



**HAL**  
open science

## Elaboration du rendement du ble dur en conditions semi-arides en Tunisie: relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique

K. Latiri-Souki, C. Aubry, Thierry Doré, Michel Sebillotte

### ► To cite this version:

K. Latiri-Souki, C. Aubry, Thierry Doré, Michel Sebillotte. Elaboration du rendement du ble dur en conditions semi-arides en Tunisie: relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique. *Agronomie*, 1992, 12 (1), pp.31-43. hal-02711810

**HAL Id: hal-02711810**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02711810>**

Submitted on 1 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Élaboration du rendement du blé dur en conditions semi-arides en Tunisie : relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique

K Latiri-Souki <sup>1</sup>, C Aubry <sup>2</sup>, T Doré <sup>3</sup>, M Sebillotte <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherches du génie rural, BP 10, 2080 L'Ariana, Tunisie;

<sup>2</sup> INRA, laboratoire SAD, 78850 Thiverval-Grignon;

<sup>3</sup> INA-PG, chaire d'agronomie, 16, rue Claude-Bernard, 75005 Paris, France

(Reçu le 20 décembre 1990; accepté le 25 novembre 1991)

**Résumé** — L'élaboration du rendement du blé dur en climat semi-aride tunisien est étudiée afin de disposer de références permettant le diagnostic de facteurs limitants au champ. On teste sur blé dur les relations entre composantes du rendement établies sur blé tendre en climat tempéré. En conditions où seuls la température et le rayonnement intercepté sont limitants, on obtient, sur blé dur, des relations analogues à celles établies sur blé tendre. Le paramétrage de ces relations est ici proposé. Le comportement du blé dur en conditions variables de nutrition azotée et hydrique au cours de 2 années de climat contrasté est étudié en utilisant les modèles préalables comme outils de diagnostic. Dans tous les cas, la principale composante liée au rendement est le nombre de grains par m<sup>2</sup>, qui dépend des conditions de croissance et de développement pendant la phase semis-floraison. La composante « poids d'un grain » est cependant affectée par les conditions d'alimentation hydrique, à travers la durée de la phase de remplissage du grain. On met en évidence en année humide l'influence du fractionnement de l'azote apporté sur plusieurs composantes du rendement. Une première formulation de références techniques sur la fertilisation azotée en conditions hydriques favorables est proposée et discutée.

**élaboration du rendement / semi-aride / nutrition azotée et hydrique / diagnostic / blé dur**

**Summary** — **Analysis of yield components to diagnose limiting factors of durum wheat yield in semi-arid conditions: relationships under various water and nitrogen supplies.** We studied the yield components of durum wheat (*Triticum durum* Desf) under semi-arid conditions in Tunisia (fig 1). The relationships between several yield components were established in conditions where nitrogen and water were unlikely to be limiting. The level of each component was fitted to that of components determined during previous periods of the crop cycle. Resulting relationships were considered as describing the maximum values of each component. They were plotted together with coupled values of components observed in conditions where water or nitrogen could be limiting. This allowed diagnosis of the effects of varying levels of nitrogen and water supplies on each yield component. The experiments were carried out in two soils ("Tell" and "Hamri", see table II) and several levels of nitrogen fertilization (fig 2), for two years with contrasting rainfall. The relationships between yield components, observed in the wet year and for high levels of nitrogen supply had similar patterns compared with those established for wheat grown in temperate regions (table I). However, the values of fitted parameters (table III) were appreciably different. In "Tell" soil, the maximum levels of all yield components were reached during the wet year for nitrogen fertilization as low as 60 kg ha<sup>-1</sup>, applied at tillering and beginning of the stem elongation; in "Hamri" soil, the maximum levels could not be reached, even for a total nitrogen amount of 100 kg ha<sup>-1</sup>; yield components had very low levels during the dry year in the two soils, with no appreciable effect of fertilization (table IV). In both dry and wet years, yields correlated better with the number of kernels per m<sup>2</sup> (fig 3) than with the kernel weight. This suggests that pre-anthesis environmental conditions had a overriding effect on yields (figs 4 and 5). The observed range of kernel weight was not large enough to induce high variations in yield, in spite of the wide range of water and nitrogen supply. We used these results to propose a way of deciding nitrogen fertilization in relationship with yield objective in wet conditions (table V).

**yield components / semi-arid conditions / water and nitrogen supply / diagnosis of limiting factors / durum wheat**

## INTRODUCTION

Une forte variabilité interannuelle caractérise la production de blé dur (*Triticum durum* Desf) en Tunisie (coefficient de variation de 40% pour la production nationale, période de 1960 à 1986), tout particulièrement dans l'étage climatique semi-aride où l'on trouve la majorité des surfaces emblavées. Dans une petite région de cette zone climatique (fig 1 d'après Bortoli, 1969; et Gounot et Le Houerou, 1970), cadre d'un programme pluridisciplinaire de recherche sur les systèmes de production à dominante céréalière (Aubry *et al*, 1986a), des travaux ont été menés pour connaître les facteurs limitants de l'élaboration du rendement du blé dur en parcelles agricoles et proposer des éléments de conduite de la culture. Ces travaux se sont organisés autour de 2 volets :

– l'élaboration en situations expérimentales de références sur les lois de fonctionnement du blé dur en conditions semi-arides, références cons-

truites de façon à servir d'outils de diagnostic des facteurs limitants au champ. Les résultats de ce volet font l'objet de la présente étude;

– l'identification par enquêtes en parcelles d'agriculteurs des facteurs limitants intervenant dans les conditions de la pratique, en utilisant les outils de diagnostic établis lors du premier volet. Les résultats de cette enquête seront exposés dans un second mémoire.

Pour élaborer des références sur le fonctionnement du blé dur dans cette région, nous nous sommes inspirés d'études réalisées sur le blé tendre dans le Bassin parisien et visant le même objectif de diagnostic au champ (Boiffin et Meynard, 1978; Sébillotte *et al*, 1978; Meynard, 1985, Manichon *et al*, 1989). Dans ces travaux, la démarche comporte (i) la mise au point de modèles d'élaboration du rendement en conditions où seul le rayonnement intercepté par le peuplement peut intervenir comme facteur limitant, (ii) l'étude spécifique de l'effet sur l'élaboration du rendement de certains facteurs limitants considérés a priori comme importants localement. Ainsi nous avons choisi :

– de vérifier si des relations entre composantes successives du rendement, établies sur blé tendre en climat tempéré et dont la forme est donnée au tableau I, sont utilisables sur le blé dur dans nos conditions. Cette hypothèse est cohérente avec la comparaison génotypique et agronomique établie par Grignac (1964) faisant état d'une forte similitude entre les 2 espèces;

– d'étudier l'influence de conditions variables de nutrition azotée et hydrique sur l'élaboration du rendement du blé dur. En effet de nombreux auteurs (Papy, 1979; El Amami et Bouzaidi, 1979; Belaïd, 1987) lient l'irrégularité interannuelle des rendements en céréales dans le Maghreb et celle de la pluviométrie hivernale, particulièrement dans le semi-aride. Par ailleurs, l'azote disponible pour une culture de blé dur dans ces conditions peut varier considérablement du fait de la variabilité des fournitures du sol, notamment derrière jachère (Poletaëff, 1953), de leur disponibilité suivant les conditions climatiques et l'état du sol (Yankovitch, 1956; Sébillotte, 1977) et du fait d'une forte disparité d'emploi des engrais azotés dans les exploitations agricoles (Besse et Sébillotte, 1986; Aubry *et al*, 1986b). Des travaux récents (Puri *et al*, 1980, 1988; Auhhammer *et al*, 1989) montrent que les réponses du blé dur et du blé tendre à des différences d'apports d'engrais azotés sont analogues.

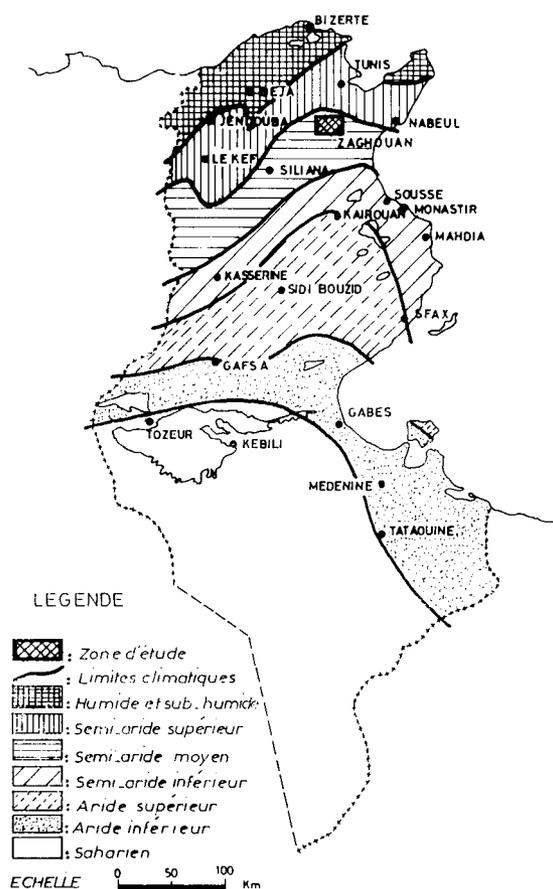


Fig 1. Situation de la zone d'étude dans les grandes zones climatiques de la Tunisie.

**Tableau I.** Modèles et relations établis sur blé tendre (Meynard, 1985).

Modèle	Phase du cycle concernée	Forme de l'équation	Paramètres variété Fidel
<i>Modèles établis en conditions non limitantes (seul le rayonnement intercepté est limitant)</i>			
Modèle 1	levée-début montaison	$BA_1 = \alpha NP$ si $\alpha NP \leq BA_{1\text{seuil}}$  $BA_1 = NP / (a + bNP)$ si $\alpha NP > BA_{1\text{seuil}}$	$BA_{1\text{seuil}} = 60 \text{ g/m}^2$ $\alpha = 0,32 \text{ g/plante}$  $a = 1,48 \text{ g/m}^2$ $b = 8,18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{g}$
Modèle 2	début montaison-épiaison	$NE = c BA_1^d$	$c = 181,4$ $d = 0,274$
Modèle 3	début montaison-fécondation	$NG = u NE + v$	$u = 15,6$ $v = 9 450$
Modèle 4	fécondation-maturité	$PMG = PMG_{\text{max}}$ si $NG \leq NG_{\text{seuil}}$  $PMG = m / NG$ si $NG > NG_{\text{seuil}}$	$NG_{\text{seuil}} = 19 750 \text{ grains/m}^2$ $PMG_{\text{max}} = 45,6 \text{ g}$ $m = 90 \times 10^{-5} \text{ grains/g}$
<i>Modèles valables même en présence de certains facteurs limitants</i>			
Modèle 5	fécondation	$NG = e PP$ si pas d'accident à la fécondation	$e = 21,5 \text{ grains/g}$
Modèle 6	levée-récolte	$QNR = \beta NG$ en l'absence de carences graves en azote ou de consommations de luxe	$b = 1,24 \text{ g/1 000 grains}$

$NP$  = Nombre de pieds levés par  $\text{m}^2$ ;  $BA_1$  = biomasse aérienne début montaison en  $\text{g.m}^{-2}$ ;  $NE$  = nombre d'épis par  $\text{m}^2$ ;  $NG$  = nombre de grains par  $\text{m}^2$ ;  $PMG$  = poids de 1 000 grains (g);  $PP$  = poids de paille en  $\text{g.m}^{-2}$ ;  $QNR$  = quantité d'azote absorbée à la récolte (kg/ha).

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Caractérisation des sols et des climats

Les 2 types de sols sur lesquels des essais ont été implantés (localement appelés «Tell» et «Hamri») ont été choisis pour permettre *a priori* une différenciation des alimentations hydriques et azotées du blé, au travers de différences de texture, de profondeur explorable par les racines et de minéralisation. Dans les 2 cas, les sols sont non salés et bien drainants. Le sol Tell est un sol isohumique d'alluvions récentes, de texture argileuse\* et très profond (réserve utile de 110 mm); le sol Hamri est un sol brun-rouge à encroûtement calcaire (croûte vers 70 cm), de texture limoneuse (réserve utile de 85 mm), dont la fourniture d'azote est *a priori* moindre qu'en sol Tell. Ils occupent respectivement 44 et 47% des surfaces de la région d'étude (Aubry *et al.*, 1986a) et sont par ailleurs courants dans les zones semi-arides du Maghreb.

Les 2 campagnes culturales étudiées (1984-1985 et 1985-1986) se caractérisent par des pluviométries extrêmes au regard de l'étude fréquentielle de la pluviométrie régionale : les pluies mensuelles de la première année sont situées entre le 8<sup>e</sup> et le 9<sup>e</sup> décile, voire parfois supérieures à ce dernier, alors que celles de la seconde année se situent à proximité des valeurs du 1<sup>er</sup> décile, voire en dessous. L'alimentation hydrique du blé est donc susceptible de présenter de fortes différences entre ces 2 types de sol, et, pour chacun d'eux, entre ces 2 années (Baldy, 1985, 1986).

### Dispositifs expérimentaux

Trois types d'essais ont été implantés (tableau II) en parcelles expérimentales ayant comme précédent culturel une jachère (précédent classique du blé dur en zone semi-aride), et en utilisant une variété bien représentée dans la région, «Karim».

\* Analyse granulométrique du sol Tell (horizon de surface 0-20 cm) : 28,5% d'argile, 35% de limons fins, 19% de limons grossiers, 11% de sables fins, 6,5% de sables grossiers; en sol Hamri (même horizon) : 18,5% d'argile, 42% de limons fins, 19% de limons grossiers, 12,5% de sables fins, 8% de sables grossiers.

**Tableau II.** Objectifs, nomenclature et dispositifs des essais.

<i>Objectif</i>	<i>Essai</i>	<i>Traitements</i>	<i>Conditions expérimentales</i>
Paramétrage des modèles d'élaboration du rendement en conditions non limitantes	TD	3 densités de semis – 130 grains/m <sup>2</sup> (TD1) – 255 grains/m <sup>2</sup> (TD2) – 410 grains/m <sup>2</sup> (TD3)	Sol Tell en année humide (1984–1985) Azote : 100 unités/ha (40 au tallage 60 début montaison) Contrôle total des infestations adventices Aucune attaque parasitaire
Effet de différents régimes de nutrition azotée sur l'élaboration du rendement (conditions de nutrition hydrique non limitantes)	TN1 HN1	8 traitements par essai (dose et fractionnement de l'azote) : – témoins sans apport (TN1 <sub>(0)</sub> et HN1 <sub>(0)</sub> ) – apports tallage seul 20, 40 et 60 unités (TN1 <sub>(20)</sub> , TN1 <sub>(40)</sub> , TN1 <sub>(60)</sub> HN1 <sub>(20)</sub> , HN1 <sub>(40)</sub> , HN1 <sub>(60)</sub> ) – apports tallage + montaison 20 + 40, 40 + 40, 60 + 40 unités (TN1 <sub>(20+40)</sub> , TN1 <sub>(40+40)</sub> , TN1 <sub>(60+40)</sub> HN1 <sub>(20+40)</sub> , HN1 <sub>(40+40)</sub> , HN1 <sub>(60+40)</sub> ) – apport montaison seule 0 + 40 unités (TN1 <sub>(0+40)</sub> , HN1 <sub>(0+40)</sub> )	Sol Tell (TN1) et Hamri (HN1) en année humide (1984–1985) Contrôle total des infestations adventices Aucune attaque parasitaire Densité de semis : 250 grains/m <sup>2</sup>
Effet d'une nutrition hydrique déficiente sur l'élaboration du rendement et la nutrition azotée	TN2 HN2	4 traitements par essai – témoins sans apport (TN2 <sub>(0)</sub> et HN2 <sub>(0)</sub> ) – apports tallage seul 20, 40 et 60 unités (TN2 <sub>(20)</sub> , TN2 <sub>(40)</sub> , TN2 <sub>(60)</sub> HN2 <sub>(0)</sub> , HN2 <sub>(40)</sub> , HN2 <sub>(60)</sub> )	Sol Tell (TN2) et Hamri (HN2) en année sèche (1985–1986) Contrôle total des infestations adventices Aucune attaque parasitaire Densité de semis : 250 grains/m <sup>2</sup>

### Essai TD

Un essai (TD) vise à tester en conditions non limitantes les modèles d'élaboration du rendement établis sur blé tendre : il a été implanté en sol Tell du fait de sa forte réserve utile et en année humide (1984-1985). Si l'eau n'est effectivement pas un facteur limitant, une fertilisation azotée et une protection phytosanitaire appropriées permettent *a priori* d'étudier le fonctionnement du peuplement végétal lorsque seule la surface foliaire (donc le rayonnement intercepté) varie, à travers une gamme de variation de densités de semis (3 densités comparées).

### Essais TN1 et HN1

Deux essais (TN1 et HN1) visent à établir l'effet de différents régimes de nutrition azotée sur l'élaboration du rendement, en conditions de nutrition hydrique non limitantes. Ils ont été implantés en année humide sur les 2 types de sols. Dans chaque essai ont été comparés 8 traitements expérimentaux raisonnés de manière à couvrir une large gamme de nutrition azotée, à travers le choix des doses et du fractionnement de l'azote apporté.

### Essais TN2 et HN2

Deux essais (TN2 et HN2) visant à établir l'effet d'une nutrition hydrique déficiente sur l'élaboration du rendement et la nutrition azotée. Ils ont été implantés en année sèche (1985-1986) sur les 2 types de sol, avec 4 traitements expérimentaux (gamme d'apports d'azote réduite par rapport à 1984-1985 pour s'adapter à la pluviométrie de l'année). Les observations et contrôles réalisés sur ces essais sont donnés en annexe 1.

### Adéquation des traitements expérimentaux aux objectifs

#### Nutrition hydrique

En 1984-1985, les bilans hydriques calculés par décade ont été positifs tout au long du cycle cultural dans les 2 types de sol, dont le caractère bien drainant a permis l'écoulement de l'eau en excès. Toutefois, en sol Tell, dans les traitements à forte densité (TD3) et à forte fertilisation azotée (TN1<sub>60+40</sub>), l'épui-

sement plus rapide des réserves en eau du sol entre floraison et maturité (constatée par suivis de profils hydriques) et la durée réduite de remplissage du grain, nous laissent supposer l'occurrence d'un stress hydrique d'ampleur limitée en fin de maturation (Griner, 1985). Dans tous les autres traitements de la même année, l'eau peut être considérée comme non limitante. En 1985-1986, les déficits hydriques ont été marqués mais se sont différenciés entre essais selon l'intensité et les dates d'apparition : en TN2, le déficit cumulé sur la période début-montaison à maturité est de 190 mm, alors qu'il n'est que de 62 mm en HN2. Dans ce dernier essai, la texture moins argileuse jointe à une pluviométrie d'automne localement plus élevée ont permis une levée plus rapide qu'en TN2 (mi-décembre contre mi-février, pour des dates de semis respectives du 21 novembre 1985 et du 5 décembre 1985). La position du cycle cultural par rapport aux pluies a permis en HN2 l'absence de déficit hydrique important avant la floraison, contrairement à l'essai TN2.

### Nutrition azotée

Les traitements de l'essai TN1, comme ceux de l'essai HN1 se différencient dans une large gamme de nutrition azotée, mais les gammes d'absorption d'azote sont disjointes entre types de sol (fig 2). Cet écart traduit les différences de fournitures d'azote par le milieu, mesurées par la quantité d'azote prélevée par le blé en absence de fertilisation azotée. Par ailleurs, l'efficacité de l'azote apporté (mesurée par le rapport entre azote absorbé et azote apporté) est significativement plus élevée en sol Tell qu'en sol Hamri (test de non-parallélisme des pentes de régression significatif au seuil de 5%). Nous avons, en outre, vérifié que les apports réalisés dans l'essai TD étaient suffisants pour que l'azote ne soit pas limitant. En 1985-1986, le déficit hydrique a limité l'absorption d'azote, notamment en sol Tell (TN2) où aucune différence d'absorption n'a pu être créée entre traitements. En HN2, les différences entre traitements ont été un peu plus importantes mais elles sont corrélées à des différences de nombres de pieds levés.

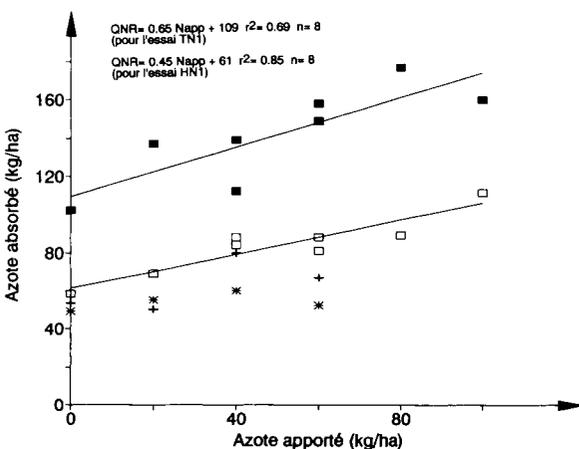


Fig 2. Relations entre azote apporté et azote absorbé dans les essais TN1, HN1, TN2, HN2. Essai TN1 ■; Essai HN1 □; Essai TN2 \*; Essai HN2 +. Napp = Azote apporté (kg/ha); QNR = azote absorbé à la récolte (kg/ha).

### Existence d'autres facteurs limitants

Pour les 2 années, les températures enregistrées au moment de la floraison sont restées dans la gamme (supérieures à 10 °C et inférieures à 32 °C) au sein de laquelle la fécondation peut être considérée comme non affectée (Evans *et al*, 1976, sur blé tendre). En outre, les infestations en adventices ont toujours été contrôlées et inférieures aux seuils considérés comme nuisibles sur blé tendre, et il n'y a eu ni verse, ni maladies du pied, du feuillage ou de l'épi.

Les caractérisations *a posteriori* des traitements permettent d'affirmer que les dispositifs mis en place ont bien été cohérents avec les objectifs poursuivis : à l'exception d'un probable stress hydrique tardif dans les traitements à forte densité et à forte fourniture d'azote en sol Tell au cours de la première année, les seuls facteurs limitants intervenus sont ceux qui ont été créés pour les besoins de l'expérimentation.

### Méthode de traitement des données

#### Paramétrage des modèles

Il est effectué sur l'essai TD en prenant la placette comme unité de base, chaque fois que l'abscisse et l'ordonnée des modèles sont issues de mesures effectuées à la même date sur une même placette. Ce n'est pas possible pour le modèle 2 reliant la biomasse aérienne au début de la montaison (mesure destructive) et le nombre d'épis à la récolte, où seule la mise en relation des moyennes par traitement est réalisable. Compte tenu du trop petit nombre de points (3 traitements) et de leur faible précision, nous n'avons pas retenu ce modèle et l'avons remplacé par le modèle 2b (relation entre nombre de pieds à la récolte et nombre d'épis). Le paramétrage du modèle 6 (relation entre nombre de grains et azote absorbé à la récolte) est effectué avec les valeurs moyennes par traitement, la mesure de l'azote absorbé n'ayant pu être effectuée par placette.

### Comparaison des traitements de HN1, TN1, HN2 et TN2 aux modèles issus de TD

Deux méthodes ont été utilisées :

– l'analyse des écarts entre les niveaux obtenus des composantes et les niveaux potentiels issus de l'essai TD : ces écarts sont mesurés par le rapport entre la valeur de la composante ( $C_i$ ) du traitement expérimental et la valeur potentielle ( $C_i \text{ pot}$ ) permise par le niveau de la composante antérieure ( $C_i - 1$ ) (Manichon *et al*, 1989). La valeur ( $C_i \text{ pot}$ ) est donc obtenue en utilisant l'équation  $C_i \text{ pot} = f(C_i - 1)$  paramétrée grâce à l'essai TD. Le rapport  $C_i / C_i \text{ pot}$  exprime le degré de réalisation du potentiel, le classement des traitements au sein d'un essai étant réalisé par analyse de variance. Cette méthode a été utilisée pour les modèles 1 à 3.

Pour les autres modèles, on a procédé par comparaison des pentes des droites de régression obtenues sur l'essai TD et sur les autres essais.

## RÉSULTATS

### Paramétrage des modèles 1 à 6 (essai TD)

On a pu ajuster de façon satisfaisante sur blé dur (tableau III) les modèles établis sur blé tendre, dans la gamme de variation créée. On remarque que la gamme de nombre de grains par m<sup>2</sup> obtenue n'a pas permis de mettre en évidence un seuil au-dessus duquel le poids de 1 000 grains chute du fait de compétitions pour l'allocation des assimilats.

### Effets de la nutrition azotée et de la nutrition hydrique

#### Nutrition azotée, nutrition hydrique et modèles 2b et 3

Le tableau IV indique pour chaque essai les degrés de réalisation des potentiels d'épis et de grains.

En conditions de nutrition hydrique non limitante (essais TN1 et HN1), ces critères sont significativement inférieurs pour les témoins sans azote par rapport aux autres traitements. Dans les 2 essais, les traitements avec 2 apports d'azote montrent un ratio  $NE/NE_{pot}$  supérieur à celui des autres traitements, le potentiel étant réalisé en TN1 seulement. On note une situation particulière du traitement correspondant à un seul apport de 40 unités au début de la montaison : en TN1<sub>0+40</sub>, le rapport  $NG/NG_{pot}$  est proche de celui du témoin et inférieur à ceux de tous les autres traitements; en HN1<sub>0+40</sub>, c'est le rapport  $NE/NE_{pot}$  qui est proche de la valeur obtenue dans le témoin sans azote. L'examen des séquences de tallage et des teneurs en azote au début de la montaison va dans le sens de ces constats : dans l'essai TN1, le traitement TN1<sub>0</sub> se distingue par sa faible teneur en azote (< 4%) et une fréquence de pieds sans arrêt de tallage à cette date plus faible que dans les autres traitements (54% contre 65% en moyenne) : il semble donc qu'une carence en azote soit ressentie par le peuplement avant le début de la montaison. Dans l'essai HN1, cette carence semble affecter tous les traitements (teneurs en azote inférieures à 4% et proportion faible de pieds sans arrêt de tallage) notamment lorsque l'apport est inférieur à 40 unités.

Tableau III. Paramétrage des modèles 1 à 6 sur blé dur (essai TD).

Modèle	Blé dur variété Karim en conditions semi-arides (région de Zaghuan, Tunisie)	Gamme de variation des variables
(1) $BA1 = \alpha NP$ pour $BA1 \leq BA1_{seuil}$ $BA1 = NP / (a + b NP)$ pour $BA1 > BA1_{seuil}$	$BA1_{seuil} = 70 \text{ g/m}^2$ $BA1 = 0,47 NP; r^2 = 0,77; n = 13$ $BA1 = NP / (1,91 + 0,0043 NP)$ $r^2 = 0,41; n = 17$	$NP$ de 43 à 470 pieds/m <sup>2</sup> $BA1$ de 20 à 147 g/m <sup>2</sup>
(2b) $NE = c NP^d$	$NE = 52,5 NP^{0,35}; r^2 = 0,49; n = 30$	$NP$ de 67 à 460 pieds/m <sup>2</sup> $NE$ de 180 à 533 épis/m <sup>2</sup>
(3) $NG = u NE + v$	$NG = 27,2 NE + 3759; r^2 = 0,78; n = 30$	$NG$ de 7 200 à 18 750 grains/m <sup>2</sup>
(4) $PMG = PMG_{max}$ si $NG \leq NG_{seuil}$  $PMG = m/NG$ si $NG > NG_{seuil}$	$NG_{seuil}$ : non déterminé $R = (4,63 NG) / 1000; r^2 = 0,97; n = 20$ $PMG_{max} = 46,3 \text{ g}$ $m$ non déterminé	$NG$ de 7 200 à 18 750 grains/m <sup>2</sup> (sur TD1 et TD2) $PMG$ de 43,5 à 50,8 g $R$ de 36,6 à 87,4 q/ha
(5) $NG = e PP$	$NG = 16,6 PP; r^2 = 0,97; n = 30$	$PP$ de 480 à 1 144 g/m <sup>2</sup>
(6) $QNR = \beta NG$	$QNR = 1,31 NG \times 10^{-3}$ (sur moyennes de TD1, TD2, TD3)	$NG$ de 11 470 à 13 660 grains/m <sup>2</sup> $QNR$ de 150 à 188 kg/ha

(Mêmes abréviations que tableau I;  $R$  = rendement en q/ha).

**Tableau IV.** Degrés de réalisation des potentiels d'épis et de grains dans les essais.

Trait	1984–1985				1985–1986			
	Essai TN1		Essai HN1		Essai TN2		Essai HN2	
	NE/NEpot	NG/NGpot	NE/NEpot	NG/NGpot	NE/NEpot	NG/NGpot	NE/NEpot	NG/NGpot
0	0,74 <i>0,16</i> B	0,82 <i>0,10</i> D	0,53 <i>0,09</i> C	0,55 <i>0,08</i> D	0,60 <i>0,08</i> A	0,44 <i>0,05</i> A	0,74 <i>0,12</i> A	0,52 <i>0,06</i> AB
20	0,87 <i>0,11</i> AB	0,92 <i>0,12</i> CD	0,59 <i>0,11</i> BC	0,65 <i>0,11</i> C	0,56 <i>0,12</i> A	0,44 <i>0,08</i> A	0,64 <i>0,08</i> A	0,47 <i>0,07</i> B
40	0,87 <i>0,14</i> AB	1,00 <i>0,10</i> AB	0,72 <i>0,13</i> AB	0,77 <i>0,12</i> ABC	0,64 <i>0,08</i> A	0,45 <i>0,04</i> A	0,76 <i>0,11</i> A	0,61 <i>0,08</i> A
60	0,87 <i>0,14</i> AB	1,00 <i>0,07</i> AB	0,68 <i>0,06</i> AB	0,74 <i>0,12</i> BC	0,59 <i>0,09</i> A	0,45 <i>0,06</i> A	0,73 <i>0,16</i> A	0,54 <i>0,14</i> AB
0+40	0,85 <i>0,26</i> AB	0,86 <i>0,09</i> CD	0,60 <i>0,12</i> BC	0,73 <i>0,12</i> BC				
20+40	0,96 <i>0,10</i> A	0,95 <i>0,09</i> BC	0,70 <i>0,13</i> AB	0,76 <i>0,13</i> ABC				
40+40	1,03 <i>0,17</i> A	1,07 <i>0,11</i> A	0,75 <i>0,11</i> A	0,83 <i>0,07</i> AB				
60+40	0,98 <i>0,09</i> A	0,99 <i>0,07</i> AB	0,77 <i>0,15</i> A	0,88 <i>0,08</i> A				

NE/NEpot, NG/NGpot : degrés de réalisation des potentiels d'épis et de grains; en romain : moyenne sur les 10 placettes du traitement; en italique : écart-type; les traitements non suivis d'une même lettre au sein d'une colonne sont significativement différents au seuil de 5% (test de Newman-Keuls).

En condition de nutrition hydrique limitante (essais TN2 et HN2, le ratio *NE/NEpot* n'est pas significativement différent selon les traitements au sein d'un essai. Il est en revanche significativement supérieur (au seuil de 5%) en HN2 par rapport à TN2. Le ratio *NG/NGpot* n'est pas significativement différent entre traitements pour l'essai TN2. Il varie, mais sans relation interprétable avec les traitements azotés, au sein de l'essai HN2. On constate le même classement que précédemment entre les 2 essais. Pour chacun d'entre eux, le ratio *NG/NGpot* est significativement plus faible (au seuil de 5%) que l'année précédente dans les traitements homologues.

### Nutrition azotée, nutrition hydrique et modèles 4, 5 et 6

#### Modèle 4 (fig 3)

Dans les essais TN1 et HN1, on retrouve une relation linéaire entre rendement et nombre de grains, dont la pente n'est pas statistiquement différente au seuil de 5% de celle établie sur l'essai TD. Il semble donc que, lorsque l'alimentation hydrique n'est pas limitante, les différents régimes de nutrition azotée créés n'affectent pas de façon importante le poids d'un grain; cependant le traitement TN1<sub>60+40</sub> se distingue par un poids d'un grain légèrement plus faible, ce qui

est cohérent avec l'hypothèse évoquée ci-dessus d'un déficit hydrique en fin de remplissage sur ce traitement.

Une relation linéaire existe aussi entre rendement et nombre de grains sur les essais TN2 et HN2. La pente de cette droite est significativement différente au seuil de 5% de celle obtenue pour l'essai TD et de celle établie pour TN1 et HN1. On constate par ailleurs que le poids d'un grain est significativement plus faible à ce même seuil en TN2 qu'en HN2 (respectivement 30,7 g contre 34,8 g pour 1 000 grains).

Si ce sont surtout les différences de nombre de grains qui expliquent *in fine* les différences de rendement obtenues, il reste que des variations importantes du poids d'un grain existent. La comparaison, entre ces 2 années climatiquement contrastées, des vitesses et des durées de remplissage du grain (Triboï, 1990) montre que les vitesses de remplissage varient peu entre années et sont de l'ordre de 0,08 mg.°C.j<sup>-1</sup>. En revanche, la durée totale de la phase de remplissage est d'environ 600 mg.°C.j<sup>-1</sup> pour la première année d'essai contre 400 pour l'année suivante (Griner, 1985; Beaudoin, 1986).

#### Modèle 5

La pente de la régression linéaire établie sur les essais TN1 et HN1 entre le nombre de grains et le poids de paille (fig 4) n'est pas statistiquement différente au seuil de 5% de celle établie pour l'essai TD. La phase de fécondation n'est donc pas affectée par les régimes de nutrition azotée créés. De même, la pente de la régression obtenue sur les essais TN2 et HN2 n'est pas significativement différente au seuil de 5% de celle obtenue en conditions hydriques non limitantes.

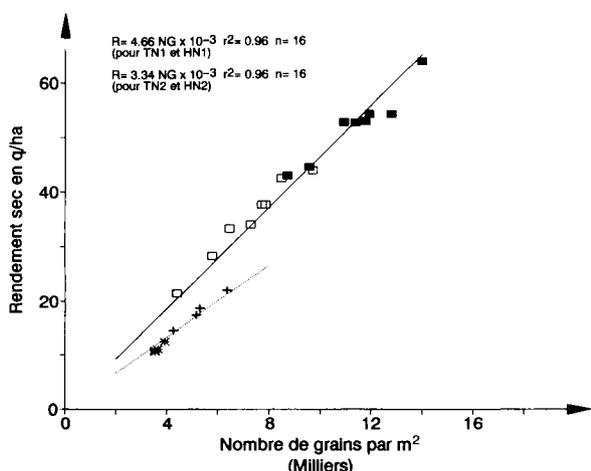


Fig 3. Relations entre le rendement et le nombre de grains dans les essais TN1, HN1, TN2, HN2. Essai TN1 ■; Essai HN1 □; Essai TN2 \*; Essai HN2 +. R = Rendement (q/ha); NG = nombre de grains par m².

#### Azote absorbé et nombre de grains (modèle 6)

Les nombres de grains réalisés sur les essais TN1 et HN1 croissent linéairement avec l'azote absorbé par le peuplement sur l'ensemble du cycle (fig 5, pentes des droites de régression des deux essais statistiquement non différentes au seuil de 5%). En TN2 et HN2, la faible variation des nombre de grains entre traitements ne nous permet pas d'établir de comparaison des pentes de droites de régression. Dans ces essais, les teneurs moyennes en azote des grains (3,60% en TN2 et 2,53% en HN2) et les pailles (0,69% en TN2 et 0,50% en HN2) sont supérieures à celles observées dans les essais de l'année précédente (de 1,84 à 2,38% pour les grains et de 0,34 à 0,51% pour les pailles) surtout pour l'essai TN2. Ainsi, en conditions de déficit hydrique important, l'azote absorbé n'a pas servi à fabriquer plus de grains mais a été concentré dans les pailles et surtout dans les grains.

## DISCUSSION

#### Validité des modèles testés

On retrouve sur blé dans la région d'étude des relations dont les formes générales sont identiques à celles existant sur blé tendre en climat tempéré. On peut donc espérer utiliser de tels modèles pour le diagnostic de facteurs limitants dans des essais ou des parcelles d'enquête. Les paramètres de ces modèles pour la variété Karim sont différents de ceux mentionnés pour la

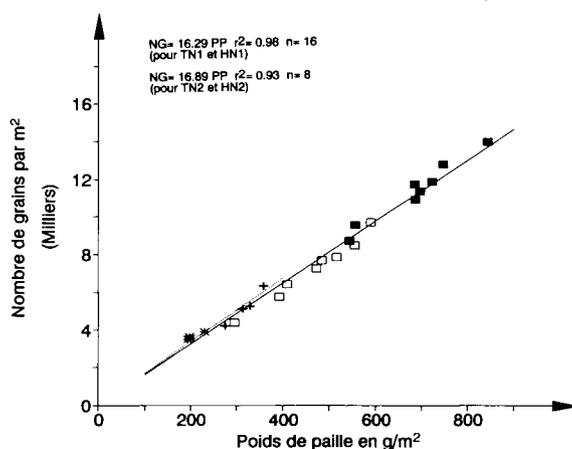


Fig 4. Relation entre le poids de paille à la récolte et le nombre de grains dans les essais TN1, HN1, TN2, HN2. Essai TN1 ■; Essai HN1 □; Essai TN2 \*; Essai HN2 +. NG = Nombre de grains par m²; PP = poids de paille à la récolte (g/m²).

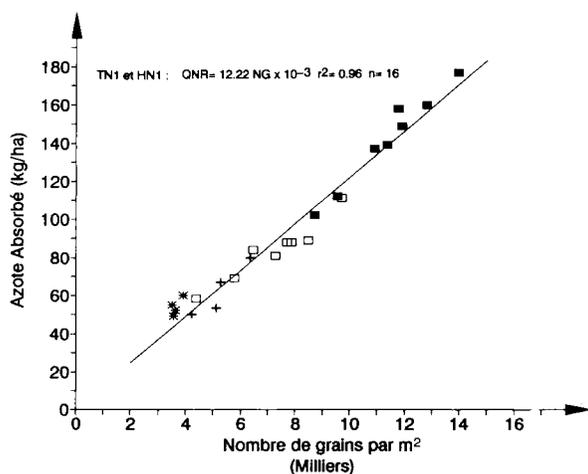


Fig 5. Relation entre l'azote absorbé sur l'ensemble du cycle et le nombre de grains dans les essais TN1, HN1, TN2, HN2. Essai TN1 ■; Essai HN1 □; Essai TN2 \*; Essai HN2 +. QNR = Azote absorbé à la récolte (kg/ha); NG = nombre de grains par m<sup>2</sup>.

variété de blé tendre Fidel, ce qui était prévisible. On remarque en particulier que l'on obtient, en conditions non limitantes, des valeurs de biomasse aérienne au début montaison comparables à celles du blé tendre pour des nombres de pieds en sortie d'hiver voisins; mais on constate sur blé dur en climat semi-aride une chute de la transformation de cette biomasse en épis, puis en grains, par rapport aux variétés de blé tendre utilisées en France. Ce comportement est sans doute lié à une capacité de tallage plus réduite.

De ce point de vue, il serait intéressant de paramétrer les modèles sur d'autres variétés de blé dur ainsi que sur des variétés de blé tendre cultivées en Tunisie, afin de déterminer si ce comportement est inhérent à la variété Karim ou s'il peut être étendu à l'ensemble de l'espèce, voire des 2 espèces dans les conditions semi-arides. Par ailleurs, nos essais ne nous permettent pas de conclure sur l'existence d'un nombre de grains seuil, au-delà duquel le poids de 1 000 grains chute, car il faudrait explorer des gammes plus larges de nombres de grains. Enfin, pour les besoins en azote (coefficient  $\beta$  du modèle 6), on retrouve des valeurs tout à fait comparables à celles couramment trouvées sur blé tendre en climat tempéré.

En année humide et en contrôlant l'ensemble des facteurs limitants, on obtient des rendements de l'ordre de 55 à 60 q/ha (à 0% d'humidité) comparables à ceux obtenus en conditions irriguées (El Amami *et al*, 1985).

### Relations entre composantes du rendement et nutrition azotée

Les fournitures du sol en azote sur l'ensemble du cycle apparaissent, dans nos essais, très variables selon le type de terrain et l'année : en année sèche, l'estimation de ces fournitures est délicate car les quantités d'azote absorbées par les témoins reflètent probablement d'abord le caractère limitant de la nutrition hydrique; en année humide et en sol Tell, nous retrouvons derrière précédent jachère, des ordres de grandeur très comparables à ceux fournis par Poletaeff (1953) et Yankovitch (1956), soit environ 100 Unités/ha, alors qu'en sol Hamri, ces fournitures semblent bien moindres. Cependant, ces données ne sont qu'indicatives, en raison notamment du petit nombre d'essais ayant conduit à leur obtention et, probablement, de la variabilité de la minéralisation selon les types de conduite de la jachère précédant le blé dur.

On a pu mettre en évidence l'importance du fractionnement de l'azote entre tallage et début montaison lorsque les conditions de nutrition hydrique sont satisfaisantes, rejoignant ainsi d'autres auteurs (Capitaine, 1968 sur des variétés plus anciennes; Mosseddaq, 1990 au Maroc). Si l'on a pu, en sol Tell, atteindre les niveaux potentiels d'épis et de grains à partir d'une dose totale de 60 unités fractionnée, il serait nécessaire en sol Hamri de faire d'autres essais comportant des doses d'apport d'azote plus élevées. Dans l'un ou l'autre des sites, on ne peut compenser une carence précoce en azote par un seul apport en cours de montaison.

De même que pour le blé tendre et que pour l'orge (Shepherd *et al*, 1987), le poids d'un grain est peu sensible aux effets de la nutrition azotée, lorsque les conditions hydriques sont satisfaisantes et en l'absence de parasitisme et de verse. La relation entre le nombre de grains et le poids de paille montre, comme pour le blé tendre, que les variations de nombre de grains sont reliées à celles des facteurs et conditions de croissance pendant la phase semis-floraison (Boiffin *et al*, 1981).

### Élaboration du rendement et nutrition hydrique

Le déficit de pluviométrie enregistré en 1985-1986 s'est traduit par une mauvaise valorisation des apports d'azote et par le plafonnement des

composantes successives du rendement à des niveaux faibles. Une levée plus précoce en HN2 a permis de mieux bénéficier des épisodes pluvieux du printemps, d'où l'obtention d'un meilleur degré de réalisation des potentiels d'épis et de grains qu'en TN2; dans cet essai, le remplissage du grain a pu se terminer avant l'apparition de très fortes ETP dues à des températures maximales élevées, de l'ordre de 35 °C (Beaudoin, 1986), d'où un poids d'un grain un peu plus élevé qu'en TN2. Dans ces 2 essais, la vitesse de sénescence des feuilles après la floraison a été plus rapide que l'année précédente (Griner, 1985; Beaudoin, 1986) et a fortement affecté la durée de la phase de remplissage : ainsi, on retrouve sur blé dur certains des résultats obtenus par Lawlor *et al* (1981) sur orge montrant l'importance, sous différents régimes d'alimentation hydrique, de la durée de remplissage des grains alors que la vitesse de remplissage varie peu. Le comportement du blé dur dans ces conditions est ainsi contradictoire avec celui du blé tendre en climat tempéré (Triboï, 1990).

L'existence, dans ces 2 essais, d'une relation entre le nombre de grains et le poids de paille de pente non différente de celle établie dans des conditions moins drastiques, confirme que les faibles nombres de grains enregistrés ne proviennent pas d'accidents à la fécondation mais des conditions nutritionnelles défavorables pendant la phase de formation de cette composante (Sébillotte *et al*, 1978). Cette relation pourra donc être utilisée pour émettre un diagnostic sur l'occurrence d'accidents de type climatique ou sanitaire à la fécondation.

En l'absence de tels accidents, et quelles que soient les conditions d'alimentation hydrique (y compris pendant le remplissage du grain) le principal déterminant du rendement final est le nombre de grains, celui-ci résultant de la croissance et du développement de la levée à la floraison. Nous rejoignons ainsi les conclusions obtenues sur orge par Ramos *et al* (1982, 1985) dans le sud de l'Espagne et Shepherd *et al* (1987) en Syrie.

## CONCLUSION

Les modèles établis sur blé tendre en climat tempéré ont été utilisés avec succès dans le diagnostic au champ des facteurs limitants intervenant à diverses phases du cycle (Meynard et Sébillotte, 1983), l'interprétation d'essais (Meynard *et al*, 1988) mais aussi pour la construction d'iti-

néraires techniques correspondant à des objectifs de production variés (Meynard, 1985). Leur transposition sur blé dur en conditions semi-arides permet d'envisager dans notre cas des utilisations similaires : nous les avons employés pour interpréter des résultats d'essais (comme cela a été montré ici) et des résultats d'enquête au champ (ce qui sera exposé dans un prochain mémoire). Sans aller jusqu'à la définition d'itinéraires techniques complets, nos travaux nous permettent de disposer de premiers éléments pour guider la conduite de la fertilisation azotée du blé dur dans cette région et orienter les recherches complémentaires à mener : en s'inspirant de la méthode des bilans préconisée sur blé tendre en climat tempéré (Hébert, 1969; Rémy et Hébert, 1977) et des résultats que nous avons obtenus, on peut en effet raisonner la fertilisation azotée en fonction d'un objectif de production, par évaluation de l'écart entre les besoins du peuplement définis par cet objectif et la fourniture du milieu. Le tableau V illustre cette démarche en sol Tell et en année humide. Outre le problème de l'extrapolation à un sol Hamri dans les mêmes conditions climatiques, l'application d'une telle démarche pose cependant des questions qui ne pouvaient être résolues dans le cadre de notre seule étude :

- les valeurs des doses d'apport indiquées ne sont pas directement extrapolables : les dynamiques de fournitures d'azote par le sol au cours du cycle sont en effet mal connues et difficilement prévisibles, notamment pendant les phases précoces du cycle, du fait de l'existence simultanée, sous ces climats, de phénomènes de minéralisation et de lessivage au cours des mois d'hiver. La mesure d'un reliquat azoté en sortie d'hiver n'aurait pas de signification ici;

- si l'on a pu noter, rejoignant ainsi d'autres auteurs (Belaïd, 1987; Capitaine, 1968), que l'azote apporté est mal valorisé en année sèche, il serait cependant nécessaire d'affiner les connaissances sur les relations entre azote apporté, azote absorbé et composantes du rendement dans des scénarios climatiques intermédiaires entre les extrêmes que nous avons explorés et pour des positions variées du cycle cultural dans l'année climatique. Dans ces régions, une croissance rapide du couvert végétal liée à la fertilisation azotée permet une meilleure efficacité de l'eau en début de cycle en limitant les pertes par évaporation du sol. Mais au cours de la phase de remplissage du grain, les besoins plus importants ainsi créés peuvent ne pas être satisfaits (Cooper et Gregory, 1987; Cooper *et al*, 1987).

**Tableau V.** Éléments pour la conduite de la fertilisation azotée du blé dur. Exemple en sol Tell et en année humide, précédent jachère, variété Karim.

<i>Objectif de production</i>	55 q/ha d'où environ 12 000 grains/m <sup>2</sup> (pour PMG = 46,3 g)
Besoins totaux en azote (= $\beta$ NG objectif)	$12\ 000 \times 1,31 \times 10^{-2} = 157$ kg/ha soit environ 160 kg/ha
Fournitures totales du sol en azote	environ 100 kg/ha
Dose totale à apporter	160 – 100 = 60 kg/ha
Ordre de grandeur des composantes successives	NG = 12 000 soit NE voisin de 300 épis/m <sup>2</sup> (modèle 3)  NE = 300 d'où NP voisin de 140 pieds/m <sup>2</sup> (modèle 2b)  NP = 140 d'où BA <sub>1</sub> voisin de 65 mg/m <sup>2</sup> (modèle 1)
Besoins du peuplement jusqu'à début montaison (= BA <sub>1</sub> x teneur de 4.5%)	$65 \times 4,5 \times 10^{-1} = 29,3$ kg/ha soit environ 30 kg/ha
Fournitures du sol en azote jusqu'à début montaison (1)	environ 10 kg/ha
Doses des apports	1 <sup>er</sup> apport = 30 – 10 = 20 kg/ha 2 <sup>e</sup> apport + dose totale – 1 <sup>er</sup> apport = 40 kg/ha

(1) Estimées par la quantité d'azote absorbé par le témoin au début de la montaison.

Comme le soulignait Sébillotte (1985) pour le blé tendre en conditions tempérées, le raisonnement de la fertilisation azotée en zone semi-aride ne peut *a fortiori* se concevoir indépendamment de la gestion des ressources en eau.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier très chaleureusement JM Meynard, directeur de recherches à l'INRA, et C Gitton, VSN, pour leur précieuse collaboration dans la réalisation de ce travail.

## ANNEXE – PROTOCOLES D'OBSERVATION SUR LES ESSAIS

### *Composantes du rendement et états de croissance*

Deux séries de prélèvements sont réalisées, l'une au stade début montaison, l'autre à la ré-

colte. On prélève dans chaque traitement 10 placettes de 3 rangs sur 50 cm, soit environ 0,25 m<sup>2</sup> de surface unitaire. À chacune de ces 2 dates, on note les infestations en adventices et les éventuels dégâts d'origine fongique ou parasitaire.

Les variables nombre de pieds levés (NPL) et biomasse aérienne au début de la montaison (BA<sub>1</sub>) sont mesurées aux alentours du stade «épi à 1 cm» sur 10 placettes par traitement et les longueurs exactes de la tige et de l'apex mesurées sur 75 à 100 pieds par traitement. La valeur de biomasse mesurée est alors corrigée en fonction de la longueur tige + épi (l) en utilisant la relation linéaire  $BA_1 = al + b$  donnée par Meynard (1985).

À la récolte, on mesure les nombres de pieds à la récolte (NPR), les nombres d'épis et de grains (NE et NG), le poids de 1 000 grains (PMG) et le poids de paille (PP).

Pour mieux comprendre l'élaboration de la composante poids de 1 000 grains, on a en outre effectué des mesures de la teneur en eau et de la croissance des grains, sur un pas de

temps hebdomadaire et pour les grains de 15 épis par traitement.

### Contrôles de nutrition azotée

La nutrition azotée est caractérisée par :

- la mesure de la teneur en azote des parties aériennes du blé au début de la montaison (méthode Kjeldhal, 3 mesures par traitement);
- la mesure de l'azote total absorbé à la récolte (même méthode, 3 mesures par traitement);
- une étude des séquences de tallage, utilisées sur blé tendre comme outil de datation de l'apparition d'une carence azotée (Masle, 1980), mesure effectuée sur 75 à 100 pieds par traitement au début de la montaison.

### Contrôles de nutrition hydrique

Elle est caractérisée :

- globalement au travers de bilans hydriques  $P - ETP^* + RU$ , réalisés au pas de temps décadaire par type de sol pour les 2 années;
- par suivis de profils hydriques (mesures d'humidité pondérale) sur les traitements extrêmes de l'essai TD (TD1 et TD3), des essais TN1 et HN1 (TN1<sub>0</sub> et TN1<sub>60+40</sub>; HN1<sub>0</sub> et HN1<sub>60+40</sub>) et de l'essai HN2 (HN2<sub>0</sub> et HN2<sub>60</sub>). Les mesures d'humidité sont réalisées par tranche de 10 cm de sol, jusqu'à apparition de la croûte en sol Hamri et jusqu'à 120 cm en sol Tell. On effectue 3 répétitions par traitement. Le pas de temps est mensuel du semis à la floraison, hebdomadaire de la floraison à la maturité;
- en comparant, grâce aux suivis de croissance du grain, les durées ( $d$ ) et vitesses ( $v$ ) de remplissage dans ces mêmes traitements.

## RÉFÉRENCES

Aubry C, Elloumi M, Essamet M, Gana M, Gara M, Gitton C, Khaldi R, Sébillotte M, Soler LG, Souki K (1986a) Les systèmes de production dans le semi-aride : première approche de la dynamique des exploitations dans la région de Zaghuan. *Ann Inst Natl Rech Agron Tunis*, vol 59, fasc 1, 230 p

Aubry C, Griner C, Latiri-Souki K (1986b) Élaboration du rendement du blé dur. Potentialités et variations.

*In: Actes du séminaire «Systèmes de production à dominante céréalière dans le semi-aride», Jebel Oust, 7–9 Oct 1986, 153-196*

- Aufhammer W, Kübler E, Federolf KG (1989) Leistungsvergleich von Hartweizen und Weichweizen in einer Grenzlage für Hartweizenanbau. *Bodenkultur* 40, 119-133
- Baldy C (1985) Contribution à l'étude des applications de la bioclimatologie végétale à l'agrométéorologie des zones arides et semi-arides en climats méditerranéens et tropical. Thèse Dr ès-Sci Univ Marseille, 225 p
- Baldy C (1986) *Agrométéorologie et développement des régions arides et semi-arides*. INRA, Paris, 108 p + annexes
- Beaudoin CF (1986) Élaboration du rendement du blé dur dans une zone semi-aride tunisienne : la période floraison–maturité. Mém DAA, INA-PG Paris, 144 p
- Belaïd D (1987) Étude de la fertilisation azotée et phosphatée d'une variété de blé dur (Hedba 3) en condition de déficit hydrique. Thèse Magister, INA Alger, 109 p
- Besse T, Sébillotte M (1986) Les systèmes de cultures céréalières des exploitations agricoles privées. *In: Actes du séminaire «Systèmes de production à dominante céréalière dans le semi-aride», Jebel Oust, 7–9 Oct 1986, 123-152*
- Boiffin J, Meynard JM (1978) Comment améliorer la conduite d'une céréale au sein d'une petite région. *In: Exigences nouvelles pour l'agriculture. Les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?* Cycle sup d'Agron, INA-PG-ADEPRINA, Paris, 103-146
- Boiffin J, Caneill J, Meynard JM, Sébillotte M (1981) Élaboration du rendement et fertilisation du blé d'hiver en Champagne crayeuse. *Agronomie* 1, 549-558
- Bortoli L, Gounot M, Jacquinet JC (1969) Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale. *Ann Inst Natl Rech Agron Tunis* vol 42, fasc 1, 235 p
- Capitaine RC (1968) Fertilisation dans le cas d'un type d'assolement céréalière en Tunisie. *Ann Inst Natl Rech Agron Tunis*, vol 41, fasc 3, 36 p
- Cooper PJM, Gregory PJ (1987) Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use Manage* 3, 2, 57-62
- Cooper PJM, Gregory PJ, Keatinge DH, Brown SC (1987) Effect of fertiliser, variety and location in barley production under rainfed conditions in northern Syria-2. Soil water dynamics and crop water use. *Field Crops Res* 16, 67-84
- El Amami S, Bouzaidi A (1979) Carte de la vocation céréalière de la Tunisie et estimation de la production annuelle en céréales. Doc ronéo. Centre de Recherche du Génie Rural, Tunis

\* Les valeurs d'ETP ont été calculées par la formule de Penmann, en prenant les valeurs de rayonnement de la station de Tunis (située à 60 km de la zone d'étude), les autres données provenant de la station du Fahs située au sein de la zone.

- El Amami S, Bouzaidi A, Bouaziz E (1985) L'irrigation de complément du blé : synthèse d'une décennie d'essais. *Cah Centre Rech Génie Rural* 17, 9 p
- Evans LT, Wardlaw IF, Fischer RA (1976) Wheat. In: *Crop physiology* (Evans, ed) Cambridge Univ Press, 101-149
- Gounot M, Le Houerou HN (1970) Carte bioclimatique de la Tunisie septentrionale (échelle 1/500 000<sup>e</sup>). *Ann Inst Natl Rech Agron Tunis* 41, 1
- Grignac P (1964) Contribution à l'étude de *Triticum Durum* Desf. Thèse Fac Sci Univ Toulouse, 152 p
- Griner C (1985) Élaboration du rendement du blé dur dans une zone semi-aride tunisienne : la période floraison-maturité. Mém DAA INA-PG Paris, 96 p
- Hébert J (1969) La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bull Tech Inf* 244, 755-766
- Lawlor DW, Day W, Johnston AE, Legg BJ, Parkinson KJ (1981) Growth of spring barley under drought: crop development, photosynthesis, dry-matter accumulation and nutrient content. *J Agric Sci Camb* 96, 167-186
- Manichon H, Roger-Estrade J, Leterme P (1989) Analyse intégrée des rendements et de leurs causes de variation entre parcelles. In: *Rotations céréalières intensives*. Convention INRA/ONIC/ITCF, Paris, 71 p + annexes
- Masle J (1980) L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse DDI INA-PG, Paris, 274 p
- Meynard JM (1985) Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse DDI INA-PG, Paris, 297 p
- Meynard JM, Sébillotte M (1983) Diagnostic sur les causes de variation du rendement du blé dans une petite région. In: *La fatigue de sols*, 23<sup>e</sup> colloque SFP, Versailles 21-22 octobre 1982. INRA Publ 1983 (les colloques de INRA, n° 17)
- Meynard JM, Ribeyre C, Boudon O, Laurent E (1988) Pour mieux connaître les variétés de blé. *Semences Progrès* 55, 4-12
- Mosseddaq F (1990) Nitrogen assimilation and remobilization in relation to grain yield and protein in spring wheat. Thèse Docteur ès Sci. Agron INAV Hassan II, Rabat, 168 p
- Papy F (1979) Analyse du comportement des cultures de blé dur et d'orge dans différentes régions céréalières du Maroc à travers leur réaction aux variations interannuelles des régimes pluviométriques. *CR Acad Agric Fr* 3, 231-247
- Poletaeff N (1953) Action du travail profond du sol sur sa fertilité et sur les rendements des céréales. *Ann Serv Bot Agron Tunisie* 26, 100 p
- Puri YP, Qualset CO, Jan CC, Baghott KG (1980) Durum and bread wheat response to nitrogen for yield physical and chemical characteristics. *Phyton* 39, 127-145
- Puri YP, Miller MF, Sah RN, Baghott KG, Freres-Castel E, Meyer RD (1988) Response surface analysis of the effects of seeding rates, N-rates and irrigation frequencies on durum wheat. 1—Grain yield and yield components. *Fert Res* 17, 197-218
- Ramos JM, Garcia Del Moral LF, Recalde L (1982) The influence of pre- and post- anthesis periods on yield of winter barley varieties in southern Spain. *J Agric Sci Camb* 99, 521-523
- Ramos JM, Garcia Del Moral LF, Recalde L (1985) Vegetative growth of winter barley in relation to environmental conditions and grain yield. *J Agric Sci Camb* 104, 413-419
- Rémy JC, Hébert J (1977) Le devenir des engrais azotés dans le sol. *CR Acad Agric Fr* 63, 700-710
- Sébillotte M (1977) Jachère, système de culture, système de production. Méthodologie d'étude. *J Agric Bot Appl* 23, 241-264
- Sébillotte M (1985) Rôle de l'azote dans le comportement d'un peuplement de céréales. Réflexion sur les approches de l'agronome. *CR Séances Acad Agric Fr* 71, 292-301
- Sébillotte M, Boiffin J, Caneill J, Meynard JM (1978) Sécheresse et fertilisation azotée du blé d'hiver. *Bull AFES* 3, 197-214
- Shepherd KD, Cooper PJM, Allan AY, Drennan DSH, Keatinge JDH (1987) Growth, water use and yield of barley in Mediterranean-type environments. *J Agric Sci Camb* 108, 365-378
- Triboi E (1990) Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. *Agronomie* 10, 191-200
- Yankovitch L (1956) Résultats de 22 années d'expériences dans les cases lysimétriques et cases de végétation du SBAT. *Ann Serv Bot Agron Tunis* 29, 223 p