moyennes des valeurs observées des composantes du rendement (Essais sous serre : 1992, 93 et 94)**

| Facteurs étudiés      |                                | Efficience d'utilisation de l'eau (EUE)<br>(grammes d'eau par gramme de récolte à l'état sec) |                       |                                    |
|-----------------------|--------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|
| Années expérimentales | Phases d'application du stress | Production de graines   | Production de gousses | Production de matière sèche totale |
| 1992                  | r1                             | 2067.62   | 1407.82               | 723.59                             |
| 1992                  | r2                             | 1705.99   | 1178.75               | 635.57                             |
| 1992                  | r3                             | 1602.07   | 1118.32               | 594.47                             |
| 1992                  | r4                             | 580.17  | 672.91                | 422.83                             |
| 1992                  | r5                             | 543.18  | 629.64                | 383.22                             |
| 1992                  | r6                             | 1099.57   | 761.44                | 455.76                             |
| 1992                  | r7                             | 1209.19   | 1123.35               | 585.28                             |
| 1992                  | ETM                            | 869.52  | 661.94                | 350.08                             |
| 1993                  | r1                             | 1144.88   | 799.44                | 395.93                             |
| 1993                  | r2                             | 976.75  | 684.22                | 370.77                             |
| 1993                  | r3                             | 1114.13   | 757.51                | 400.28                             |
| 1993                  | r4                             | 838.28  | 528.41                | 309.27                             |
| 1993                  | r5                             | 708.02  | 470.77                | 285.00                             |
| 1993                  | r6                             | 722.28  | 501.17                | 309.59                             |
| 1993                  | r7                             | 663.40  | 503.79                | 310.88                             |
| 1993                  | ETM                            | 749.73  | 431.53                | 314.58                             |
| 1994                  | r1                             | 821.66  | 566.43                | 241.41                             |
| 1994                  | r2                             | 501.20  | 626.89                | 268.37                             |
| 1994                  | r3                             | 1143.22   | 796.22                | 318.96                             |
| 1994                  | r4                             | 746.55  | 523.52                | 254.37                             |
| 1994                  | r5                             | 634.54  | 459.99                | 231.20                             |
| 1994                  | r6                             | 600.59  | 431.24                | 226.19                             |
| 1994                  | r7                             | 522.26  | 362.44                | 213.92                             |
| 1994                  | ETM                            | 521.76  | 344.47                | 200.40                             |

**Annexe t5 :** Moyennes des valeurs calculées de l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) (grammes d'eau par gramme de récolte à l'état sec) (Essais sous serre : 1992, 93 et 94)

**Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines**

| Facteurs étudiés      |                                | Indice de réponse à la sécheresse (IRS) |                   |                      |
|-----------------------|--------------------------------|---|-------------------|----------------------|
| Années expérimentales | Phases d'application du stress | Poids des graines                       | Poids des gousses | Matière sèche totale |
| 1992                  | p1                             | 0,657                                   | 0,517             | 1,606                |
| 1992                  | p2                             | 0,588                                   | 0,547             | 1,553                |
| 1992                  | p3                             | 0,570                                   | 0,531             | 1,533                |
| 1992                  | p4                             | 0,290                                   | 0,213             | 1,338                |
| 1992                  | p5                             | 0,252                                   | 0,147             | 1,259                |
| 1992                  | p6                             | 0,338                                   | 0,272             | 1,357                |
| 1992                  | p7                             | 0,377                                   | 0,439             | 1,482                |
| 1992                  | ETM                            | 0,000                                   | 0,000             | 1,000                |
| 1993                  | p1                             | 0,494                                   | 0,583             | 1,386                |
| 1993                  | p2                             | 0,401                                   | 0,508             | 1,338                |
| 1993                  | p3                             | 0,464                                   | 0,546             | 1,374                |
| 1993                  | p4                             | 0,260                                   | 0,325             | 1,159                |
| 1993                  | p5                             | 0,137                                   | 0,253             | 1,100                |
| 1993                  | p6                             | 0,122                                   | 0,271             | 1,140                |
| 1993                  | p7                             | -0,004                                  | 0,239             | 1,101                |
| 1993                  | ETM                            | 0,000                                   | 0,000             | 1,000                |
| 1994                  | p1                             | 0,547                                   | 0,566             | 1,408                |
| 1994                  | p2                             | 0,558                                   | 0,580             | 1,430                |
| 1994                  | p3                             | 0,633                                   | 0,552             | 1,495                |
| 1994                  | p4                             | 0,415                                   | 0,450             | 1,341                |
| 1994                  | p5                             | 0,271                                   | 0,336             | 1,232                |
| 1994                  | p6                             | 0,191                                   | 0,356             | 1,174                |
| 1994                  | p7                             | 0,107                                   | 0,150             | 1,162                |
| 1994                  | ETM                            | 0,000                                   | 0,000             | 1,000                |

*Annexe t6 : Moyennes des valeurs calculées de l'indice de réponse à la sécheresse (IRS) (Essais sous serre : 1992, 93 et 94)*

**2. Essai en plein champ, 1995 (annexes t7 à t9)**

| Animaux de référence |  | Groupes d'absorption les plus performants du plein champ |        |                      |  | Groupes d'absorption les moins performants du plein champ |        |       | Rapport entre les performances |       |       |
|----------------------|--|--|--------|----------------------|--|---|--------|-------|--------------------------------|-------|-------|
| Espèces              | Classes d'hybridation de l'origine et d'insémination | Groupes d'absorption les plus performants                |        | Matière sèche (t/ha) | Groupes d'absorption les moins performants |   | GPD    | PMO   | PMO/G                          | F     |       |
|                      |  | Graines  | Omme   |                      | Graines                                    | Omme  |        |       |                                |       |       |
| Delia                | BTM  | 138,00   | 10,75  | 342,03               | 0,26                                       | 408,37  | 530,09 | 19,8  | 0,333                          | 0,254 | 0,405 |
| Delia                | TV   | 83,70  | 10,25  | 135,25               | 0,247                                      | 382,54  | 301,31 | 1,977 | 0,335                          | 0,350 | 0,409 |
| Delia                | FL   | 95,90  | 11,50  | 205,49               | 0,26                                       | 312,50  | 305,29 | 0,868 | 0,334                          | 0,331 | 0,462 |
| Delia                | GG   | 99,28  | 16,25  | 337,23               | 0,257                                      | 339,21  | 385,79 | 0,880 | 0,338                          | 0,392 | 0,39  |
| Delia                | SGC  | 21,00  | 9,25   | 159,75               | 0,234                                      | 195,49  | 242,12 | 1,241 | 0,319                          | 0,325 | 0,271 |
| Haricot              | BTM  | 134,35   | 22,75  | 400,47               | 0,27                                       | 301,50  | 156,18 | 0,507 | 0,334                          | 0,345 | 0,221 |
| Haricot              | TV   | 92,00  | 19,00  | 149,21               | 0,246                                      | 232,59  | 24,15  | 1,752 | 0,323                          | 0,291 | 0,211 |
| Haricot              | FL   | 84,70  | 10,25  | 255,97               | 0,440                                      | 314,13  | 90,29  | 0,255 | 0,277                          | 0,324 | 0,222 |
| Haricot              | GG   | 99,90  | 121,50 | 384,24               | 0,258                                      | 335,21  | 76,90  | 4,488 | 0,333                          | 0,280 | 0,250 |
| Haricot              | SGC  | 28,00  | 12,75  | 173,90               | 0,115                                      | 212,42  | 30,73  | 1,280 | 0,333                          | 0,331 | 0,217 |
| Foin                 | KITA   | 301,00   | 30,50  | 473,75               | 0,443                                      | 1163,96   | 242,30 | 5,952 | 0,112                          | 0,126 | 0,222 |
| Foin                 | TV   | 100,00   | 12,00  | 233,43               | 0,38                                       | 340,11  | 75,32  | 4,895 | 2,228                          | 0,295 | 0,403 |
| Foin                 | FL   | 150,00   | 23,00  | 417,02               | 0,196                                      | 309,93  | 85,00  | 6,027 | 2,313                          | 0,291 | 0,223 |
| Foin                 | GG   | 216,75   | 23,00  | 470,24               | 0,37                                       | 321,33  | 130,19 | 4,970 | 1,474                          | 0,287 | 0,223 |
| Foin                 | SGC  | 88,00  | 10,00  | 242,65               | 0,392                                      | 332,39  | 80,90  | 4,117 | 0,333                          | 0,255 | 0,263 |
| Bézoard              | BTM  | 383,75   | 31,25  | 813,60               | 0,755                                      | 772,38  | 221,50 | 3,505 | 2,333                          | 0,492 | 0,333 |
| Bézoard              | TV   | 173,90   | 22,25  | 326,43               | 0,702                                      | 361,26  | 104,41 | 3,483 | 2,272                          | 0,450 | 0,443 |
| Bézoard              | FL   | 219,00   | 26,00  | 484,44               | 0,322                                      | 454,75  | 125,14 | 3,368 | 2,177                          | 0,462 | 0,452 |
| Bézoard              | GG   | 211,00   | 30,00  | 569,72               | 0,533                                      | 342,95  | 160,23 | 3,230 | 2,139                          | 0,491 | 0,403 |
| Bézoard              | SGC  | 181,90   | 30,50  | 387,55               | 0,502                                      | 345,45  | 103,59 | 3,213 | 2,041                          | 0,458 | 0,420 |

*Annexe 17 : Moyennes des valeurs observées des composantes du rendement (Essai en plein champ : 1995)*



| Facteurs étudiés |  | Indice de réponse à la sécheresse (IRS) |                       |                       |
|------------------|--|---|-----------------------|-----------------------|
| Espèces          | Phases d'application de l'irrigation d'appoint | Production de matière Sèche totale      | Production de graines | Production de gousses |
| P. chiche        | ETM  | 0.000                                   | 0.000                 | 0.000                 |
| P. chiche        | DV   | .429                                    | .399                  | .372                  |
| P. chiche        | FL   | .335                                    | .308                  | .312                  |
| P. chiche        | DG   | .396                                    | .281                  | .261                  |
| P. chiche        | SEC  | .547                                    | .493                  | .466                  |
| Haricot          | ETM  | 0.000                                   | 0.000                 | 0.000                 |
| Haricot          | DV   | .712                                    | .684                  | .677                  |
| Haricot          | FL   | .629                                    | .562                  | .563                  |
| Haricot          | DG   | .588                                    | .493                  | .491                  |
| Haricot          | SEC  | .745                                    | .715                  | .695                  |
| Pois             | ETM  | 0.00                                    | 0.000                 | 0.000                 |
| Pois             | DV   | .510                                    | .679                  | .673                  |
| Pois             | FL   | .483                                    | .533                  | .533                  |
| Pois             | DG   | .722                                    | .359                  | .361                  |
| Pois             | SEC  | .734                                    | .726                  | .727                  |
| Féverole         | ETM  | 0.000                                   | 0.000                 | 0.000                 |
| Féverole         | DV   | .530                                    | .540                  | .547                  |
| Féverole         | FL   | .426                                    | .429                  | .431                  |
| Féverole         | DG   | .306                                    | .294                  | .299                  |
| Féverole         | SEC  | .540                                    | .579                  | .594                  |

**Annexe t9 : Moyennes des valeurs calculées de l'indice de réponse à la sécheresse (IRS)**  
(Essai en plein champ : 1995)