

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE COLONNEL EL HADJ LAKHDAR BATNA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

Mémoire de Magistère en sciences agronomiques

Option : AGROTECHNIE

Sujet :

**ESSAIS D'OPTIMISATION DU FRACTIONNEMENT ET
DE LA PERIODE D'APPORT DE L'AZOTE POUR LA
CULTURE DU BLE DUR (variété Waha) EN
ZONE SEMI – ARIDE IRRIGUEE**

Présenté par M^{me} FERTAS Khadra née BOUSSAAD

Soutenue publiquement : le 04 / 06 / 2007

Devant le jury composé de :

M^r. T. SAADOUNE , Professeur à l'université de Batna ; Président
M^r. B. OUDJEHIH , Maître de conférences à l'université de Batna ; Rapporteur
M^r. H. BOUZERZOUR , Professeur à l'université de Sétif ; Examineur
M^r. A. BENBELKACEM , Chargé de recherche à l'INRA Algérie ; Examineur
M^r. C. BENABBAS , Chargé de cours à l'université de Batna ; Invité

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2006 / 2007

Je tiens à dédier ce modeste travail

A la mémoire de mon père,

A ma mère qui ma soutenu pendant toutes ces années,

A mon mari et ma fille Amina,

A mes frères et sœurs,

A toute ma famille,

A mes camarades,

Avec toute mon affection.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, qu'il me soit permis de remercier Monsieur SAADOUNE T., professeur à l'université de Batna, d'avoir bien voulu accepter de présider cet honorable jury.

Monsieur OUDJEHIH B., mon promoteur, pour l'aide, les orientations et les conseils judicieux qu'il n'a pas cessé de me prodiguer tout au long de mon travail, en me laissant une grande autonomie d'action.

Mes remerciements également à Monsieur BOUZERZOUR H., professeur à l'université de Sétif et Monsieur BENBELKACEM A., chargé de recherche à l'INRA, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Aussi mes remerciements à Monsieur BENABBAS C., chargé de cours à l'université de Batna d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail. Je souhaite les remercier tous.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	01
PREMIERE PARTIE : I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	02
1.1- APERCU SUR LE CYCLE BIOLOGIQUE DU BLE	02
1.1.1- De la levée à la formation des ébauches d'épillets.....	02
1.1.2- De l'épi 1cm à la floraison.....	02
1.1.3- Au cours de la période maturation du grain.....	03
1.1.4- Interactions entre les phases de développement.....	04
1.2- L'AZOTE DANS LE SYSTEME SOL – PLANTE.....	05
1.2.1- Disponibilité des différentes formes de l'azote dans le sol.....	05
1.2.2- Facteurs influençant l'absorption et l'assimilation de l'azote par le blé.....	07
1.2.3- Les besoins en azote du blé.....	07
1.2.4- Accumulation d'azote avant et après floraison.....	08
1.2.5- Devenir de l'azote dans la plante.....	08
1.2.6- Les protéines dans le grain de blé.....	09
1.2.7- Influence de la fumure azotée sur le taux et la composition protéique.....	09
1.2.8- Caractérisation du statut azoté de la culture.....	10
1.2.8.1- Notion de teneur critique en azote.....	10
1.2.8.2- L'indice de nutrition azotée.....	11
1.2.8.3- La courbe de réponse à l'azote.....	12
1.2.8.4- L'efficacité d'utilisation de l'azote.....	12
1.2.8.5- Les coefficients de l'utilisation de l'azote.....	13
1.2.8.5.1- Le C.A.U et le C.R.U.....	13
1.2.8.5.2- Les variations des coefficients d'utilisation de l'azote.....	14
1.2.9- Effets de la structure et de l'humidité du sol sur l'utilisation de l'azote par le blé.....	15
1.2.9.1- Influence de la structure du sol.....	15
1.2.9.2- Effets de l'humidité du sol et des fortes pluies.....	16
1.2.10- Conséquences agronomiques d'une carence azotée sur le blé.....	17
1.3- OPTIMISATION DE LA FERTILISATION AZOTEE POUR UNE MEILLEURE QUALITE DU LE BLE DUR.....	18
1.3.1- Raisonnement de la fertilisation azotée et calcul de la dose d'engrais.....	19
1.3.2- Intérêts du fractionnement de l'engrais azoté et de la période d'apport.....	20
DEUXIEME PARTIE : II. MATERIELS ET METHODES.....	22
2.1- Localisation et caractéristiques pédoclimatiques du site expérimental.....	22
2.2- Matériel végétal.....	22

2.3- Méthodes.....	22
2.3.1- Techniques culturales et conduite de la culture.....	22
2.3.2- Apport et fractionnement de l'engrais azoté.....	23
2.3.2.1- Estimation des besoins totaux en azote de la culture.....	23
2.3.2.2- Modalités de fractionnement des besoins et stades d'apport.....	23
2.3.3- Dispositif expérimental.....	25
2.3.4- Prélèvement de plantes.....	27
2.3.5- Paramètres mesurés.....	28
2.3.5.1- Biomasse sèche aérienne.....	28
2.3.5.2- Teneur en azote.....	28
2.3.5.3- Teneur en protéines du grain.....	28
2.3.5.4- Composantes du rendement.....	28
2.3.5.4.1- Nombre d'épis / plant et par m ²	28
2.3.5.4.2- Nombre de grains / épi et par m ²	28
2.3.5.4.3- Poids de mille grains.....	28
2.3.5.4.4- Rendements en grains et en paille / ha.....	28

TROISIEME PARTIE : III. RESULTATS ET DISCUSSIONS..... 29

3.1- Effets des modalités de fractionnement, de leurs variantes d'apport et des proportions d'azote appliquées sur la production de biomasse épiaison et maturité.....	29
3.1.1- Résultats.....	29
3.1.1.1- Avantage de la fertilisation azotée.....	29
3.1.1.2- Influence du nombre de fractionnements des besoins azotés.....	29
3.1.1.3- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à deux fractions.....	32
3.1.1.4- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à trois fractions.....	34
3.1.2- Discussions.....	35
3.2- Variations du rendement grain et de ses composantes en fonction des modalités de fractionnement, de leurs variantes d'apport et de proportions d'azote appliquées.....	36
3.2.1- Analyse des résultats.....	36
3.2.1.1- Composantes de rendement en grains.....	36
3.2.1.1.1- Influence de la fertilisation azotée.....	36
3.2.1.1.2- Influence du fractionnement de la fumure azotée.....	38
3.2.1.1.3- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à deux fractions.....	40
3.2.1.1.4- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à trois fractions.....	42
3.2.1.2- Rendement en grains.....	43
3.2.1.2.1- Analyse des valeurs moyennes.....	43
3.2.2- Discussions.....	46
3.2.2.1- Composantes de rendement en grains.....	46
3.2.2.2- Rendement en grains.....	48
3.3- Variations de la teneur en azote de la biomasse épiaison et en protéines du grain récolté..	48
3.3.1- Analyse des valeurs moyennes.....	48
3.3.2- Discussions.....	51

CONCLUSION GENERALE.....	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	55
ANNEXE.....	62

INTRODUCTION

En Algérie, une grande partie des terres situées dans les régions semi – arides est occupée par les céréales (blé et orge), dont les rendements restent faibles et irréguliers. Pour la wilaya de Batna, le blé dur couvrait en 2003 – 2004 une superficie de 30.383 ha avec une production totale de 168.481 qx, ce qui représente en moyenne 5.5 qx / ha (M. A. D. R. 2003).

Les rendements à l'hectare faibles sont attribués essentiellement aux aléas climatiques et à des techniques culturales inadéquates.

Quant on s'intéresse aux techniques culturales, il convient d'évoquer l'élément clé pour l'élaboration des rendements en blé, telle la fertilisation azotée qui nécessite actuellement une gestion plus stricte, qui repose sur la stratégie d'adapter les apports aux besoins de la culture durant ses différents stades de développement (Justes, 1993). Cette stratégie qui permet d'aider les agriculteurs à mieux raisonner les apports d'azote, débute par l'analyse de la relation causale entre les quantités d'azote absorbées et le rendement final en grains produit (Limaux, 1999). Une telle relation globale peut être décomposée en plusieurs relations. Une première concerne la quantité d'azote absorbée et la biomasse aérienne accumulée tout au long du cycle de la culture. La deuxième est celle entre cette biomasse et les composantes de rendement synthétisées. La troisième relation concerne les composantes du rendement et le rendement final en grains (Justes, 1993). En décomposant la relation globale, on aboutit à l'idée qui relie les stades de formation des différentes composantes avec leurs besoins en azote, cela signifie qu'il faut proposer aux agriculteurs céréaliers des stratégies de gestion des apports azotés et des stades d'apport.

Dans ce but nous essayons de comparer plusieurs modalités de fractionnement azoté. Les modalités de fumure choisies permettent de connaître la réponse d'une variété de blé dur (waha), très répandue dans notre région à l'action d'une fertilisation azotée non fractionnée d'une part, et l'effet des besoins répartis en deux et en trois fractions égales ou inégales d'autre part. L'efficacité des différentes modalités est appréciée au niveau du support de rendement, qui est la biomasse et les composantes du rendement, sans négliger un élément très important qui est la teneur en azote de la biomasse formée et par conséquent le taux protéique du grain produit. Pour arriver à ce but nous présenterons dans une première partie, l'état des connaissances actuelles sur le fonctionnement du blé en conditions de nutrition azotée variables, durant ses différents stades de développement. La partie matériels et méthodes décrit le dispositif expérimental et les différentes mesures réalisées à fin de répondre à l'objectif du travail déjà cité. La partie résultats et discussions permet d'analyser l'effet des différentes modalités azotées sur la biomasse végétative, les composantes du rendement, la teneur en azote de la biomasse et finalement la teneur en protéines du grain.

I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1- APERÇU SUR LE CYCLE BIOLOGIQUE DU BLE

Comme toutes les céréales à paille, le blé possède un cycle biologique annuel, réparti classiquement en 2 périodes principales successives (végétative et reproductrice), subdivisées elles mêmes en phases délimitées par des stades (Soltner, 1999). Ces derniers sont définis par des changements morphologiques visibles et des modifications internes de la plante (Annexe A1).

La dynamique de développement des plantes et les principaux stades repères sont :

1.1.1- De la levée à la formation des ébauches d'épillets.

Lors de la phase de levée, le nombre de plantes au m² se détermine. Après la levée, les ébauches foliaires croissent et émergent les unes après les autres selon un rythme constant. Lorsque la plante a trois feuilles, une nouvelle tige apparaît à l'aisselle de la feuille la plus âgée, *c'est le maître brin*. L'émergence de cette première talle hors de la gaine de la première feuille est le repère conventionnel du début tallage (Gate, 1995).

La formation des ébauches d'épillets démarre au stade plein tallage, suivit par l'initiation florale et se termine par l'apparition des ébauches des futurs épillets.

L'apparition des talles se fait de façon synchrone avec le rythme d'émission des feuilles du maître brin (Masle et Sebillotte, 1981). La vitesse d'émission des feuilles dépendant de nombreux facteurs de l'environnement, comme la durée du jour, le rayonnement et la température du sol (le centre de formation des feuilles étant situé au niveau du sol en début de cycle) (Jamieson et al., 1995). Le tallage s'arrête lorsque les tiges entrent en compétition pour l'eau, l'azote ou la lumière (Masle, 1980).

1.1.2- De l'épi 1 cm à la floraison

Par définition, le stade épi-1cm est considéré atteint lorsque la distance entre le sommet de l'épi du maître brin et la base du plateau de tallage est en moyenne de 1 cm (Annexe A2). A ce stade, la taille de l'épi est de 3 - 4 mm (Gate, 1995). A partir de ce moment, la tige principale et les talles plus âgées commencent à s'allonger, suite à l'élongation des entre-nœuds auparavant empilés sous l'épi. C'est le début du stade montaison au cours duquel le nombre final d'épis par plante se détermine (Masle, 1980). Il prend fin lorsque les organes reproducteurs sont formés. Certaines tiges régressent en stoppant leur développement et leur croissance. Celles qui ne sont pas encore entrées en croissance restent à l'état de bourgeons dormants.

Le stade 2 nœuds est atteint quand les deux premiers nœuds à la base de la tige principale sont visibles sur 50 % des plantes (Gate, 1995).

L'apparition de la dernière feuille ligulée marque le début du stade méiose pollinique. L'épi poussé par l'allongement de la tige, provoque un renflement au moment où il a rejoint la gaine de la dernière feuille, c'est le stade gonflement qui apparaît 10 jours avant l'épiaison (Gate, 1995) (Annexe A2). Par la suite, le sommet de l'épi se dégage de la dernière gaine qui a alors atteint sa longueur définitive, on parle de stade épiaison. Les glumelles des fleurs s'ouvrent largement et les sacs polliniques se libèrent, c'est le stade floraison (anthèse) ; La tige et l'épi ont quasiment atteint leur croissance définitive (Gate, 1995).

Les composantes de rendement tels le nombre d'épillets par épi et celui de grains par épillet sont définis au cours de la réalisation du stade épiaison qui prend fin à la floraison

(Meynard, 1985) (Fig.1). Cependant, Masle (1985) considère que ces composantes seraient fixées à la floraison. Gate et Grimaud (1989) dissocient la mise en place du nombre d'épis, fixé à la montaison et l'élaboration du nombre de grains par épi, conditionnée par la fertilité de l'épi. Coïc et al., (1950) ont constaté que le nombre de grains par épillet peut encore évoluer après floraison et qu'un apport d'azote à ce stade l'augmente significativement à la récolte. La fécondation des ovules ayant déjà eu lieu à ce stade, l'azote apporté aurait une action bénéfique sur la diminution du nombre d'avortement de jeunes ovules fécondés.

1.1.3- Au cours de la période maturation du grain

La maturation s'étale sur environ 50 jours et marque la fin de la période végétative. La phase de remplissage du grain se caractérise par la multiplication cellulaire suivie par l'accumulation des réserves (amidon et protéines) dans les cellules du grain. C'est une étape déterminante pour le poids (PMG) et la teneur en protéines du grain (Chambenoit, 1999).

Les cinétiques de l'accumulation de la matière sèche et de l'eau varient au cours des différentes phases de la période maturation (Fig.2). Le début de la *phase palier hydrique* concorde avec la fin de la multiplication cellulaire au sein du grain (Gate, 1995). Le stockage maximal des réserves s'effectue au moment où la quantité d'eau dans le grain est stable (Fig.2). Lorsque toutes les cellules du grain ont atteint leur poids final, le grain atteint sa taille définitive (maturité physiologique, qui traduit l'arrêt de la croissance en matière sèche du grain). Il entame ensuite la *phase dessiccation* (maturité récolte) qui correspond à un état de dessiccation permettant un battage mécanique (teneur en eau du grain avoisine le 15%) (Gate, 1995).

Semis	Stade A (début tallage)	Fin levée	Stade B (début montaison)	Stade C1	Mi - Montai son	Stade F (Floraison)	Maturité
Nombre de plantes/m ²							
Nombre d'épis / plante							
Nombre d'épillets / épi							
Nombre de grains / épillet							
Nombre d'épis / m ²							
Nombre de grains / épi							
Nombre de grains / m ²						Poids moyen d'l grain	
Rendement							
Fig.1 : Phases de formation des principales composantes du rendement (Meynard, 1985)							

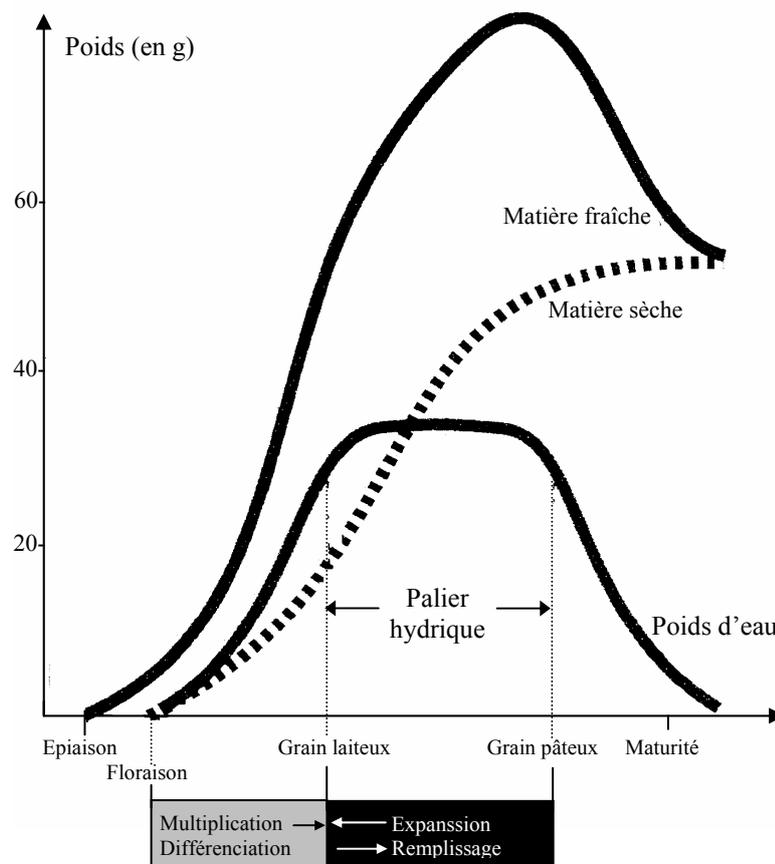


Fig.2 : Principaux stades et caractéristiques de la période de remplissage du grain des céréales à paille (Gate, 1995)

1.1.4- Interactions entre les phases de développement

Les différentes étapes du cycle biologique interviennent à des degrés différents dans l'établissement du rendement d'une culture. En effet, le rendement par une unité de surface résulte de la contribution de divers paramètres, fixés tout au long de la mise en place des différentes phases et stades du cycle (Sebillotte, 1980). Ainsi :

$$\underline{\text{Rend./m}^2} = \text{Plants / m}^2 \times \text{épis / plant} \times \text{épillets / épi} \times \text{grains / épillet} \times \text{poids d'un grain}$$

Ou simplement

$$= \text{Epis / m}^2 \times \text{grains / épi} \times \text{poids d'un grain} = \text{grains / m}^2 \times \text{poids d'un grain.}$$

Le rendement serait plus élevé en provoquant l'augmentation de chacune de ces composantes. Cependant, ces dernières ne sont pas indépendantes les unes des autres. Ainsi, dans le cas où le nombre d'épis par m² est augmenté par l'action d'un facteur quelconque (température élevée liée à un semis précoce, azote disponible en quantité suffisante), il se peut que le nombre de grains par épi ou le poids moyen d'un grain diminue car la quantité de substances (eau, éléments minéraux assimilables) ou d'énergie (quantité de lumière arrivant aux feuilles) est trop faible pour satisfaire les besoins d'un plus grand nombre de tiges (Coïc et al., 1950). Par ailleurs, un peuplement trop dense peut favoriser l'expression de conditions limitantes ultérieures (verse, maladies cryptogamiques). De même, l'augmentation du nombre

de grains par épi, peut conduire à une chute du poids de chaque grain. Par contre, un faible nombre d'épis, suite par à un déficit temporaire d'alimentation azotée, peut se traduire par un nombre de grains par épi plus important, voire même un poids de grains plus élevé (Gembloux, 1990).

1.2- L'AZOTE DANS LE SYSTEME SOL - PLANTE

L'azote est le facteur le plus fréquent limitant la croissance du blé. Il est donc utile de s'intéresser aux processus régissant sa disponibilité et à son devenir.

1.2.1- Disponibilité des différentes formes de l'azote dans le sol

Dans le compartiment sol – plante, l'azote est présent soit sous *forme organique ou minérale* (Recous et al., 1996). De nombreux sols contiennent 3 à 5 tonnes d'azote par hectare, pratiquement sous la forme exclusivement organique et essentiellement dans la couche labourée (25 à 30 cm de profondeur).

L'azote minéral est présent dans le sol sous trois formes d'ions (fig. 3): *nitrique* (NO_2^- ou azote nitreux), *ammonium* (NH_4^+ ou azote ammoniacal), *nitrate* (NO_3^- ou azote nitrique).

La disponibilité en nitrate est sous la dépendance de nombreux processus comme la *minéralisation* et la *nitrification* dont l'intensité dépend des facteurs climatiques (température, humidité), des caractéristiques du sol (texture, pH et structure du sol) et de l'activité microbienne :

- La *minéralisation* correspond à la dégradation de la matière organique par les micro-organismes du sol. Elle aboutit à la production d'azote ammoniacal. Ce processus peut fournir chaque année quelques dizaines à plus de 150 Kg d'azote par hectare;
- La *nitrification* est la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitreux, puis nitrique par des bactéries, en présence d'oxygène et des valeurs de pH neutres à légèrement basiques.

La disponibilité du nitrate est affectée par l'organisation microbienne, la dénitrification (transformation de l'azote nitrique en azote gazeux) et le lessivage (entraînement du nitrate vers le sous-sol par percolation de l'eau en excès, possible en période automnale et hivernale) (Mary et Justes, 2001).

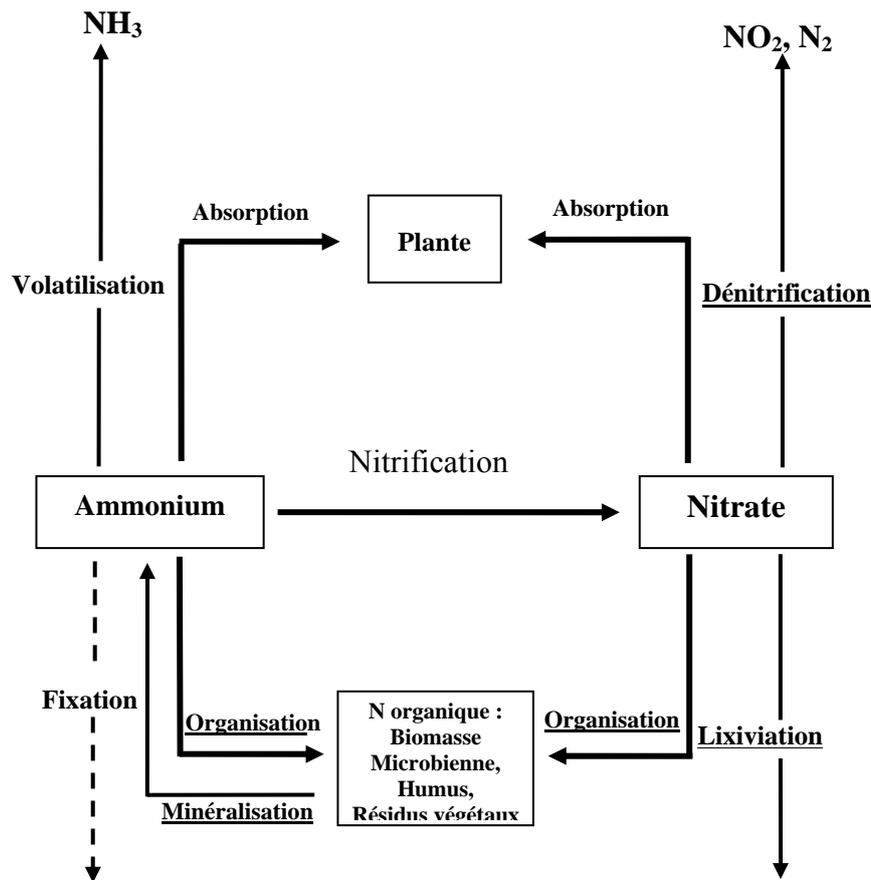


Fig. 3 : Formes d'azotes et transformations dans le système sol – plante. (Les termes soulignés correspondent à des transformations résultant d'activités microbiennes) (Recous et *al.*, 1996).

Ces processus semblent également affecter l'azote minéral apporté par l'engrais. La figure 4 montre que celui-ci est disponible relativement peu de temps dans le sol. On constate tout d'abord que la quantité d'azote de l'engrais retrouvée sous forme minérale dans le sol diminue rapidement. Elle représente seulement 60% de l'apport une semaine après application, et moins de 5% après trois semaines. Les transformations biologiques sont donc très rapides; et dans l'ensemble des situations étudiées par Recous et *al.*, (1996), il n'y a pas eu de pertes par lessivage au cours du cycle cultural.

Parallèlement à cette « disparition », on observe l'incorporation d'azote de l'engrais dans la plante et sous forme organique dans le sol. Dans l'exemple illustré par la figure 4, le coefficient d'utilisation par le blé atteint environ 40% de l'apport après 3 semaines. Il existe alors une réelle compétition pour l'azote minérale entre le peuplement et l'activité microbienne. En effet, la réorganisation microbienne représente 30% de l'azote apporté. Ainsi, plus de 80% de l'azote apporté est retrouvé dans le compartiment sol - plante. Les pertes d'azote représentent donc 10 Kg / ha et sont dues probablement à la volatilisation d'ammoniac. Ces ordres de grandeurs sont tout à fait typiques des premiers apports d'azote réalisés sur blé d'hiver (Recous et *al.*, 1996).

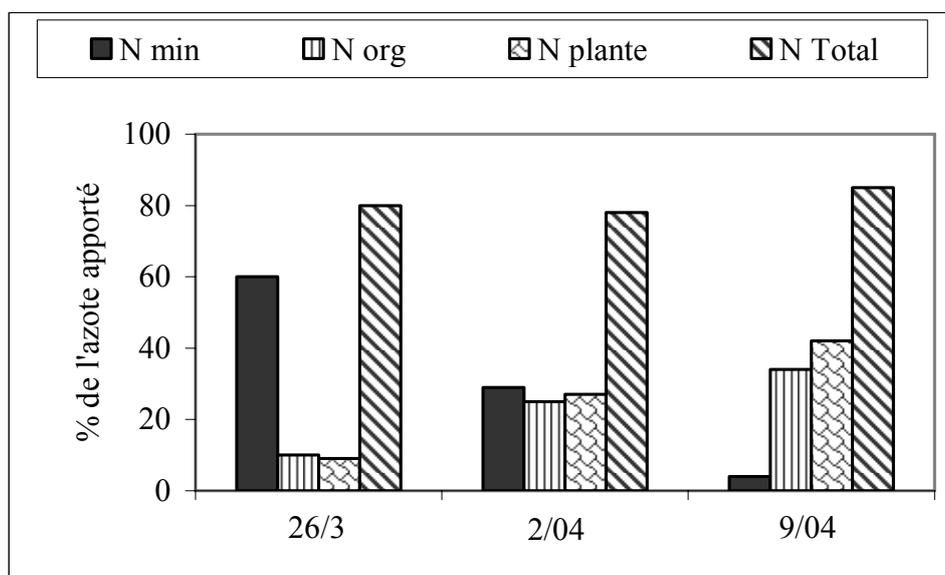


Fig.4 : Devenir de l'azote sous forme uréique sur une culture de blé (Apport de 50 kg / ha le 21 Mars), au cours des trois semaines consécutives selon Pouilly, 1991 in Recours et *al.*, 1996) :

N min = engrais sous forme minérale ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$) dans le sol,

N org. = N organisé dans le sol,

N plante = N absorbé / la plante (feuilles, tige et racines),

N Total = N total des trois compartiments.

1.2.2- Facteurs influençant l'absorption et l'assimilation de l'azote par le blé

L'absorption d'azote par la culture de blé dépend de la quantité d'azote minéralisée disponible dans le sol, de l'état sanitaire, du développement et de la vitesse de sénescence (notamment après floraison) du système racinaire et du volume du sol exploité par les racines (Engels et Marschner, 1995).

Le flux de NO_3^- jusqu'à la surface racinaire dépend de l'importance du contact sol-eau, de son taux de diffusion et de son transport dans la solution du sol, conditionnés par la transpiration de la culture et la quantité d'eau présente. L'extension du système racinaire est fonction de la croissance et donc de la fourniture en azote (Gastal et Lemaire, 2002).

1.2.3- Les besoins en azote du blé

Les besoins d'une culture en azote sont définis comme les quantités que celle-ci doit absorber à chaque instant (besoins instantanés) ou sur l'ensemble du cycle (besoins totaux) pour obtenir le rendement optimum et la meilleure qualité possible (Coïc, 1956). En d'autres termes, c'est la quantité d'azote nécessaire permettant à une culture d'atteindre un objectif de croissance et de rendement.

Les besoins quotidiens en azote d'une culture sont liés à sa capacité à croître. Le prélèvement de l'azote par des plantes est donc déterminé en grande partie par leur vitesse de croissance (Lemaire et Salette, 1984 ; Lemaire et *al.*, 1996). Ce-ci explique la variation du taux de croissance d'une variété à l'autre.

Les besoins en azote du blé sont très variables aux cours de son cycle biologique :

- Au cours de la première partie du tallage herbacé, les besoins sont faibles et peuvent être satisfaits par la minéralisation automnale. Un apport d'azote au semis est donc inutile (Gate, 1995).

- Par la suite, la température de l'air augmente progressivement, plus vite que celle du sol de sorte que la croissance de la plante s'accélère (les entre-nœuds s'allongent, la taille des feuilles augmente et les racines se développent), alors que la minéralisation n'a quasiment pas repris. L'azote minéral du sol a donc toutes les chances de ne pas satisfaire les besoins. Un apport d'engrais est par conséquent nécessaire à la sortie de l'hiver. La dose de ce premier apport doit correspondre à la biomasse attendue au stade « épi 1 cm » (Simon *et al.*, 1989).

- Au stade « épi 1 cm », les besoins deviennent importants, et bien que la plante bénéficie de la minéralisation printanière, celle-ci s'avère insuffisante. Un deuxième apport est donc indispensable pour ne pas pénaliser le rendement. Dans le cas de culture à très haut potentiel, où la dose à appliquer est très importante, elle peut être fractionnée en deux fois : les 2/3 au stade « épi 1 cm » et le reste entre les stades 2 nœuds et apparition de la dernière feuille. Le fractionnement peut faire progresser de 0,2 à 0,3 point le taux en protéines des grains (Le Souder, 1997).

1.2.4- Accumulation d'azote avant et après floraison

L'accumulation quotidienne d'azote dans la plante dépend de la richesse du sol en cet élément, de ses besoins de croissance et de sa capacité d'absorption.

Une culture de blé absorbe avant floraison, la majeure partie de l'azote stocké dans ses parties aériennes à maturité (de 65 à 72 % selon Van Sandford et Macknown, 1987). Sur des sols suffisamment irrigués après floraison, la plante peut encore absorber des quantités non négligeables d'azote, ce qui a un impact sur la teneur en protéines des grains. Les estimations de la proportion de l'azote retrouvé dans les grains à maturité issu de l'absorption post-floraison sont de 10 à 50 % (Austin *et al.*, 1977). En effet, le système racinaire peut continuer à croître après floraison et donc explorer de nouvelles zones du sol, plus profondes et plus humides.

Après floraison, les besoins en azote de la culture sont estimés à partir de la courbe critique de la teneur en azote des parties aériennes. Bien que celle-ci n'ait été validée que jusqu'à floraison, Barré (1997) (cité par Chambenoit, 1999) a montré que cette courbe était valable 200 degrés jours après floraison. Pendant la période d'accumulation importante de biomasse dans les grains, la teneur en azote critique est maintenue à un niveau constant.

1.2.5- Devenir de l'azote dans la plante

Une fois absorbé (principalement sous forme de nitrate), l'azote est réduit au niveau des feuilles et des racines, puis incorporé à des acides aminés. Il sert principalement à constituer les protéines utiles à la photosynthèse comme la rubisco et celles des chloroplastes (Millard, 1998). Ces protéines sont par la suite dégradées et remobilisées depuis les organes végétatifs vers les grains (Evans, 1983). Les 50 à 75% de l'azote stocké dans les organes végétatifs avant floraison, sont transférés vers le grain (Austin *et al.*, 1977 et Van Sandford et Macknown, 1987), le reste provient de l'azote minéral assimilé après floraison (Girard, 1997).

Notons toutefois, que l'azote peut être mis en réserve dans les organes végétatifs, mais ceci ne représente qu'une faible quantité et ne permet qu'à maintenir le turn-over des protéines déjà présentes. En terme de bilan, l'azote prélevé post - floraison est alloué aux grains.

Ce sont surtout les feuilles les plus jeunes qui remobilisent l'azote. Sur un total de 40 % pour l'ensemble des feuilles, la contribution de la dernière feuille s'élève à 24 % et celle de

l'avant-dernière feuille à 11 % (Gate, 1995). En outre, la participation quantitative des glumes peut égaler celle de la dernière feuille. Cette aptitude élevée de remobilisation permet sans doute de comprendre l'intérêt de fractionner le deuxième apport d'azote de début montaison pour un objectif d'augmentation de la teneur en protéines du grain. Suite à un troisième apport tardif (stade 2 nœuds, dernière feuille), l'azote est préférentiellement assimilé dans les organes en croissance active, soit l'épi ou la dernière et avant-dernière feuille. Cet enrichissement dans les organes proximaux des futurs grains conduit à une meilleure efficacité du transfert de l'azote vers les grains.

La quantité d'azote par hectare dans les grains à la récolte croît avec celle présente à la floraison dans les parties aériennes. Cette dernière explique environ 80% de la variation de la quantité d'azote interne dans les grains (Gate, 1995). La fraction d'azote que l'on retrouve dans le grain (N grain / N absorbé à la floraison par les parties aériennes) diminue en fonction de la quantité stockée à la floraison dans les parties aériennes. En régime de sous-fumure azotée prononcée, il y a plus d'azote dans les grains à la récolte qu'il y en avait à la floraison dans les parties aériennes. Ceci traduit, soit la participation d'une remobilisation des racines ou d'une absorption post-floraison (Jeuffroy et Bouchard, 1999). En condition de sous-fumure modérée, les deux quantités d'azote sont équilibrées. Puis, l'efficacité du transfert vers les grains diminue entre l'optimum de fumure et les régimes de sur-fumure. L'azote en surplus reste stocké dans la paille.

1.2.6- Les protéines dans les grains de blé

L'amidon et les protéines sont les deux composantes majeures du grain de blé. Suivant les conditions culturales, l'amidon représente 60 à 75 % du rendement grain et les protéines 9 à 15 % (Jeuffroy, 2001)

La teneur en protéines des grains chez le blé est souvent le principal critère de qualité recherché. Elle est estimée par la formule :

$$\text{Teneur en protéines du grain} = \text{teneur en N total du grain} \times 5,7^*$$

* : (5,7 étant le coefficient moyen des protéines par rapport à l'azote des protéines du grain de blé) (Jeuffroy, 2001).

1.2.7- Influence de la fumure azotée sur le taux et la composition protéique

Les protéines sont synthétisées essentiellement à partir de l'azote absorbé avant le stade remplissage du grain. Alors, une fumure azotée déséquilibrée en période végétative affecte l'accumulation de l'azote dans le grain (Triboï et Triboï-Blondel, 2001).

Christensen et *al.*, (1981) estiment que la dose d'azote apportée représente 80% de la variabilité du taux de protéines. Selon les mêmes auteurs, l'augmentation de la fertilisation azotée induit quasi systématiquement une hausse en pourcentage des protéines du grain et que la relation qui lie ces deux facteurs est presque linéaire. De même, un apport azoté tardif augmente la teneur globale en protéines du grain.

Les albumines et les globulines constituent les protéines solubles du grain de blé. Les glutenines et les gliadines constituent les protéines insolubles (gluten). Ces derniers représentent 40% des protéines totales du grain (Daniel et Triboï, 2000).

Selon Triboï et Triboï-Blondel (2001), le pourcentage d'albumines-globulines diminue avec l'augmentation de la fourniture en azote. Alors que dans les mêmes conditions, la proportion des gliadines et glutenines augmente. Cette augmentation sélective résulterait du fait qu'en augmentant le rapport N/S, on induirait des variations quantitatives de la synthèse

d'acides aminés soufrés (la méthionine et la cystéine). Les gliadines ne comprenant que très peu de ces acides aminés, voient leur proportion s'élever.

1.2.8- Caractérisation du statut azoté de la culture

L'azote est, le plus souvent après l'eau, l'élément limitant de la productivité des cultures. La compréhension des relations entre la croissance et l'accumulation de l'azote au sein d'une culture est un élément fondamental dans l'élaboration d'outils de diagnostic de son statut azoté. La maîtrise de ce dernier permet d'ajuster au mieux les apports d'azote aux besoins, suivant les disponibilités du milieu et les objectifs de production (Lemaire et Gastal, 1997).

1.2.8.1- Notion de teneur critique en azote

L'expérience prouve que plus une culture de blé reçoit des doses d'engrais azotés importantes, plus la biomasse accumulée par la culture est élevée, et ce jusqu'à une dose « optimale » d'engrais, au-delà de laquelle la biomasse de la culture n'évolue plus, bien que cette dernière puisse encore accroître sa teneur en azote (Lemaire et *al.*, 1989).

La teneur minimale de la plante en azote, nécessaire à sa croissance maximale est appelée « teneur en azote critique (notée Nc %). Elle peut être déterminée à tout instant et évolue au cours du cycle en fonction de la biomasse du peuplement. Le prélèvement critique en azote d'une culture est alors défini comme la quantité d'azote que la culture doit prélever pour atteindre le maximum de biomasse (Lemaire et al., 1989).

La courbe critique (ou de dilution) (fig.5), établie par Lemaire et *al.*, (1989), met en relation la teneur en azote total et l'évolution de la biomasse sèche aérienne d'une culture au cours de sa croissance végétative. Cette courbe est applicable en l'état pour blé dur (Justes et *al.*, 1997).

La relation est de type :

$$Nc \% = a (Msa)^{-b}$$

Nc = teneur critique en azote de la plante (% du poids sec)
Msa = Matière sèche aérienne produite (tonnes / ha)
Pour la courbe référence du blé: a = 5,350 et b = 0,442 (Justes et al., 1994)

Pour que cette relation soit validée, les biomasses sèches doivent être comprises entre 0,2 et 14 t/ha. Elle est stable jusqu'à floraison, quelle que soit la variété, le stade de la culture, les conditions pédo-climatiques et la vitesse de croissance de la culture (Justes et *al.*, 1994).

La courbe de dilution critique d'azote semble être un outil théorique solide et fiable pour diagnostiquer le statut de nutrition azoté de la culture en période de croissance (levée floraison), en utilisant uniquement la production de matière sèche et la teneur en azote de la culture (Gastal et Lemaire, 2002).

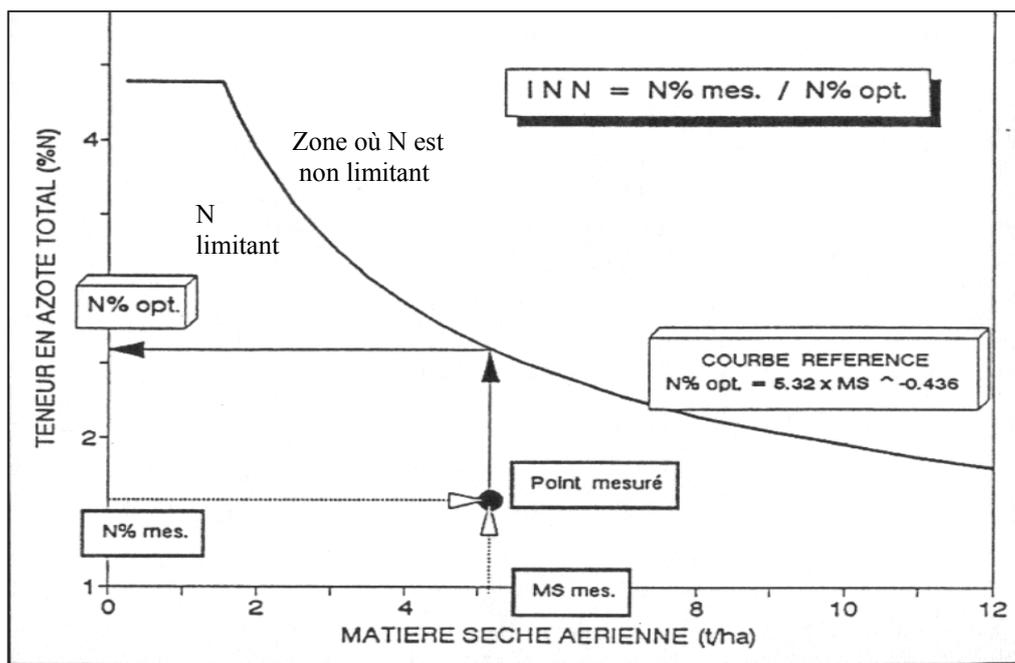


Fig. 5 : Définition de l'INN utilisé par Lemaire et *al.*, 1989.

MS mes. = matière sèche aérienne mesurée,

N % mes. = teneur en azote total mesurée

N% opt. = teneur en azote totale optimale

$$[N\% = 5.32 \times MS \text{ mes.} (- 0.436)]$$

La lecture de la courbe critique permet de différencier 3 zones:

- La teneur en N située sous la courbe critique, signifie que l'azote est facteur limitant de la croissance
- La teneur en N placée sur la courbe, indique que le peuplement est à son optimum de nutrition azotée (biomasse maximale).
- La teneur en N située au-dessus de la courbe, traduit une consommation de luxe en azote. (fig. 5).

1.2.8.2- L'indice de nutrition azotée

Afin de rendre compte de l'état de nutrition azotée d'un peuplement végétal et de caractériser d'éventuelles carences, Lemaire et Gastal (1997) ont proposé de calculer l'Indice de Nutrition Azotée (INN). Il est défini comme le rapport entre la teneur en azote observée dans la plante (N% mesuré) et celle en azote critique (Nc) pour la même quantité de matière sèche produite (fig.5).

$$INN = N\%_{\text{mes.}} / Nc \%$$

Lorsque le INN est inférieur à 1, on déduit qu'il y a une déficience en azote de la culture. Elle ne peut donc produire suffisamment de biomasse et par conséquent moins de grains / m². Par contre, si le INN est supérieur à 1, l'azote n'est pas limitant et sa disponibilité dans le sol permet une croissance maximale.

1.2.8.3- La courbe de réponse à l'azote

Le potentiel génétique d'une plante peut être défini comme la capacité totale de celle-ci à produire de la biomasse ou à faire du rendement lorsqu'il n'y a pas de contraintes environnementales (Richards, 1996). Pour établir la relation entre la croissance et la fourniture en azote, ou pour déterminer le potentiel génétique de la plante en conditions standard (lumière, température et CO₂) sauf pour la fourniture en azote, on applique l'engrais azoté à des doses croissantes (de zéro à des doses supérieures aux besoins). La biomasse ou le rendement sont alors déterminés en fonction de la quantité d'azote apportée. C'est la courbe de réponse de la culture aux apports d'engrais azotés (fig. 6) (Angus, 1995).

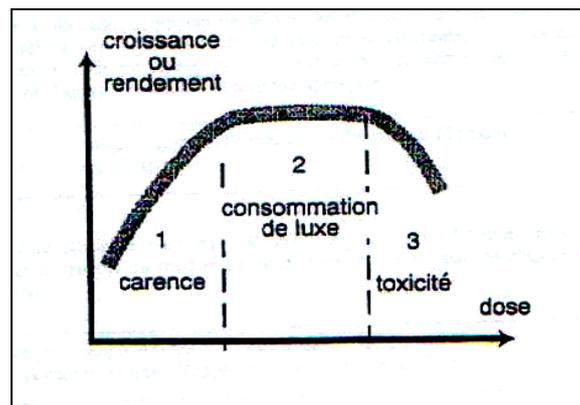


Figure 6 : Courbe de réponse de la culture de blé aux apports d'engrais azotés (Franc, 1996).

Globalement, cette figure montre que dans des conditions de fortes déficiences en azote, la production est très faible. Elle augmente ensuite linéairement avec la fourniture d'azote. A l'approche du niveau d'apport optimal, la courbe tend vers une asymptote. Les augmentations ultérieures d'azote n'améliorent plus la production, et deviennent même toxiques. On estime que le potentiel génétique de la plante est atteint.

1.2.8.4- L'efficacité d'utilisation de l'azote

Selon Meynard et Aubry (1988), les courbes de réponse permettent de calculer les efficacités d'utilisation de l'azote.

Il y a deux types différents d'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté :

- La première est l'*efficacité agronomique*, définie par le rapport entre le rendement ou la biomasse de la culture engendré par l'apport d'engrais et la quantité de N appliquée.

$$\text{Efficacité agronomique (Kg/Kg)} = \frac{\text{Rendement parcelle fertilisée} - \text{Rendement parcelle témoin}}{\text{Quantité d'engrais apporté}}$$

- Un deuxième type d'efficacité peut être calculée : il s'agit de l'*efficacité physiologique*, définie par le rapport du rendement ou la biomasse réalisée sur la quantité d'azote exportée provenant de l'engrais.

$$\text{Efficacité physiologique (Kg/Kg)} = \frac{\text{Rendement parcelle fertilisée} - \text{Rend. parcelle témoin}}{\text{Exportation N parcelle fertilisée} - \text{exportation N parcelle témoin}}$$

Quand la biomasse est mise en relation avec l'azote accumulé dans la plante, le début de la pente de la courbe obtenue, qui représente l'efficacité intrinsèque de l'utilisation de l'azote par la plante (efficacité physiologique) est plus raide (plus de biomasse par unité d'azote apportée) que celle de la biomasse mise en relation avec l'azote appliqué (efficacité agronomique). La différence entre les points qui correspondent au début du plateau de production de biomasse exprimée en fonction d'unité d'azote absorbé et appliqué, donne une indication de l'efficacité d'utilisation de l'azote appliqué. En d'autres termes, la pente de la courbe qui met en relation la production et la quantité d'azote appliquée indique l'efficacité d'utilisation de l'azote appliqué (efficacité agronomique) (Angus, 1995).

Lorsque la fourniture en azote est faible, l'efficacité est bonne. Elle diminue quand l'apport d'azote augmente. L'efficacité est par ailleurs très dépendante des facteurs climatiques et s'avère généralement assez mauvaise en zones tropicales et arides en raison des pertes importantes.

La différence entre l'azote appliqué et celui accumulé donne une information quant aux sources et pertes d'azote (Ter Steege *et al.*, 2001). En effet, l'azote peut provenir des précipitations, des réserves dans le sol et de l'application de fertilisants. Ceci affecte fortement la réponse apparente vis-à-vis de l'azote appliqué. De même, les pertes d'azote dues au lessivage au métabolisme des bactéries, faussent également l'interprétation.

1.2.8.5- Les coefficients de l'utilisation de l'azote

1.2.8.5.1- Le C.A.U et le C.R.U

L'utilisation de l'engrais peut être appréciée par deux coefficients (Limaux, 1999):

➤ Le coefficient apparent d'utilisation (C.A.U.) correspondant au rapport entre le gain d'absorption d'azote lié à l'apport d'engrais et la dose d'engrais. La formule étant :

$$\text{C.A.U. (\%)} = (P_x - P_o / X) \times 100$$

$$\begin{aligned} P_x \text{ (Kg/ha)} &= \text{N absorbé par le peuplement à la dose X} \\ \text{où : } P_o \text{ (Kg/ha)} &= \text{N absorbé par le peuplement en absence d'engrais} \\ X \text{ (Kg/ha)} &= \text{dose d'engrais apporté} \end{aligned}$$

➤ Le coefficient réel d'utilisation (C.R.U.) défini par la proportion de l'azote apporté par l'engrais et retrouvé dans le blé. Cette estimation s'applique aux études utilisant l'azote marqué ¹⁵N. La formule est :

$$\text{C.R.U. (\%)} = (P_x^{15}\text{N} / X) \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{où : } P_x^{15}\text{N (kg/ha)} &= \text{quantité d'azote absorbé provenant de l'engrais } ^{15}\text{N} \\ X \text{ (kg/ha)} &= \text{dose d'engrais azoté } ^{15}\text{N apporté} \end{aligned}$$

Ces deux coefficients varient dans le même sens dans les différentes situations. Cependant, le (C.A.U.) est souvent largement supérieur au (C.R.U.) (Khelil, 2003). Cela signifie que dans l'évaluation du (C.A.U.), la différence entre la quantité d'azote exportée sur la parcelle fertilisée et celle présente dans la parcelle témoin est surestimée, en raison d'une interaction probable entre la fourniture de l'azote par le sol et l'engrais azoté qui y est ajouté. Quelques hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette interaction (Khelil, 2003).

- ✓ Un meilleur développement racinaire des plantes fertilisées qui pourrait mieux explorer le sol.
- ✓ Une minéralisation nette plus grande dans les parcelles fertilisées qui pourrait conduire à une disponibilité plus grande de l'azote pour la plante.
- ✓ La substitution d'une proportion variable de l'azote minérale apporté par l'engrais au pool minéral du sol. Les microorganismes du sol s'alimentent en partie de l'azote minéral apporté et diminuent leur consommation d'azote du sol. L'engrais subirait le processus d'organisation, en échange d'une quantité équivalente d'azote natif. L'apport d'engrais rend donc disponible pour les plantes un peu plus d'azote du sol.

Contrairement au C.R.U., le C.A.U. prend en compte ces effets d'interaction. L'intérêt du C.R.U. utilisant le traceur ^{15}N est surtout permettre de suivre le devenir de l'engrais azoté lorsqu'il n'est pas absorbé par les plantes (organisation microbienne, lessivage, pertes gazeuses).

1.2.8.5.2- Les variations des coefficients d'utilisation de l'azote

Les premiers résultats concernant les variations du coefficient d'utilisation de l'engrais au cours du cycle du blé ont été obtenus dans les années 80 à l'aide du traceur ^{15}N . Recous (1983), observe que le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté est plus élevé pour les apports tardifs (après le début montaison) que pour ceux précoces. Destain, (1997) et Destain et Bodson (2003), ont montré que le (C.R.U.) de l'apport azoté appliqué au stade de redressement s'élève à 60%. Ce pourcentage augmente à 75% pour l'apport azoté appliqué au stade dernière feuille. Plas (1992) obtient des résultats convergents en mesurant le (C.A.U.) qui passe de 70 % en moyenne pour le premier apport effectué fin janvier à 90% pour le second appliqué fin février ou début mars, avant le stade « épi 1 cm ». Ces résultats sont confirmés par Limaux (1994) qui a obtenu un (C.A.U.) de 60 % pour le premier apport et de 90% pour le second.

Les raisons de la différence d'utilisation de l'engrais selon les apports restaient mal connues. Les modèles de lessivage montrent que, dans la grande majorité des cas, l'engrais apporté en «sortie d'hiver» n'est pas entraîné hors de portée des racines, et les microorganismes du sol organisent une partie de l'azote de l'engrais (18 à 32 %). Des travaux menés par Limaux (1994) et Limaux et *al.*, (1998) montrent une relation positive entre le CAU de l'engrais azoté et la vitesse de croissance de la culture au moment de l'apport (un C.A.U. de 80 % serait atteint avec une biomasse de l'ordre de 120 g /m², alors qu'une biomasse de 20 g / m² ne conduirait qu'à un C.A.U. de 40 %).

Toutes les variations de l'utilisation de l'engrais se déroulent dans les 10 – 15 jours qui suivent l'apport d'engrais (Recous et *al.*, 1997). On peut penser que lorsque la vitesse d'absorption est élevée, l'azote de l'engrais reste peu de temps dans le sol, ce qui réduit les risques de pertes. Au contraire, pour des vitesses de croissance faibles, l'engrais reste longtemps dans le sol sans être absorbé par le peuplement, et la concentration de la solution du sol en ammonium ou en nitrates reste plus élevée, ce qui est favorable au déclenchement des phénomènes de lixiviation, d'organisation et de pertes par voies gazeuses (Recous et Machet, 1999). Ainsi, un sol qui est engorgé d'eau pendant quelques jours après un apport azoté, favorise la dénitrification et défavorise la croissance, ce qui peut expliquer des C.A.U. faibles. La volatilisation de l'ammoniac est également une cause de diminution du coefficient d'utilisation de l'engrais (Recous et Machet, 1999). Toutefois, lorsque les peuplements sont denses, ils modifient le microclimat à la surface du sol. Ainsi, la vitesse du vent par exemple se trouve atténuée et par conséquent les pertes d'azote par volatilisation se réduisent.

D'autres mécanismes permettent d'expliquer la réduction des pertes sur les peuplements à forte vitesse de croissance. Une partie de l'ammoniac volatilisé pourrait être récupérée par absorption foliaire, dont l'efficacité pourrait dépendre de la vitesse de croissance.

Sur le plan pratique, l'azote doit être fractionné et apporté à un moment où la culture présente une vitesse de croissance élevée, tout en évitant l'apparition préalable de fortes carences préjudiciables à certaines composantes du rendement (nombre d'épis et de grains).

1.2.9- Effets de la structure et de l'humidité du sol sur l'utilisation de l'azote par le blé

1.2.9.1- Influence de la structure du sol

Meynard et *al.*, (1981) ont mis en évidence deux types de courbes de réponse du rendement (nombre grains / m²) à l'azote apporté (fig. 7) :

- Le type α qui montre que l'objectif de nombre de grains / m² est atteint à la dose X prévue par la méthode du bilan. La prévision est bonne.
- Le type γ qui indique que l'azote est encore facteur limitant à la dose X prévue par la méthode du bilan. Le nombre de grains / m² étant inférieur à l'objectif. L'absorption de l'azote est perturbée par un mauvais état structural du profil; les prélèvements sont faibles (toujours inférieurs à 2,7 kg N / quintal de grains) et la nutrition azotée déficiente. Dans ces conditions de structure compacte, le reliquat d'azote minéral à la récolte est important.

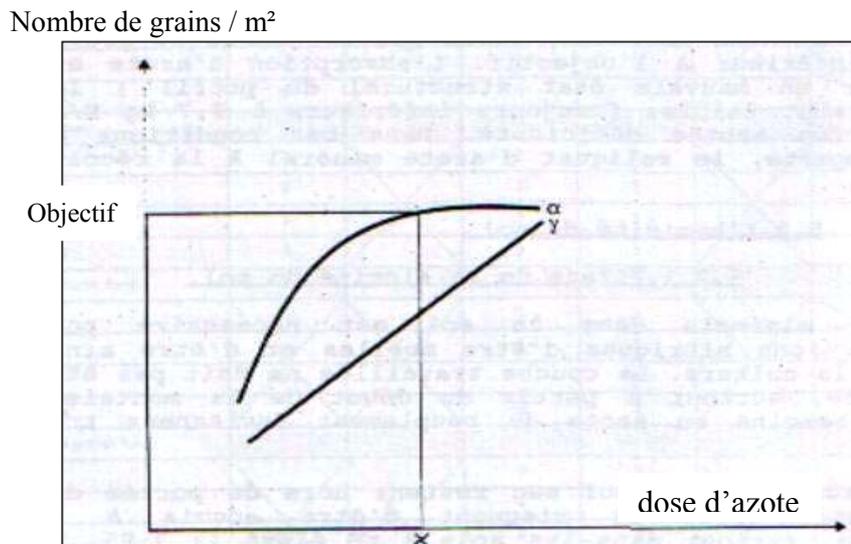


Figure 7 : Allure de la courbe de réponse à l'azote selon l'état structural du sol. (Meynard et *al.*, 1981).
 α = quand la structure est favorable,
 γ = si la structure est défavorable

Il a été établi (Tardieu, 1989) que l'état structural du sol peut agir sur l'utilisation de l'azote par une culture de blé, via la perturbation de son système racinaire par trois mécanismes :

- Un effet direct de la résistance mécanique du sol sur l'intensité de colonisation de la couche labourée par les racines (les zones de faible résistance sont plus colonisées).
- Un effet mécanique indirect des obstacles structuraux sur la localisation des racines (les couches non travaillées sont moins explorées par les racines).
- Un effet sur le fonctionnement du système racinaire. Il s'agit des conséquences de la disposition spatiale des racines au départ du cycle.

A ces effets sur les racines s'ajoute une action sur la microflore ; une structure compactée conduit à une moindre oxygénation du sol et donc à une nitrification plus faible.

Notons que l'état structural de la couche labourée peut être dégradé par le passage des engins agricoles, notamment en conditions plastique du sol. L'effet de cette dégradation de la structure du sol intervient relativement tôt et perturbe à la fois la cinétique d'évolution et de la répartition des racines. Des « ratrapages » peuvent toutefois se produire durant la montaison, selon les conditions de milieu (Tardieu, 1989).

1.2.9.2- Effets de l'humidité du sol et des fortes pluies

Une humidité minimale du sol est nécessaire pour la mobilisation et l'absorption des ions nitriques. La couche travaillée ne doit pas être trop desséchée, surtout à partir du début montaison où les besoins en azote du blé sont importants (Carlotti, 1992).

Les apports réalisés sur sol sec restent hors de portée des racines fonctionnelles et risquent d'être soumis à la volatilisation, surtout dans les sols à pH élevé, supérieur à 7-8 (Carlotti, 1992). Ainsi, la réponse du végétal à l'azote se trouve limitée voir anéantie, non pas

parce que celui-ci est en quantité insuffisante, mais parce que l'azote des engrais ne peut être absorbé.

De même, en condition d'excès d'eau ou de sols tassés, la nutrition azotée est réduite par un enracinement plus limité. Des pertes par dénitrification limitent les quantités d'azote disponible. Dans ces conditions la nitrification est bloquée, car les bactéries qui assurent l'oxydation de l'ammonium en nitrites puis en nitrates sont des aérobies strictes. Dans le même temps, la minéralisation peut se poursuivre, si bien que la quantité d'azote ammoniacal augmente, d'où un accroissement des risques d'intoxication ammoniacale.

L'engorgement du profil, favorise la réorganisation de l'azote, suite au réchauffement tardif du sol qu'il provoque. L'azote est alors encore moins disponible pour les plantes.

Du fait de ces phénomènes et du fonctionnement réduit du système racinaire, il se produit une plus faible absorption de l'azote en conditions d'excès d'eau, reconnaissable par un jaunissement caractéristique de la carence vécue par les plantes.

Les précipitations importantes agissent également sur l'absorption de l'azote par la plante. La lixiviation des nitrates commence à la reprise du drainage, après que la couche de sol a atteint l'humidité à la capacité au champ (H_{cc}). Elle se fait essentiellement par *mass flow* (déplacement des solutés avec l'eau) et dans une moindre mesure par diffusion (déplacement des ions dans un liquide immobile sous l'effet des gradients de concentration) (Carlotti, 1992). La lixiviation est d'autant plus élevée que le stock de nitrates présents dans le sol au début de l'hiver est important, la pluviométrie hivernale est forte et la capacité de rétention en eau est faible (sols superficiels, texture grossière) (Carlotti, 1992).

1.2.10 Conséquences agronomiques d'une carence azotée sur le blé

Limami et Ameziane (1997) rapportent qu'un déficit en azote entraîne dans un premier temps une réduction de la surface foliaire, puis un affaiblissement de la vitesse d'émission des feuilles, lorsque la carence en azote est de longue durée. L'ensemble aboutit à une baisse de l'activité photosynthétique par unité de surface, ce qui se traduit par un freinage de la croissance de la culture.

Pour une culture de blé, la majeure partie de l'azote est absorbée entre la sortie de l'hiver et la floraison (Gembloux, 1990). Cette période coïncide avec à la phase de formation du nombre de grains, composante déterminante du rendement.

Pendant le tallage herbacé, une carence momentanée en azote peut provoquer des sauts de talles et celle persistante conduit à un arrêt anticipé du tallage (Gate, 1995).

Par contre, si la fertilisation azotée est abondante, la régression des talles les plus jeunes ne se fera que lorsque la compétition pour la lumière surviendra. Un tel maintien de nombreuses tiges à la base de la plante a généralement des conséquences néfastes pour la culture (risque de verse, maladies). C'est pourquoi il est utile d'assurer à cette époque une alimentation azotée correcte, mais non excessive (Simon et *al.*, 1989).

Meynard (1985) a observé qu'un apport d'azote important au tallage peut avoir un effet dépressif sur le nombre de grains, lorsque la dose totale est faible. On crée alors, selon le schéma de fertilisation de Coïc (1956) un besoin supplémentaire d'azote pendant la montaison, qui ne peut être satisfait par une dose « montaison » d'autant plus faible que la dose « tallage ».

A partir du stade « épi 1 cm », le rôle de l'azote devient majeur pour la montée en épi des talles herbacées. Les travaux de Masle (1981a, 1981b, 1982) reposant sur des essais en plein champ ou en pots ont mis en évidence que la nutrition azotée agit sur la montée en épi de certaines tiges. Ils montrent précisément que lorsque l'azote devient limitant, ce sont les jeunes talles qui régressent en plus grand nombre (arrêtent leur croissance) et quand elles

montent, leur matière sèche est plus faible. Il existe alors un stade critique par rapport à la montée en épi (Masle, 1981b). Seules les talles ayant au moins trois feuilles montent en cas ou l'azote devient limitant. Ce stade foliaire correspond pour la plupart des talles à l'acquisition d'au moins une racine de 15 à 30 mm (acquisition de leur autonomie nutritionnelle).

Dans la gamme des fumures azotées considérées par cet auteur, les conditions de nutrition en azote affectent la date de réalisation d'un stade de développement. Toutefois, cette conclusion est remise en cause par les travaux de Delécolle et Gurnade (1980), Kirby et *al.*, (1985) et Miglietta (1991) qui en étudiant le phyllochrone montrent qu'il est déterminé précocement et que les facteurs nutritionnels tels que l'azote n'ont pas d'effet.

Une carence azotée diminue le nombre de grains au m². Cette réduction résulte de la baisse soit du nombre d'épis / m², soit de celui de grains / épis ou de la combinaison des deux. Une telle chute de grains dépend de sa date d'apparition au cours du cycle de développement de la culture (Jeuffroy et Bouchard, 1999). Les études menées par Triboï et Ntonga (1993) sous serre sur des plantes monotalles ont montré qu'une carence en azote au début de montaison peut provoquer un abaissement du nombre d'épillets fertiles, notamment ceux situés à la base de l'épi. Ce résultat confirme celui de Darwinkel (1983) qui a observé qu'un apport d'azote à cette période (montaison) augmente de façon significative le nombre d'épillets fertiles (+ 5% en moyenne). De même, un apport tardif (stade méiose) n'améliore pas autant la fertilité de l'épi que celui au stade « épi 1 cm » (Ntonga Mimbé et Lafarge, 1995). Le retard de l'apport de l'azote peut toutefois être valorisé car, selon ces auteurs, il permet d'améliorer le nombre de grains par épis, de plus de 30 % par rapport à un témoin non fertilisé. Cette composante de rendement diminue en cas d'une carence azotée intervenue entre les stades 2 nœuds et gonflement (Demotes-Mainard et Jeuffroy, 1998), ce qui confirme les observations de Coïc et *al.*, (1950) qui montrent qu'un apport tardif de l'azote diminue de façon significative l'avortement des jeunes ovules. Il est même favorable à l'élaboration du poids d'un grain, et donc pourra compenser le nombre faible de grains par m² (Darwinkel, 1983).

L'influence de la date d'apparition d'une carence en azote plus ou moins durable sur la composante nombre de grains / m² est aussi largement prouvée par Jeuffroy (1994) qui établit que :

- Les carences en azote temporaires de 20 jours en début de montaison, ne pénalisent pas le nombre de grains par épis, mais diminuent celui / m² en contraignant la montée en épis.
- Les carences de mi-montaison réduisent le nombre de grains en limitant la croissance de l'épi, suite à la diminution de la taille des organes sources du futur épi (dernière et avant dernière feuille).
- Les carences proches de la floraison ont peu d'effet sur la croissance de l'épi, mais sont capables de provoquer des stérilités (absence de fécondation).

1.3- Optimisation de la fertilisation azotée pour une meilleure qualité du blé dur

La fertilisation azotée raisonnée est définie par COMIFER (1996) comme un ensemble de règles agronomiques pratiquées qui doivent :

- ✓ Etre organisées suivant une logique cohérente du double point de vue de l'agriculteur qui agit et de l'agronome qui conseille.
- ✓ Permettre au chef d'exploitation d'éclairer ses choix en matière d'apports de fertilisants minéraux ou organiques en vue d'atteindre les objectifs quantitatifs et qualitatifs

de production qu'il se fixe, dans le cadre de son système de culture et des potentialités du milieu pédo-climatique dans lequel il agit,

- ✓ Conserver, voire améliorer les caractéristiques écologiques du milieu.

1.3.1- Raisonnement de la fertilisation azotée et calcul de la dose d'engrais

Le fondement du raisonnement de la fertilisation azotée repose sur une idée simple, la couverture des besoins azotés d'une culture de blé doit être satisfaite par l'apport d'engrais en complément de l'offre du sol qui doit donc être correctement estimé.

Plusieurs méthodes reposant sur des concepts différents sont élaborées pour le calcul de la dose totale d'engrais nécessaire à une culture de blé :

✓ Méthode du bilan prévisionnel

Elle consiste à équilibrer les besoins prévisibles des cultures avec les fournitures d'azote quelle que soit leur origine. L'ouverture du bilan se situe en fin d'hiver où le lessivage des ions nitrates est négligeable et sa fermeture a lieu à la récolte. L'équation est sous la forme (Meynard *et al.*, 1996) :

$$\begin{aligned} \text{Etat final} - \text{Etat initial} &= \text{Entrées} - \text{Sorties} \\ R_f - R_i &= (M_n + X) - (P_f - P_i + L) \end{aligned} \quad (1)$$

La dose d'azote à apporter par l'engrais s'obtient alors par :

$$\begin{aligned} X &= \text{Besoins de la culture} - \text{Fourniture du sol} \\ X &= (P_f - P_i) - (M_n + R_i - L - R_f) \end{aligned} \quad (2)$$

Avec (en kg) :

R_f = Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (récolte).

R_i = Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan (fin d'hiver pour les cultures d'hiver).

M_n = Minéralisation nette de l'azote dans le sol = Minéralisation nette de l'azote humifié du sol (M_h) + Minéralisation nette des résidus de récolte (M_r) + Minéralisation nette de l'azote des produits organiques (M_a).

X = Quantité d'azote minéral apporté par l'engrais.

P_f = Quantité d'azote absorbé par la culture jusqu'à la fermeture du bilan.

P_i = Quantité d'azote contenu dans la culture à l'ouverture du bilan.

L = Lessivage d'azote nitrique au-delà de la profondeur « z » considérée comme accessible aux racines de la culture, entre l'ouverture et la fermeture du bilan.

✓ Equation d'efficacité d'utilisation de l'engrais

Mis à part le terme R_i qui est mesuré, le reste de l'équation 1 sont modélisés ou estimés à partir d'abaques basées sur des résultats expérimentaux et validés par région. Cependant, la mesure du paramètre R_i n'est pas toujours possible, en raison par exemple de la structure du sol ou de l'excès d'eau. Alors, une autre équation d'estimation de la dose d'engrais tenant compte de l'utilisation de l'azote a été proposée au début des années 90 (Akkal, 1998).

$$\text{Besoins de la culture} = P_x - P_0 = (\text{C.A.U.}) (X) \quad (3)$$

Avec :

P_x = Quantité totale d'azote absorbé par le peuplement végétal jusqu'à la récolte pour une dose d'engrais X.

P_x = Equivalent au terme P_f de l'équation (1)

P_0 = Quantité totale d'azote absorbé par la culture en l'absence d'apport d'engrais azoté.

CAU = Coefficient apparent d'utilisation de l'engrais

X = Dose d'azote apporté par l'engrais

P_0 et CAU sont estimés à partir de références régionales. Ils dépendent des caractéristiques des sols et du climat, du précédent cultural, de la structure de la couche arable et des dates d'apport d'engrais pour le CAU (Plas, 1992 ; Limaux, 1999).

✓ **Méthode actuelle d'estimation prévisionnelle des besoins en azote du blé**

Les postes P_f de l'équation (1) et P_x de l'équation (3) sont communément appelés « **Besoins en azote** ». Ceux-ci correspondent à la quantité d'azote nécessaire pour atteindre un objectif de production permis par le milieu et l'itinéraire technique. Actuellement, l'estimation des besoins en azote du blé est fondée sur la fixation d'un objectif de rendement.

$$\text{Besoins} = (b) (\text{objectif}) \quad (4)$$

(b) étant quantité d'azote nécessaire pour produire 1 quintal de grains (kg N/q).

Pour le blé dur à 14 % de teneur en protéines, le coefficient b est fixé à **3,5 Kg N/q** de grains (Gate, 1995).

L'estimation de l'objectif de rendement peut se faire dès le semis en fonction des potentialités de la variété et les conditions pédo-climatiques, et être éventuellement révisée au cours du cycle, notamment à la sortie de l'hiver.

1.3.2- Intérêts du fractionnement de l'engrais azoté et de la période d'apport

Une fois le besoin total en azote de la culture estimé, il reste à apporter l'engrais de façon qu'il soit au mieux valorisé par la culture. En d'autres termes, l'azote doit être à la disposition de la plante quand elle en a besoin, minimisant ainsi les pertes par volatilisation ou lessivage. Il est donc recommandé de fournir une quarantaine d'unités au stade épi 1cm où la phase de croissance active n'a pas encore commencé et de réaliser des apports plus importants entre les stades deux nœuds et dernière feuille, période pendant laquelle les besoins en azote de la culture sont accrus (Vocanson, 2002). De plus, toutes les feuilles du blé ne concourent pas avec la même efficacité au remplissage des grains. La sénescence débute de la base de la plante et gagne progressivement le haut. Des « remontées » d'azote de feuille en feuille ont été observées dès mi-montaison, ce qui consomme de l'énergie et peut être économisée par un fractionnement des apports. Dans ce cas, le statut azoté des dernières feuilles est privilégié et donc assure une capacité de transfert de l'azote vers les grains de façon plus efficace (Laurent, 2001).

Depuis les années 90, en plus des rendements, la qualité du grain est devenue le maître mot de la filière blé dur. La teneur en protéines des grains est le premier critère de qualité

(teneur recherchée = 14 % selon Girard, 1997). Cette dernière facilement mesurable à la récolte a une forte incidence sur d'autres facteurs de qualité, comme le taux de mitadinage, l'indice de jaune et la moucheture. Il est donc important pour les céréaliers d'essayer de l'optimiser. Cela est possible par la réalisation d'un troisième apport tardif d'engrais azoté à la floraison (Vocanson, 2002). En effet, environ 20 % de l'azote contenu dans les grains peut avoir été absorbé après floraison (Vocanson, 2002). Si la culture a reçu trop d'azote par des apports précoces, sa capacité maximale d'absorption de cet élément est atteinte et alors les prélèvements post-floraison seront freinés. Il résulte une relation négative entre teneur en protéines des grains et le rendement. Les variétés à fort potentiel de rendement ont de faibles potentialités de teneur en protéines (Laurent, 2001).

Le principal obstacle pratique à un troisième apport d'azote à floraison serait d'ordre climatique et environnemental. Pour que l'apport soit efficace il faut que l'azote fourni puisse être dissous et accessible aux racines. Ceci suppose donc une humidité du sol suffisante et une pluviométrie minimum de 15 mm les 10 jours suivants l'apport (Garel, 2001). Les risques seraient de ce fait la non valorisation de cet apport et donc l'augmentation de la teneur en azote du reliquat après récolte.

L'enjeu est donc d'optimiser la dose totale d'engrais et son fractionnement (date et dose) afin d'avoir de forts taux de protéines sans nuire au rendement.

II. MATERIEL ET METHODES

2.1- LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES PEDOCLIMATIQUES DU SITE EXPERIMENTAL

L'expérimentation s'est déroulée sur une parcelle non cultivée ces cinq dernières campagnes (ancien verger arboricole arraché), appartenant à la Station Régionale de Protection des Végétaux (S.R.P.V) de Ain-Touta. Cette station est située sur la route nationale n° 03 reliant Batna à Biskra, à 7 km au nord de l'agglomération de Ain-Touta et à 27 km au sud du chef lieu de la wilaya de Batna. Elle se trouve à une altitude de 909 m.

Les analyses physico-chimiques effectuées à 3 niveaux de profondeur (annexe A4) indiquent qu'en moyenne le sol de la parcelle d'essai présente une texture fine de type argilo-limoneux (argile + limons fins = 78 %), calcaire (calcaire total = 31 %, calcaire actif = 19 %). C'est un sol alcalin (pH = 8,3), pauvre en matière organique (0,6 %), en azote total (0.12 %) et en phosphore assimilable (0.03 ppm). Sa capacité d'échange cationique est moyenne (CEC = 26.42 meq / 100 g sol). Son niveau de salinité n'est pas contraignant (C.E = 0,46 mmhos/cm).

Sur le plan climatique, 430 mm de précipitation ont été enregistrés sur le site expérimental durant la campagne 2003-2004 (Annexe A3). Cependant, la quantité d'eau concernant le cycle de la culture pratiquée n'est que de 244 mm (du 27/12/ 2003 au 07/ 07/ 2004). Pour la culture tardive du blé réalisée, c'est une année peu arrosée, marquée par une sécheresse contraignante pour l'assimilation de l'azote.

Les températures relatives à la période de l'essai (janvier- Juin) sont relativement basses (moy. Mini = 5 °C, moy. Max = 18 °C, Annexe A3).

Cependant, il est à noter que ni les températures supérieures à 25 °C coïncidant avec la récolte susceptibles d'engendrer des accidents physiologiques sur la culture du blé (échaudage), ni celles minimales négatives (-5°C) redoutées pour leur action destructrice sur les plantules après levée (Gate, 1995) n'ont provoqué de dégâts visibles.

De part son niveau bas en azote, le site expérimental est favorable pour l'essai de fertilisation azotée. Néanmoins la pratique d'une irrigation complémentaire est nécessaire, notamment aux moments des apports des différentes fractions d'azote.

2.2- MATERIEL VEGETAL

La variété de blé dur expérimentée est Waha. Elle a été choisie comme modèle d'ajustement de la fertilisation azotée en raison de sa culture répondeuse, sa tolérance au froid pour notre région d'étude et sa paille courte permet de supporter de fortes doses d'azote sans verser. Elle a été sélectionnée par l'Institut Technique des Grandes Cultures (I.T.G.C. du Khroub).

2.3- METHODES

2.3.1-Techniques culturales et conduite de la culture

Avant le semis, un labour profond suivi par deux passages croisés au cover crop ont été réalisés en octobre. La fumure de fond apportée est composée de superphosphate 46 % et de sulfate de potassium 50 %.

En raison du sol humide impraticable et des gelées en novembre et décembre, le semis n'a pu être réalisé que le 27 / 12 / 2003. Les graines (avec une faculté germinative de 97.5%) sont mises en terre manuellement en lignes espacées de 20 cm. La densité de semis étant de 50 grains / mètre linéaire, soient 250 grains /m². La semence utilisée a été traitée au préalable contre les charançons par l'organisme fournisseur (ITGC Khroub).

Plusieurs opérations de désherbage manuel ont été réalisées au cours du développement de la culture, de manière à limiter au maximum l'effet des adventices.

Sur le plan phytosanitaire, la faible pluviométrie en cours notamment de la montaison a limité l'installation d'agents pathogènes, exception faite de quelques pieds affectés tardivement par la fusariose de la floraison à la maturité.

Pour protéger la récolte contre les moineaux, des filets en tulle ont été installés sur les parcelles destinées à la récolte de grains.

La récolte de grains a été effectuée manuellement au début de juillet en évitant les lignes de bordures des parcelles, soit 0,6 m² / parcelle élémentaire.

Une culture de blé bien irrigué consomme 500 mm d'eau par an, soit 5000 m³ / ha / an. Les apports naturels (précipitations) peuvent concourir à raison de 50 à 75% (250 à 350 mm), le reste doit être apporté sous forme d'irrigation quand cela est possible (Benseddik, 2000).

Un déficit hydrique apparu au cours du cycle biologique de notre culture (244 mm de pluviométrie) nous a contraint à effectuer plusieurs apports d'eaux. Le premier au cours du tallage qui est selon Benseddik, 2000, le premier stade critique vis-à-vis des besoins en eau. Un deuxième apport pendant le stade gonflement, qui est aussi un stade critique selon le même auteur. Les trois autres apports sont effectués pendant le mois de Juin (coincide avec la formation et le remplissage du grain) à un intervalle de 7 jours pour chaque apport. Les quantités d'eau apportées sont ajustées à 51.2 mm par apport. Ainsi le cycle de la culture reçoit un total de 244 mm (pluviométrie) + 256 mm (5 apports de 51.2 mm) = 500 mm d'eau / cycle (Benseddik, 2000).

2.3.2- Apport et fractionnement de l'engrais azoté

2.3.2.1- Estimation des besoins totaux en azote de la culture

L'engrais azoté utilisé est l'ammonitrate granulé 33,5 %. Ce type d'engrais à action rapide présente l'avantage de combiner les propriétés de l'azote nitrique et ammoniacal. Les besoins de la culture ont été estimés sur la base du rendement de 30 quintaux / ha attendus, accessibles en culture bien conduite (irrigation complémentaire, apport d'engrais, désherbage) dans la région selon les services agricoles de la wilaya de Batna (communication personnelle). Sachant d'une part que pour produire un quintal de blé, il faut 3,5 Kg d'azote (Gate, 1995) et que le reliquat restant en fin de cycle est évalué à 10 % des besoins dans des conditions proches de celle de la présente étude (PNTTA, 1999), on déduit que la dose totale en azote nécessaire à la culture pratiquée est de :

$$\text{Besoins en N} = (30 \times 3,5) + (30 \times 3,5) \times 10 \% = 115,5 (\approx 120) \text{ unités / ha,} \\ \text{correspondant à 3,50 quintaux d'engrais azoté / ha.}$$

2.3.2.2- Modalités de fractionnement des besoins et stades d'apport

Un total de 8 modalités principales représentant 22 variantes d'apport des besoins totaux en azote de la culture sont testées. Un témoin sans azote accompagne ces modèles de fertilisation.

Les modalités principales sont établies sur la base du nombre de fractionnements de la dose totale d'engrais (apport en 1 ou 2 ou 3 fois) et de la répartition des proportions dans chaque type de fractionnement (1, 1:1, 3:1, 1:3, 2:1, 1:2, 2:1:1 ou 1:1:1). Les variantes tiennent compte en plus du nombre de fractionnement et du type de proportion, de l'importance de la quantité appliquée (100 %, 3/4, 2/3, 1/2, 1/3, 1/4 ou 0) à chaque stade végétatif (début tallage, épi-1cm et 2 nœuds).

Les principales modalités et leurs variantes sont reportées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Principales modalités d'apport de l'azote et leurs variantes testées

Nombre de fractionnements de la dose totale	Principales modalités (symbole)	Variantes (Proportions des besoins totaux apportés par stade)			
		symbole	Début tallage	Epi-1cm	2-nœuds
Aucun apport	Témoin (T)	T	0	0	0
Apport en une seule fois	100 % (A)	A1	100	0	0
		A2	0	100	0
		A3	0	0	100
Apport en 2 fois	1/2:1/2 (B)	B1	1/2	1/2	0
		B2	0	1/2	1/2
		B3	1/2	0	1/2
	3/4:1/4 (C)	C1	3/4	1/4	0
		C2	0	3/4	1/4
		C3	3/4	0	1/4
	1/4:3/4 (D)	D1	1/4	3/4	0
		D2	0	1/4	3/4
		D3	1/4	3/4	75
	2/3:1/3 (E)	E1	2/3	1/3	0
		E2	0	2/3	1/3
		E3	2/3	0	1/3
	1/3:2/3 (F)	F1	1/3	2/3	0
		F2	0	1/3	2/3
		F3	1/3	0	2/3
Apport en 3 fois	1/2:1/4:1/4 (G)	G1	1/2	1/4	1/4
		G2	1/4	1/2	1/4
		G3	1/4	1/4	1/2
	1/3:1/3:1/3 (H)	H	1/3	1/3	1/3

Le choix des stades végétatifs fertilisés (début tallage, épi-1cm et 2 nœuds) sont retenus sur la base des connaissances acquises sur leur sensibilité à la fertilisation azotée et leur intérêt dans l'élaboration des composantes de rendement. En effet, un apport d'azote au stade « début tallage » agit sur la biomasse formée et donc sur le futur peuplement épis (Jeuffroy et Bouchard, 1999). De même, une carence en azote au cours du stade Epi-1cm (début montaison) réduit la fertilité des épillets (Masle, 1980). Par ailleurs, une baisse du nombre grains / épis est observée lorsque la fertilisation azotée est carencée entre 200 et 400

degrés-jours avant la floraison, correspondant aux stades 2-nœuds - gonflement (Demotes-Mainard et Jeuffroy, 1998)

2.3.3- Dispositif expérimental

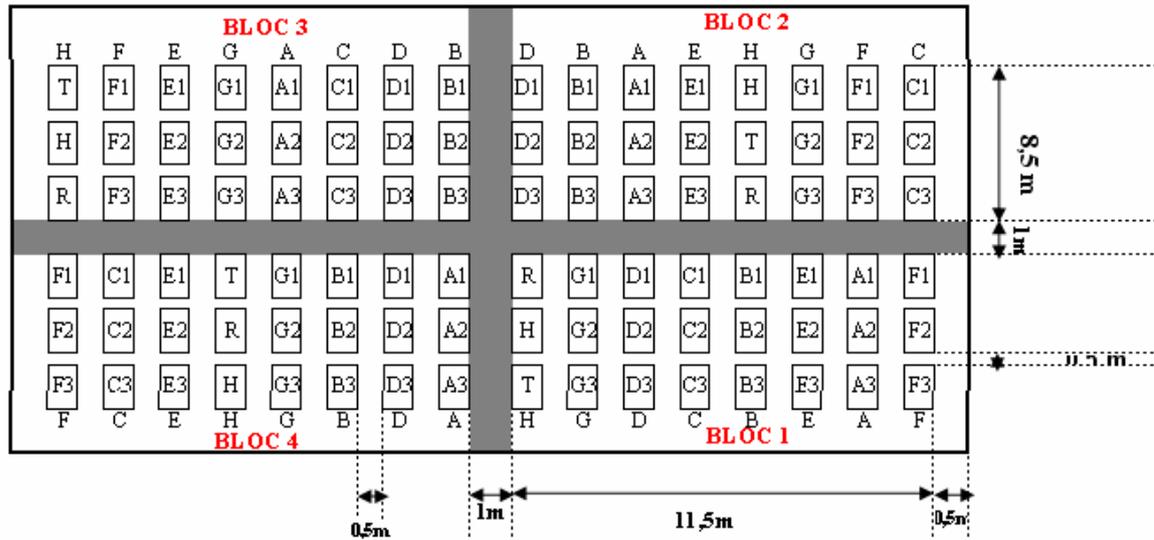
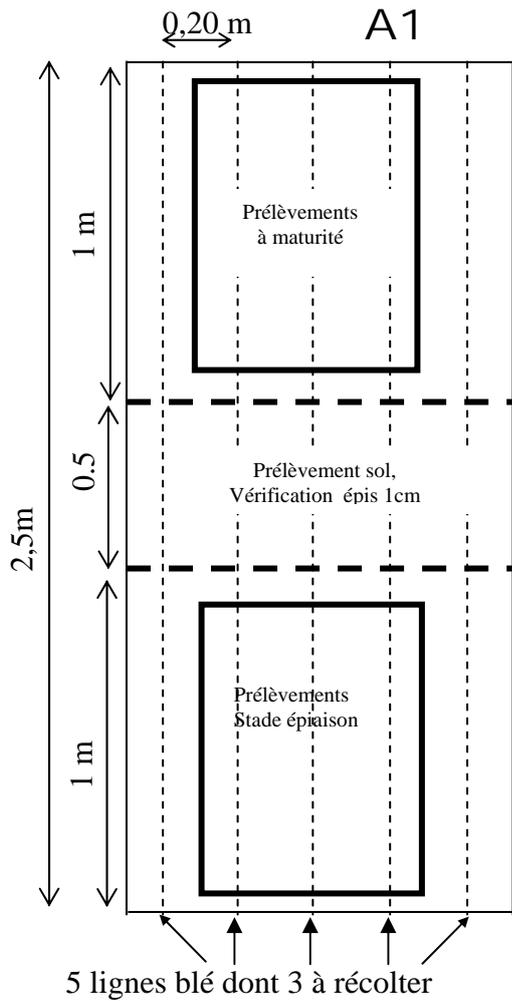


Fig. 7a : Dispositif global (split-plot, 4 blocs)



Fig. 7b : Vue de quelques parcelles élémentaires (Stade : 10 jours après l'épi 1 cm)



Légende (Tableau 1)

(% d'azote)

Début tallage : Epi 1 cm : 2Nœuds

T = 0	:	0	:	0
A1 = 100	:	0	:	0
A1 = 0	:	100	:	0
A1 = 0	:	0	:	100
B1 = 50	:	50	:	0
B1 = 0	:	50	:	50
B1 = 50	:	0	:	50
C1 = 3/4	:	1/4	:	0
C1 = 0	:	3/4	:	1/4
C1 = 3/4	:	0	:	1/4
D1 = 1/4	:	3/4	:	0
D1 = 0	:	1/4	:	3/4
D1 = 1/4	:	0	:	3/4
E1 = 2/3	:	1/3	:	0
E1 = 0	:	2/3	:	1/3
E1 = 2/3	:	0	:	1/3
F1 = 1/3	:	0	:	2/3
F1 = 0	:	1/3	:	2/3
F1 = 1/3	:	0	:	2/3
G1 = 1/2	:	1/4	:	1/4
G1 = 1/4	:	1/2	:	1/4
G1 = 1/4	:	1/4	:	1/2
H = 1/3	:	1/3	:	1/3

R = remplissage + vérification épis 1cm

A,B,...T/H = modalités d'apport d'N

Fig. 7c : Détail d'une parcelle élémentaire affectée à une variante (cas A1)



Fig. 7d : Parcelle élémentaire au stade Epi 1 cm



Fig. 7 e : Parcelle élémentaire au stade 2 noeuds

Le dispositif expérimental adopté est très proche du Split-plot (fig. 7a). Les 8 modalités testées sont réparties aléatoirement dans chacun des 4 blocs de répétition (sous blocs). Les 3 variantes de chaque modalité sont disposées également au hasard à l'intérieur de chaque sous bloc (parcelles élémentaire). Pour des raisons pratiques, le témoin et la modalité H, tous deux à une variante sont disposés dans un même sous bloc (T/H).

L'utilisation d'un tel dispositif avec parcelles divisées se justifie par le souhait d'obtention des informations plus précises sur l'effet des modalités de fractionnement de la fertilisation azotée (Dagnelie, 1984).

Chaque parcelle élémentaire de 2.5 m² est divisée en 3 parties. Deux de même dimension égale (1 m²) sont réservées pour les prélèvements (épiaison et récolte). La troisième, intermédiaire (0,5 m²) est destinée pour l'échantillonnage de sol et la vérification du stade épi-1cm (fig.7c).

Les figures 7a, 7c et 7d illustrent les détails relatifs aux dimensions des différentes unités et sous unités composant le dispositif.

2.3.4- Prélèvement de plantes

A fin de pouvoir comparer les effets de l'ensemble des modalités d'apport d'azote, les prélèvements ont été effectués lorsque toutes les parcelles élémentaires ont reçu la totalité de la dose. Ainsi, deux types de prélèvements sont réalisés. Le premier au stade épiaison et le second correspond au stade maturité (récolte).

Pour chaque prélèvement, seules les 3 lignes centrales de plantes (0,6 m²) sont arrachées (stade épiaison) ou coupées à ras du sol à l'aide d'un sécateur (stade récolte). Les deux lignes latérales de chaque parcelle élémentaire ne sont pas récoltées pour éviter l'effet de bordure (fig.7c).

Les échantillons destinés aux analyses chimiques (matière sèche et teneur en azote) sont débarrassés de la terre avec un jet d'eau et leurs racines éliminées quand c'est nécessaire (stade épiaison).

2.3.5-Paramètres mesurés

2.3.5.1- Biomasse sèche aérienne

La production de matière sèche produite par une parcelle de 0,6 m² au stade épiaison est évaluée après passage de l'échantillon à l'étuve réglée à 80 °C pendant 48 heures (ICARDA, 1996).

2.3.5.2- Teneur en azote

Les teneurs en azote de la biomasse aérienne et du grain sont mesurées par la méthode de KJELDHAL.

2.3.5.3- Teneur en protéines du grain

La teneur en protéines du grain récolté est calculée par la formule:

$$\text{Protéines (\%)} = \text{Teneur en N du grain} \times 5,7 \text{ (JEUFFROY, 2001).}$$

2.3.5.4- Composantes de rendements

2.3.5.4.1- Nombre d'épis / m² et par plant

Dans chaque sous parcelle destinée à la récolte (0,6 m²), le nombre d'épis est compté, puis ramené au m².

La production d'épis par plant est déduite par calcul, en faisant le rapport entre le nombre épis /m² sur nombre de plants / m² déterminé au stade épiaison.

2.3.5.4.2- Nombre de grains / m² et par épi

Les épis de chaque parcelle récoltée sont battus individuellement, puis le nombre de grains est reporté au m². La quantité de grains par épi est déduite par calcul (nombre total de grains par m² / nombre d'épis / m²).

2.3.5.4.3- Poids de 1000 grains

Après la récolte et le battage, les impuretés et les grains cassés sont éliminés, puis 3 échantillons de 1000 grains chacun provenant de la même parcelle sont pesés séparément. Le PMG de chaque parcelle récoltée est la moyenne des trois pesées.

2.3.5.5- Rendement en grains et en paille /m²

Les rendements en grains considérés sont ceux réellement obtenus dans les parcelles.

La biomasse totale produite par une sous parcelle est soigneusement pesée, juste après le fauchage des plantes entières (paragraphe: 2.3.4). Après le battage, les grains obtenus sont pesés et leur quantité est reportée au m².

Le rendement en « paille » est déduit par calcul. Il représente la différence entre la biomasse totale et le poids de grains produit par l'unité de surface.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'appréciation d'une fumure azotée du blé est basée sur l'étude des relations entre la quantité d'azote exportée et la croissance exprimée par l'augmentation de la biomasse récoltable (grains et paille) d'une part et l'élaboration des composantes du rendement d'autre part. Les résultats détaillés sont portés en annexe A5.

3.1- Effets des modalités de fractionnement, de leurs variantes d'apport et des proportions d'azote appliquées sur la production de biomasse épiaison et maturité.

3.1.1- Résultats

3.1.1.1-Avantage de la fertilisation azotée

Un apport de 115 unités d'azote / ha, toutes modalités confondues, a amélioré significativement la production de matière sèche aérienne aussi bien au stade épiaison qu'à la maturité (tableau 2). Au stade épiaison, elle passe de 28,95 qx / ha dans la parcelle témoin à 43,32 qx / ha dans la culture ayant reçu une fumure azotée, soit une augmentation moyenne de 49,64% (tableau 3). A la maturité, le rendement en paille a augmenté de 31,66 % (30,04 qx MS / ha dans la parcelle témoin, à 39,55 qx/ha dans la culture avec un apport d'azote).

3.1.1.2-Influence du nombre de fractionnements des besoins azotés

La fertilisation azotée est significativement profitable à la production de biomasse aérienne du blé, lorsqu'elle est répartie en 2 ou en 3 apports aux différents stades. Un seul apport à un stade ou à un autre permet une production de biomasse sèche moyenne de 31,08 qx / ha au stade épiaison et de 33,56 qx /ha de paille à la maturité (tableau 2). Les parcelles conduites avec une fertilisation fractionnée en 2 et en 3 fois produisent en moyenne 45,25 qx MS / ha à l'épiaison et 40,49 qx MS / ha à la maturité

En comparaison avec un apport unique, les fractionnements en 2 et en 3 conduisent à une amélioration du rendement biomasse aérienne de 45,59 % à l'épiaison (épi compris) et de 20,65 % à la maturité (épi non compris).

La fig.8 illustre la relation entre l'augmentation de la production de matière sèche épiaison et de la paille avec le nombre du nombre de répartition de la fertilisation azotée. Elle montre que, tant au stade épiaison qu'à la maturité, le taux d'augmentation de la biomasse sèche lié à l'azote est corrélé positivement et significativement au nombre de répartitions des besoins en azote de la culture, les coefficients de corrélation sont: ($R_{\text{épiaison}} = 0,97$, $R_{\text{paille}} = 0,96$, $R_{(\text{seuil } 0,05)} = 0,95$). Plus la fertilisation azotée est fractionnée, mieux elle est exploitée par la plante au cours de son développement.

Il est à noter que bien que les gains de rendement biomasse enregistrés aux deux périodes de prélèvement évoluent dans le même sens. Cependant, le facteur fractionnement contribue plus à l'amélioration de la production au stade épiaison qu'à la maturité. En effet, les équations de régression (fig.8) indiquent qu'une augmentation d'une unité du nombre de répartitions des besoins en azote de la culture, se traduit par une amélioration du rendement de 53,88 % à l'épiaison et seulement de 27,59 % à la maturité (paille). En fait, cela reste valable pour tous les apports d'azote fractionnés (Les taux d'augmentation sont plus élevés à l'épiaison, tableau 3).

Tableau 2: Valeurs moyennes de la production de matière végétale aux stades épiaison et maturité en fonction des modalités de fractionnement et des stades d'apport des besoins en azote de la culture (qx /ha). Test de Newman et Keuls au seuil de 5 % (1)

Modalité d'apport des besoins en azote	Nombre d'apport	Stade d'apport (2)	Formule de fertilisation			Biomasse sèche végétative (qx /ha)										
			symbole	Proportion apportée / stade (2)		A l'épiaison (épi compris)				A la maturité (paille)						
				DT:	E1:	2 N										
Sans apport (témoin)	0	-	T	0:	0:	0	28,95	28,95 ^d	-	28,95 ^b	30,04	30,04 ^d	-	30,04 ^b		
Avec apport d'azote	Non fractionné	1	DT	A1	1:	0:	0	30,84	31,08	31,08 ^c	31,08 ^b	32,33	33,56	33,56 ^c	33,56 ^b	
			E1	A2	0:	1:	0	30,11				34,50				
			2 N	A3	0:	0:	1	32,30				33,86				
	Fractionné	2	Début tallage et 2 noeuds	C3	3:	0:	1	37,19 ^a	36,82 ^c	40,70 ^b	43,32 ^a	36,72 ^a	36,07 ^c	37,74 ^b	40,49 ^a	39,55 ^a
				E3	2:	0:	1	38,19 ^{ab}				35,54 ^a				
				B3	1:	0:	1	35,89 ^b				36,09 ^a				
				F3	1:	0:	2	36,50 ^b				35,55 ^a				
				D3	1:	0:	3	36,36 ^b				36,44 ^a				
			Epi 1cm et 2 noeuds	C2	0:	3:	1	40,30	39,82 ^b	40,70 ^b	43,32 ^a	37,44 ^a	37,01 ^b	37,74 ^b	40,49 ^a	39,55 ^a
				E2	0:	2:	1	39,84				36,92 ^a				
				B2	0:	1:	1	40,38				37,34 ^a				
				F2	0:	1:	2	39,43				36,32 ^a				
		Début Tallage et épi 1cm	D2	0:	1:	3	39,14	45,48 ^a	40,70 ^b	43,32 ^a	37,04 ^a	40,15 ^a	37,74 ^b	40,49 ^a	39,55 ^a	
			C1	3:	1:	0	39,99 ^c				38,08 ^b					
			E1	2:	1:	0	40,14 ^c				37,81 ^b					
			B1	1:	1:	0	49,43 ^b				41,98 ^a					
			F1	1:	2:	0	48,14 ^a				41,77 ^a					
		3	Début tal., épi 1cm et 2 noeuds	D1	1:	3:	0	49,69 ^a	62,29 ^a	40,70 ^b	43,32 ^a	41,12 ^a	40,15 ^a	37,74 ^b	40,49 ^a	39,55 ^a
				G1	2:	1:	1	55,52 ^c				44,51 ^c				
				G2	1:	2:	1	74,33 ^c				63,71 ^a				
				G3	1:	1:	2	56,45 ^b				45,46 ^c				
	H			1:	1:	1	62,87 ^a	49,58 ^b								

(1) Les valeurs moyennes de chaque colonne ne portant pas la même lettre en exposant sont significativement différentes au seuil de 5 %. (2) DT= début tallage, E1= épi-1cm, 2N = 2 noeuds

Tableau 3: Augmentation du rendement biomasse sèche aérienne au stade épiaison (Epiais.) et maturité (paille) en fonction des différentes modalités de fractionnement des besoins en azote de la culture

Modalité de répartition des besoins azotés		Toutes répartitions confondus		Apport en une seule fois		Répartition en 2 fois		Répartition en 3 fois		Répartition en 2 et 3 fois réunies	
		Epiais.	Paille	Epiais.	Paille	Epiais.	Paille	Epiais.	Paille	Epiais.	Paille
Augmentation de la biomasse sèche aérienne	% témoin	49.63	31.66	7.39	11.72	40.60	25.64	115.16	66.90	56.30	34.80
	% apport en 1 seule fois	-	-	-	-	30.95	12.45	100.4	51.40	45.59	20.65
	% apport en 2 fois	-	-	-	-	-	-	53.04	36.43	-	-

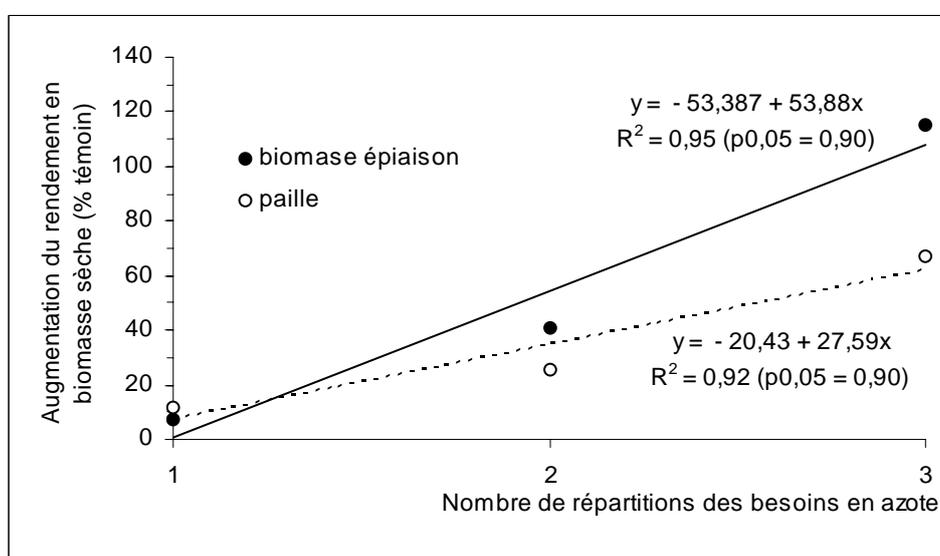


Fig.8 : Variation du taux d'augmentation du rendement en biomasse sèche aérienne épiaison et en paille (y) en fonction du nombre de répartitions des besoins azotés de la culture (x). Equations de régression linéaire.

Une fertilisation azotée répartie en 3 apports est beaucoup plus productive (62,29 qx MS totale / ha à l'épiaison et 50,81 qx paille / ha à la maturité) que celle réalisée en 2 apports (40,70 qx MS totale / ha à l'épiaison et 37,74 qx paille / ha à la maturité) et non fractionnée (31,08 qx MS totale / ha à l'épiaison et 33,56 qx paille / ha à la maturité) (tableau 2). Aux deux stades de prélèvement effectué, la biomasse produite avec 3 apports est significativement > 2 apports > 1 apport > témoin.

Au stade épiaison, une fertilisation azotée répartie en 3 apports produit en moyenne 53,04 % de plus que celle réalisée en 2 apports, 100,4 % de mieux qu'un apport unique et 115,16 % que le témoin non fertilisé. Au même stade, les modalités à 2 apports sont plus avantageuses que celles à un apport (gain de 30,95 % de biomasse aérienne totale, (tableau 3 et fig.9).

A la maturité, la supériorité de l'efficacité des formules à 3 apports sur le reste des modalités se maintient. Elles permettent une augmentation de 66,90 % du témoin, 51,40 % de

la fertilisation non fractionnée et 36,43 % de la modalité à 2 apports (tableau 3 et fig.9). Les formules à deux apports sont en moyenne meilleures que celles à un apport de 12,45 %.

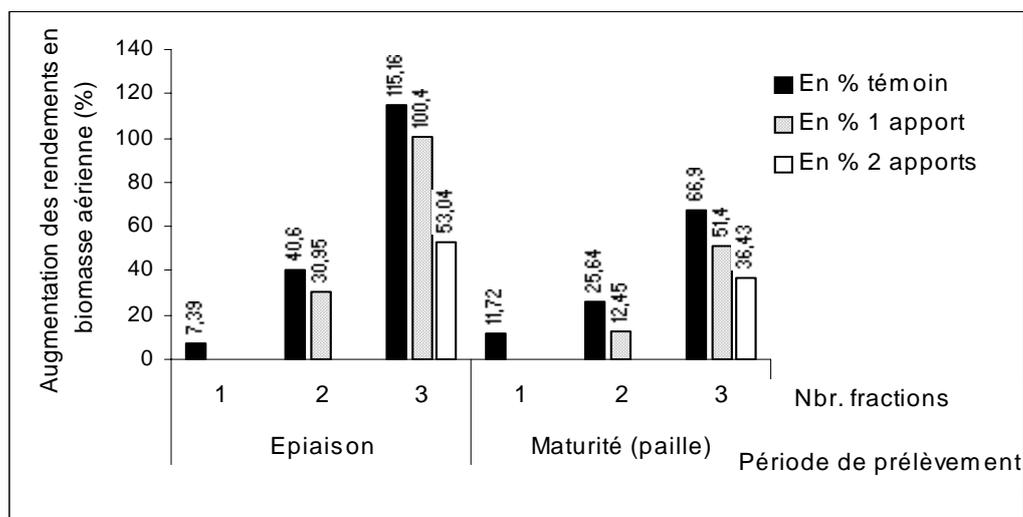


Fig.9 : Comparaison des augmentations du rendement biomasse induites par les différentes modalités de fractionnements au stade épiaison et maturité

3.1.1.3- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à deux fractions.

Les variantes de la modalité à deux fractions produisent 36,82, 39,82 et 45,48 qx/ha à l'épiaison et 36,07, 37,01 et 40,15 qx /ha à la maturité, lorsque les apports sont effectués respectivement au début tallage et 2 Nœuds, Epis 1 cm et 2 Nœuds et début tallage et Epis 1 cm. Les apports au début tallage et à l'épi 1cm (formules C1, E1, B1, F1 et D1, tableau 2) sont plus productifs que ceux appliqués à l'épis 1 cm et 2 nœuds (C2, E2, B2, F2 et D2) ou début tallage et 2 nœuds (C3, E3, B3, F3 et D3). Ces variantes engendrent en moyenne une amélioration du rendement biomasse de 57,1 % à l'épiaison et 33,7 % du témoin à la maturité (fig.10). Aux mêmes périodes de prélèvement, les deux autres n'apportent que 27,2 à 37,5 % de plus que le témoin à l'épiaison et 20,1 à 23,2 % à la maturité. En d'autres termes, la répartition de la fertilisation azotée entre le début tallage et l'épi 1cm enrichie le rendement biomasse du blé de 19,6 à 29,9 % à l'épiaison et 10,5 à 13,6 % de plus que le reste des combinaisons à 2 apports.

Par ailleurs, les variantes à deux apports, dont l'un est effectué au stade épis 1 cm (formules C1, E1, B1, F1 et D1 et C2, E2, B2, F2 et D2) induisent une production biomasse moyenne plus élevée que leurs variantes sans apport d'azote à l'épi 1cm (formules C3, E3, B3, F3 et D3 (tableau 2 et fig.10).

On déduit de ces résultats que les apports d'azote au stade épis 1 cm sont déterminants pour la production de la biomasse aérienne. Ceux au stade début tallage favorisent aussi la biomasse aérienne, mais leur contribution est moins forte que celle des apports à l'épi 1cm, notamment lorsque leurs proportions sont supérieures à 50 % des besoins. La fig.11 montre qu'en moyenne, les proportions d'azote allant de 1/4 à 3/4 des besoins (28,75 à 86,2 unités /ha) appliquées au stade début tallage tendent à faire baisser l'effet azote (gain par rapport au témoin) sur la biomasse que si elles sont réalisées au stade épi 1cm.

On retient que la meilleure variante de la modalité à 2 fractions qui produit plus de biomasse aérienne aussi bien à l'épiaison qu'à la maturité est celle dont les apports sont pratiqués, l'un au stade début tallage avec une proportion de 1 / 4 à 1 / 2 des besoins et l'autre à l'épi 1cm avec 1 / 2 à 3/4 de la fumure azotée totale (formule D1). Lorsqu'on envisage d'adopter une fertilisation azotée en 2 fractions, l'apport au stade 2 nœuds est peu efficace pour la biomasse aérienne.

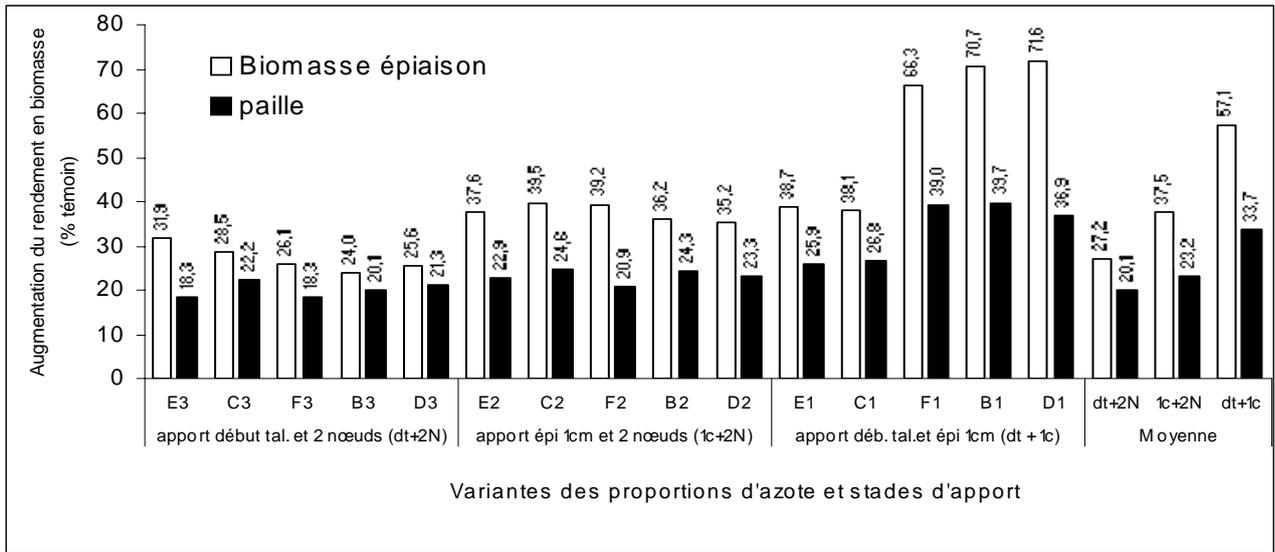


Fig.10 : Comparaison des augmentations du rendement en biomasse épiaison et maturité (% témoin) des différentes variantes d'apport d'azote d'une fertilisation à 2 fractions

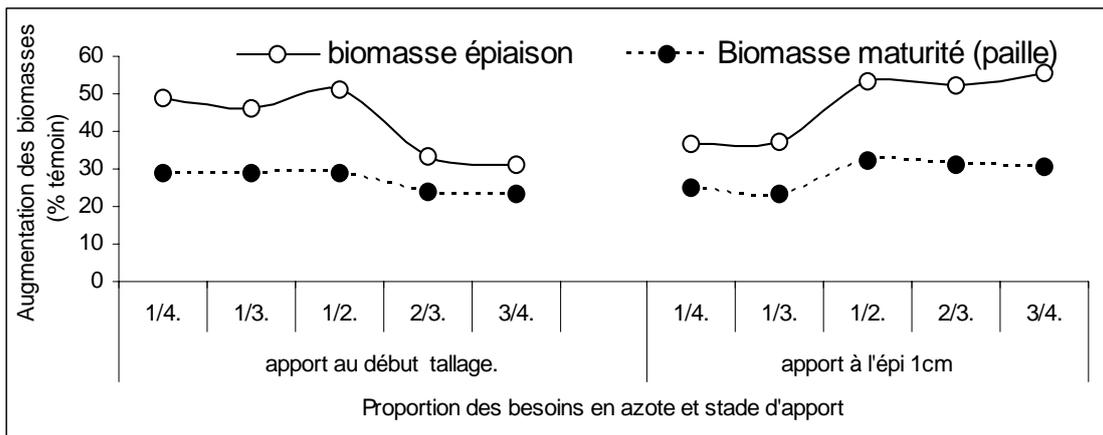


Fig.11 : Comparaison des augmentations de la biomasse épiaison et maturité (% témoin) en fonction des différentes proportions d'apport d'azote au début tallage et épi 1cm.

3.1.1.4- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à trois fractions.

Nous avons montré que la modalité à 3 fractions produit en moyenne plus de biomasse que celles à un ou 2 apports. En fait, son efficacité dépend comme pour celle à 2 fractions, des proportions d'azote appliquées et des stades de leur apport.

Dans la modalité à 3 fractions, les coefficients de corrélation entre la proportion d'azote injectée aux différents stades et les augmentations des rendements biomasse qu'elles induisent ne sont positifs et significatifs qu'au stade épi 1cm (tableau 4). Cela signifie que la variation de la biomasse (ou des augmentations liées à l'azote) dépend étroitement des quantités d'azote apportées à l'épi 1cm. L'option G2 qui affecte 50 % des besoins en azote de la culture (57,5 unités / ha) au stade épi 1cm est la plus optimale de toutes les combinaisons testées. Son utilisation permet de multiplier la production de biomasse / ha par 2,6 à l'épiaison et 2,1 à la maturité (74,33 qx /ha à l'épiaison et 63,71 qx /ha à la maturité, par rapport à 28,95 qx /ha et 30,04 qx /ha pour le témoin, tableau 2). En comparaison avec le témoin sans fumure azotée, la formule G2 assure une biomasse végétative de 156,75 % à l'épiaison et 112,08 % à la récolte.

Si la fumure azotée devait être répartie en 3 apports, les proportions de plus de 25 % des besoins de la culture appliquées au début tallage ou au stade 2 nœuds sont relativement moins efficaces. Dans nos conditions expérimentales, elles tendent même à baisser les gains liés à l'azote (Tableau 4 et fig.12 b et c).

Le rôle décisif de la proportion d'azote apportée au stade épi 1cm est illustré par la courbe de régression linéaire (fig.12 a). Cette dernière indique que la fraction d'azote épi 1cm explique significativement la variation des augmentations de rendement par rapport au témoin des différentes variantes à 3 fractions ($R^2 = 99,6 \% > p_{0.01} = 91,9 \%$). Plus précisément, une augmentation d'un pour cent (1,15 unités / ha) de la proportion de la fumure azotée appliquée à l'épi 1cm contribue à améliorer le rendement biomasse aérienne d'environ 2,5 % à l'épiaison et à la récolte.

Tableau 4 : Corrélations entre les proportions d'azote affectées aux différents stades et l'augmentation de la production de biomasse épiaison et maturité (paille).

Apport au début tallage		Apport à l'épi 1cm		Apport à 2 nœuds	
Biomasse épiaison	Paille	Biomasse épiaison	Paille	Biomasse épiaison	Paille
-0,537	-0,535	<u>0,998</u> **	<u>0,995</u> **	-0,461	-0,460

** corrélations significatives au seuil de 1%

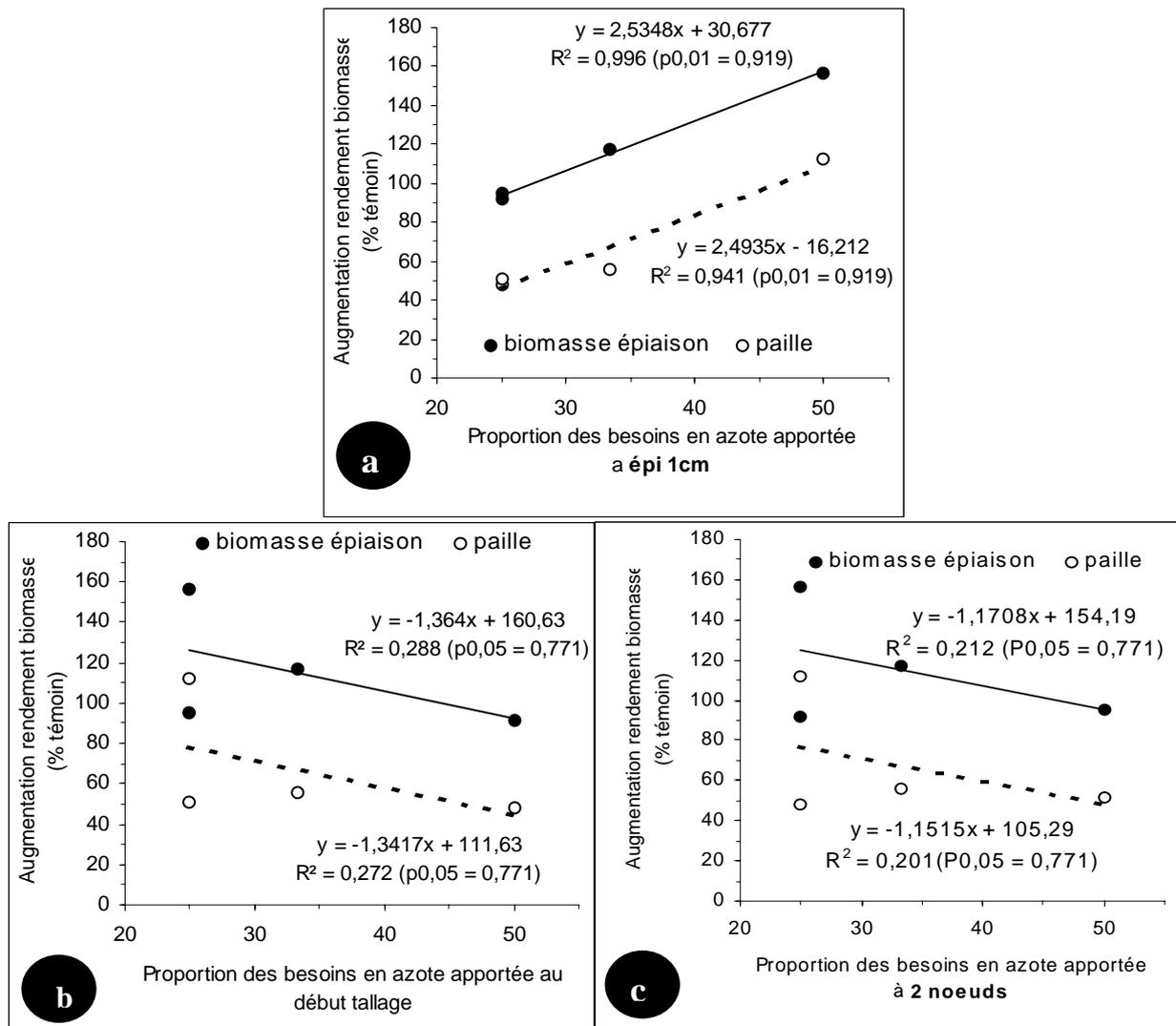


Fig. 12 a, b et c : Relation entre les proportions de la fumure azotée apportées au stade début tallage (b), 2 noeuds (c) et épi 1cm (a) et les augmentations (% témoin) de la biomasse épiaison et maturité. Equations de régression.

3.1.2- Discussions

La biomasse sèche résulte de la conversion du rayonnement lors des processus de la photosynthèse. L'ensemble des activités liées à cette dernière est influencé par l'élément 'azote'. Ainsi, une carence en azote se traduit par une diminution de la biomasse en affectant les phénomènes de conversion du rayonnement, et en particulier la mise en place de la surface foliaire / m² qui elle même dépend de nombreux paramètres tels le nombre de plantes / m², de talles / plantes, de feuilles / par talle, de la surface de chaque feuille (Bélanger et *al.*, 1992; Plénet, 1995), ainsi que du processus de sénescence des feuilles (Olesen et *al.*, 2002).

L'effet positif de la fumure azotée sur la biomasse sèche aérienne au stade épiaison (+49,64 %) et récolte (+31,66 %) mis en évidence dans la présente étude confirme le rôle bien connu de l'azote dans l'amélioration de la production de matière sèche chez le blé.

Encore récemment, les travaux de Villegas et *al.*, (2001) portant sur l'accumulation de la biomasse / plant et l'élongation du maître-brin en relation avec le déficit en azote chez 25 cultivars de blé dur, y compris Waha, ont montré qu'il existe une corrélation positive entre

l'absence de stress azoté et la formation d'une masse végétale / plant importante. Ces résultats sont confirmés par d'autres études, comme celle de Sieling et *al.*, (2005) relative à la croissance et au rendement du blé d'hiver soumis à une série de traitements azotés ou de Sieling et *al.*, (2006) qui traite l'effet de l'azote sur la croissance du colza, du blé et de l'orge en Allemagne, en montrant que le support de la production en grains (biomasse végétative) dépendait étroitement de la nutrition azotée.

L'importance de la conversion du rayonnement en biomasse varie avec les stades phénologiques de la culture (Girard, 1997). Chaque stade a ses propres besoins en azote; ce qui suggère un fractionnement de la fertilisation azotée. Nos résultats prouvent qu'une répartition des besoins en azote de la culture en 2 et surtout en 3 apports améliore sensiblement la production de matière sèche aérienne par rapport à un apport unique. Les résultats sont encore meilleurs quand les proportions des apports sont bien ajustées aux différents stades. Ces résultats sont en accord avec les observations de Ehdaie et Waines (2001) déduites de la comparaison des effets de la variation des dates de semis et de la fertilisation azotée sur la production de matière sèche chez cinq génotypes de blé dur. Nos conclusions vont également dans le même sens que celles de Delogu et *al.*, (1998) qui ont étudié l'efficacité de l'utilisation de l'azote par le blé et l'orge d'hiver.

Le rôle déterminant des apports au stade épi 1cm mis en évidence dans les modalités fractionnées signifie que les besoins en azote du blé sont plus marqués à cette période, comme cela a été rapporté par Corbeels et *al.*, (1998). L'intérêt de mettre à la disposition de la plante une quantité suffisante au stade épi 1cm s'explique par le fait qu'au cours de la période montaison qui débute au stade épi 1cm et prend fin à l'épiaison (avant la floraison), la croissance des jeunes organes nécessite une forte consommation d'azote servant pour une plus grande surface foliaire interceptant plus de lumière (Lemaire et Gastal, 1997; Demotes-Mainard et Jeuffroy, 2004). L'apport d'azote à l'épi 1cm améliore la production de matière sèche aérienne en diminuant également le taux de régression des talles herbacées (Rinaldi, 2004).

L'apport d'azote au stade début tallage, secondé par celui à l'épi 1cm favorisent la biomasse aérienne via l'augmentation du nombre de tiges herbacées qui montent en épi (Rinaldi, 2004)

3.2- Variations du rendement en grains et de ses composantes en fonction des modalités de fractionnement, de leurs variantes d'apport et des proportions d'azote appliquées.

Dans la mesure où la production de blé vise à optimiser le rendement en grains, la matière sèche produite par une culture ne peut être l'unique critère utilisé pour juger l'impact final d'un type de nutrition azotée (Meynard et Sebillotte, 1994). Il est impératif de s'intéresser également à analyser l'impact des différentes formules de fertilisation azotée sur le rendement grains lui-même et à ses composantes.

3.2.1-Analyse des résultats

3.2.1.1- Composantes de rendement grain

3.2.1.1.1- Influence de la fertilisation azotée

Les tableaux 5 et 6 montrent qu'une fumure azotée (115 unités / ha), toutes formules d'apport réunies, se traduit par une amélioration importante de l'ensemble des composantes

RESULTATS ET DISCUSSIONS

de rendement prises en compte (épi / pied, grains / épi et PMG). Cependant, les augmentations induites par l'azote varient d'une composante à l'autre. Le nombre de grains / épi est de loin le plus stimulé avec 46,37 %, contre 11,56 et 13,41 % pour respectivement le PMG et le nombre d'épis / pied (tableau 6).

Tableau 5 : Valeurs moyennes des composantes de rendement grain en fonction des différentes modalités et variantes de fertilisation azotée. Test de Newman et Keuls au seuil de 5 % ⁽¹⁾

Modalités	Sans apport	Avec apport d'azote																							
		Non fractionné.			Fractionné																				
Nombres d'apport	0	1			2										3										
Stades d'apport ⁽²⁾	-	DT	E1c	2N	Début tallage : 2N					Epi 1cm : 2N					Début tallage : épi 1cm					DT : E1c : 2N					
Symbole de la variante	T	A1	A2	A3	E3	C3	F3	B3	D3	E2	B2	C2	F2	D2	E1	C1	F1	B1	D1	G1	G3	H	G2		
Proportions N / stade	0	1	1	1	2:1	3:1	1:2	1:1	1:3	2:1	1:1	3:1	1:2	1:3	2:1	3:1	1:2	1:1	1:3	2:1:1	1:1:2	1:1:1	1:2:1		
Nombre d'épis / plant																									
moyennes (épis / plant)		1.62	1.71	1.52	1.62 a	1.62 a	1.56 b	1.56 b	1.56 b	1.71 a	1.72 a	1.71 a	1.62 b	1.62 b	1.70 b	1.72 b	1.99 a	2.00 a	2.02 a	1.72 b	1.70 b	1.76 b	2.17 a		
					1.58 c					1.68 b					1.89 a										
	1.52 d	1.62 c			1.72 b																	1.83 a			
	-	1.62 b			1.74 a																				
	1.52 b	1.72 a																							
Nombre de grains / épi																									
moyennes (grains / épi)		18.0	17.7	27.2	22.5 b	22.7 b	27.5 a	26.7 a	28.2 a	22.2 b	27.0 a	22.0 b	28.7 a	29.2 a	20.5 a	20.0 a	20.7 a	21.0 a	21.2 a	20.7 b	27.2 a	22.0 b	20.7 b		
					25.5 a					25.8 a					20.7 b										
	16.0 d	21.3 c			24.0 a																	22.7 b			
	-	21.3 b			23.7 a																				
	16.0 b	23.4 a																							
Poids de mille grains (PMG)																									
moyennes (g)		45.0 a	45.5 a	43.6 a	45.4 b	45.8 b	41.0 c	41.0 c	40.6 c	45.2 b	45.6 b	45.3 b	41.6 c	41.4 c	48.4 a	47.5 a	48.2 a	48.3 a	48.7 a	49.8 a	45.0 b	48.9 a	50.0 a		
					42.7 c					43.8 b					48.2 a										
	40.8 c	44.7 b			44.9 b																	48.4 a			
	-	44.7 a			45.7 a																				
	40.8b	45.5 a																							

(1) = Les valeurs moyennes de chaque ligne non suivies par une même lettre minuscule sont significativement différentes au seuil de 5 %.

(2) DT= début tallage, E1c = épi-1cm, 2N = 2 nœuds.

Tableau 6 : Augmentation des composantes de rendement grain en fonction des différentes modalités de fractionnement des besoins en azote de la culture

Modalité de répartition des besoins azotés	Composantes du rendement	Augmentation		
		% témoin	% apport en 1 seule fois	% apport en 2 fois
Toutes répartitions confondues (effet azote)	Epi / pied	13.41	-	-
	Grains / épi	46.37	-	-
	PMG	11.56	-	-
Apport en une seule fois	Epi / pied	6.36	-	-
	Grains / épi	33.32	-	-
	PMG	9.58	-	-
Répartition en 2 fois	Epi / pied	12.84	6.17	-
	Grains / épi	50.20	12.66	-
	PMG	10.08	0.47	-
Répartition en 3 fois	Epi / pied	20.39	12.96	6.39
	Grains / épi	41.79	6.37	-5.58
	PMG	18.63	8.25	7.74
Répartition en 2 et 3 fois (Effet fractionnement)	Epi / pied	14.53	7.41	-
	Grains / épi	48.43	11.34	-
	PMG	11.88	2.10	-

3.2.1.1.2- Influence du fractionnement de la fumure azotée

Globalement, le fractionnement de la fertilisation azotée améliore relativement plus la production de biomasse aérienne que les composantes du rendement grain. La liaison entre le nombre de répartitions de la fumure azotée et l’augmentation des composantes de rendement par rapport au témoin est moins significative, notamment pour le nombre de grains / épi, les coefficients de corrélation sont: ($R_{Epi/pied} = 0,999$, $R_{grains/épi} = 0,50$, $R_{PMG} = 0,89$, $P_{0,05} = 0,95$).

Cette relation est illustrée par les équation de régression linéaires (fig.13) qui montrent que les écarts entre les différentes modalités d’apport d’azote pour le nombre d’épis /pied et le PMG est due en grande partie au nombre de répartitions des besoins totaux en azote de la culture ($R^2 = 99,9\%$ pour le nombre d’épis/pied et $79,0\%$ pour le PMG).

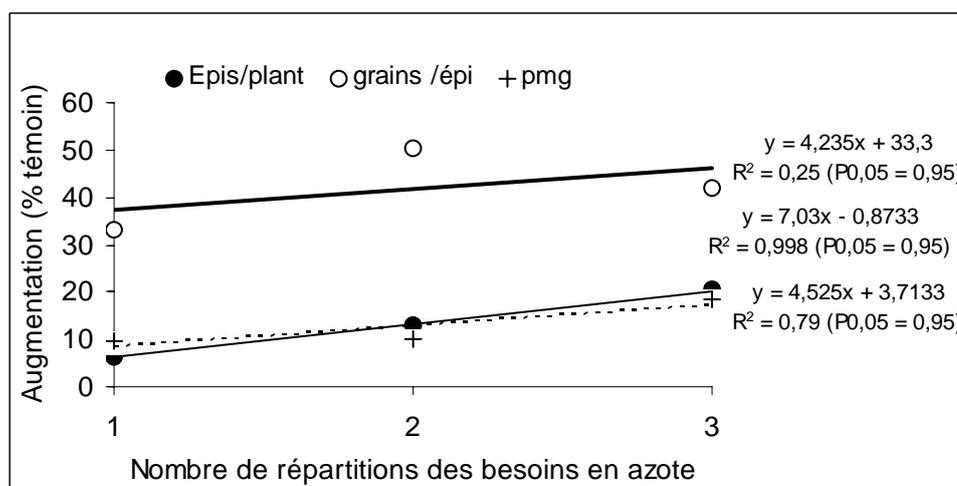


Fig.13: Variations du taux d’augmentation des composantes de rendement grain (y) en fonction du nombre de répartitions des besoins azotés de la culture (x). Equations de régression linéaire.

En comparaison avec une fertilisation réalisée en une seule fois, celles réparties en 2 et en 3 fois réunies favorisent significativement la production d'épis / pied et de grains / épi. Ces deux composantes passent dans l'ordre, de 1,62 à 1,74 épis / pied et de 21,3 à 23,7 grains / épi (tableau 5). L'impact positif du fractionnement de la fertilisation azotée est plus fort pour le nombre de grains / épi (11,34 %) que pour le nombre d'épis / pied (7,41 %). Les modalités fractionnées rapportent en moyenne 48,43 % de grains / épi et 14,53 % d'épis / pied de plus que le témoin sans apport d'azote (tableau 6 et fig.14)

En revanche, le fractionnement des besoins en azote améliore beaucoup moins le poids du grain. Le PMG engendré par les fumures fractionnées est en moyenne juste 2,10 % plus élevé que celui produit par l'apport non fractionné (45,7 g contre 44,7 g). Ce faible effet fractionnement est davantage lié à la modalité à 3 apports qu'à celle à 2 apports. Le tableau 5 indique en effet, que les fumures azotées en 2 fractions produisent en moyenne un grain moins lourd (PMG de 44.9 g) que celui en 3 fractions (PMG = 48,40 g), peu différent de celui de la modalité non fractionnée (PMG = 44,7 g). Ainsi, les formules à 3 fractions améliorent le PMG de 8,25 % par rapport à la fumure non fractionnée et de 18,63 % par rapport au témoin. Celles à 2 fractions ne donnent que 0,47 % de mieux qu'un apport unique et 10,08 % de plus que le témoin (tableau 6, fig.14).

L'avantage d'une fumure à 3 fractions toutes variantes confondues, sur celle à 1 ou à 2 apports est encore plus marqué lorsqu'on considère le nombre d'épis / pied. En comparaison avec un apport unique, elle favorise 2 fois plus le tallage épi / pied (12,96 %) que la fumure à 2 fractions (6,17 %, tableau 6 et fig.14).

Par contre, la répartition de l'azote en 3 fractions diminue significativement le nombre de grains / épis par rapport à celle à 2 fractions (-5,58 %, tableau 6, fig.14). Le nombre de grains / épi étant de 22,7 pour la modalité à 3 apports et 24 pour celle à 2 fractions (Tableau 5).

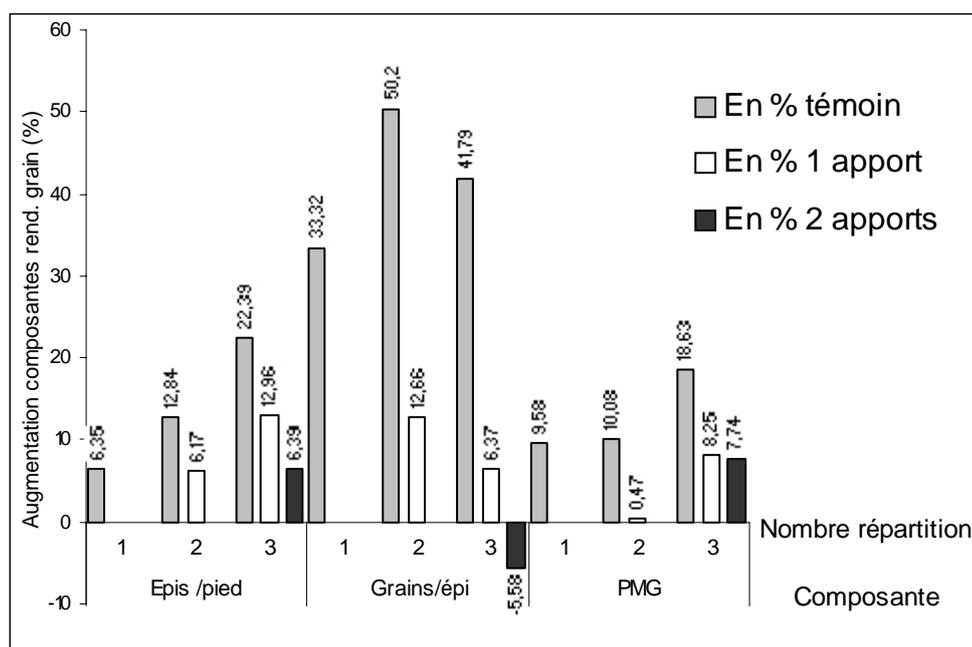


Fig.14: Comparaison des augmentations des composantes du rendement grain dues aux différentes modalités de fractionnement de la fumure azotée.

3.1.1.3- Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à deux fractions.

En général, l'efficacité des modalités à 1, 2 ou 3 apports dépend d'une part de la proportion des besoins en azote apportée et d'autre part des stades d'application.

Pour les fumures à 2 fractions, celles dont une partie des besoins est apportée au début tallage et l'autre à l'épi 1cm (Formules E1, C1, F1, B1 et D1, tableau 5) favorisent significativement plus le tallage épi / pied (24,07 % de plus que le témoin) et le poids du grain (18,11 % de mieux que le témoin) que les autres combinaisons de stades d'apport qui ne produisent en moyenne que 4,20 à 10,25 % de plus que le témoin pour le nombre de talles épis / pied et 4,75 à 7.37 % pour le PMG (fig.15). Les valeurs de ces deux composantes sont encore plus élevées lorsque la proportion d'engrais azoté apportée au stade épi 1cm est forte, de 1/3 à 3/4 des besoins de la culture (fig.15 et tableau 5). Ainsi, les variantes de la modalité à 2 apports les plus optimales sont F1, B1 et surtout D1. Elles produisent 30,92 à 32,89 % de talles épis / pied et 18,01 à 19,23 % de PMG de mieux que le témoin (fig.15). En comparaison avec la moyenne du reste des variantes de la modalité à 2 fractions, ces 3 formules réunies sont 4 fois plus efficaces pour le tallage épi et 2,3 fois pour le PMG.

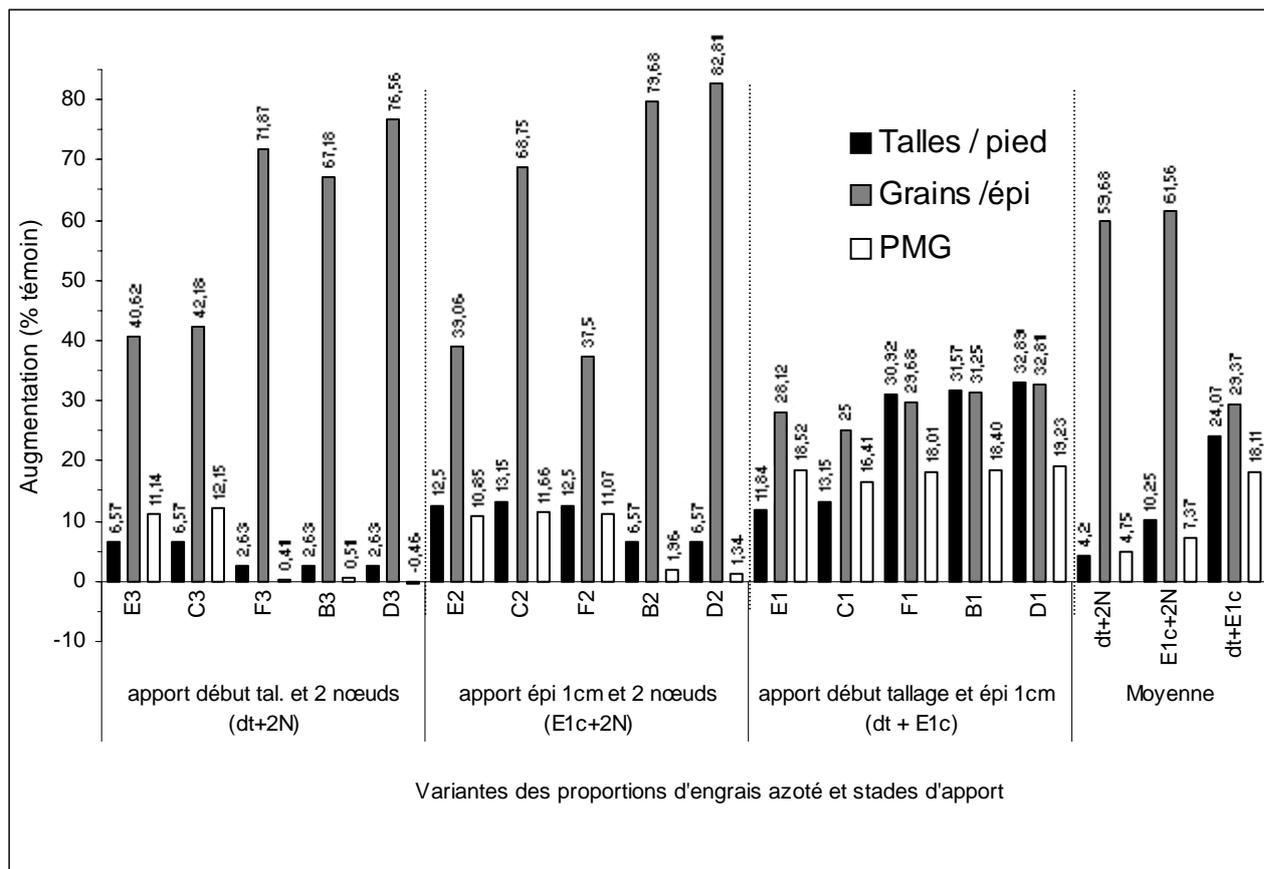


Fig.15 : Comparaison des augmentations des composantes de rendement grain (% témoin) des différentes variantes et stades d'apport d'azote de la modalité à 2 fractions

En revanche, les apports d'azote au stade début tallage et à l'épi 1cm augmentent moins le nombre de grains / épi par rapport au témoin que les autres combinaisons de stades d'apport.

Ce sont plutôt les apports au début tallage et 2 nœuds (formules E3, C3, F3, B3, et D3) et ceux à l'épi 1cm et 2 nœuds (formules E2, B2, C2, F2 et D2) qui sont plus bénéfiques à la fertilité épi. Ils contribuent à améliorer le nombre de grains de 59,68 et 61,56 % par rapport au témoin, contre 29,37 % pour les apports de début tallage et épi 1cm, soit un écart de 30.31 à 32.19 % (tableau 5 et fig.15). Par ailleurs, leur efficacité est plus renforcée quand la proportion d'engrais apportée au stade 2 nœuds est de 1/3 à 3/4 (formules F3, B3 et D3 ; B2, F2 et D2, tableau 5 et fig.15). On déduit donc que l'intérêt d'un apport d'une partie des besoins en azote au stade 2 nœuds n'est pas négligeable pour le rendement grain.

La fig.16 représente les augmentations moyennes des composantes de rendement liées à chacune des proportions d'engrais apportées au stade début tallage, épi 1cm et 2 nœuds, pris séparément. Elle clarifie mieux le rôle de l'augmentation de la fraction et le stade d'apport de l'azote sur la variation de l'efficacité de l'engrais azoté. Elle montre bien que le tallage épi augmente avec la proportion d'engrais azoté apportée au stade épi 1cm. La fertilité (grains / épi) s'améliore avec le renforcement des apports au stade 2 nœuds. Le grain prend plus de poids à mesure que la proportion d'azote apportée au stade épi 1cm ou début tallage grandie. La fig.16 montre aussi que ce sont surtout les proportions supérieures à 50 % des besoins (1/2 à 3/4) qui, selon le stade d'apport, favorisent ou pénalisent plus les composantes de rendement.

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que des apports croissants d'engrais au stade début tallage, indépendamment des doses affectées aux 2 autres stades, se traduisent par une production de plants peu productifs, suite la régression de leur tallage épi qui s'accompagne par une baisse de la fertilité épi. Leurs grains peu nombreux se remplissent alors mieux.

La pratique de la même fertilisation au stade épi 1cm ou 2 nœuds s'expriment différemment. Dans le premier cas, le tallage épi qu'elle favorise se répercute négativement sur la fertilité de l'épi qui donne par la suite plus de chance au grain de se charger. Dans le second cas, une fertilisation renforcée au stade 2 nœuds réduit aussi la charge en talles épis du plant, mais n'affecte nullement sa fertilité épi, qui bien au contraire s'améliore encore plus. A ce stade, l'augmentation de la proportion des besoins en azote produit plus de grains qui entrent alors en compétition et restent légers.

Cette analyse montre finalement que la fertilisation azotée à deux fractions, quelque soit la combinaison des proportions et des 2 stades d'apport, ne peut améliorer simultanément avec la même ampleur, l'ensembles des 3 composantes de rendement. Il est donc utile de chercher une autre modalité de fractionnement permettant un meilleur ajustement de la répartition et de la période d'apport de la fumure azotée.

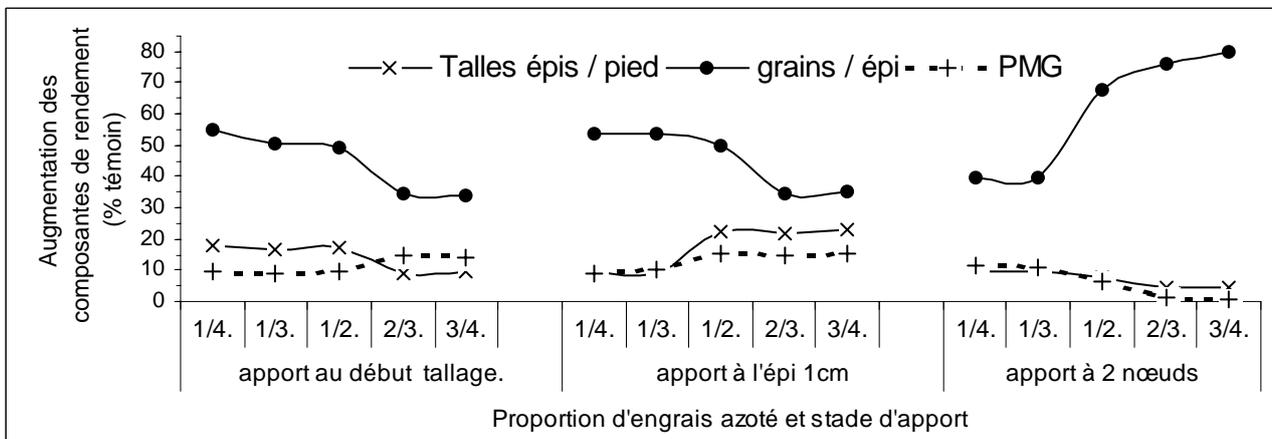


Fig.16 : Comparaison des augmentations moyennes (% témoin) des composantes de rendement grain en fonction des proportions et stades d'apport d'azote dans la modalité à 2 fractions

3.2.1.1.4 : Influence de la proportion et des stades d'apport d'azote de la modalité à 3 fractions.

Comme pour les variantes de proportion et de stade d'apport de la modalité à 2 fractions, celles de l'option à 3 fractions agissent différemment sur les paramètres de rendement grain.

Nous avons montré plus haut que globalement la modalité à 3 fractions, toutes combinaisons de proportions et de stades de fertilisation comprises, est préférable à celle en 2 ou en 1 apport. Il reste à définir laquelle de ses 4 variantes étudiées valorise le mieux les composantes de rendement grain.

Il ressort de la confrontation « doses d'azote - taux d'amélioration des composantes » que, comme pour la modalité à 2 fractions, ici encore le tallage épi, le poids du grain et la fertilité épi dépendent étroitement de la dose d'engrais apportée aux différents stades de la culture.

Plus précisément, c'est l'importance de la part des besoins en azote apportée au stade épi 1cm et 2 nœuds qui détermine la composante de rendement à améliorer en priorité par la plante.

Ainsi, l'apport de 50 % des besoins au stade épi 1cm favorise plus le tallage épi que la fertilité épi (42,76 %, contre seulement 29,68 %, fig.17). La même fraction appliquée au stade 2 nœuds donne plutôt davantage de grains, 70.31 %.

Il est à remarquer qu'un apport massif de 50 % des besoins au stade 2 nœuds est moins justifié pour le poids du grain, puisqu'une fraction moins élevée de 25 % (formule G1 et G2, tableau 5) appliquée au même stade peut aboutir à un taux d'amélioration du PMG meilleur (22,23 %, contre 10,34 % pour la dose 1/2, fig.17).

Les formules G2 et G3 qui assurent l'une et l'autre cet apport de 50 % des besoins respectivement au stade épi 1cm et 2 nœuds sont celles qui optimisent le mieux la fertilisation azotée en 3 fractions. La première produit le plus fort tallage de 2,17 talles / épi et un grain de 50,00 mg (tableau 5). La seconde se caractérise par des plants de meilleure fertilité (27,25 grains / épi).

Ces deux combinaisons de la modalité à 3 fractions assurent des gains par rapport au témoin de 42,76 % (0,65 talle / plant) pour le tallage épi (G2) et 70,31 % (11,25 grains /épi) de grains en plus (G3, tableau 5 et fig.17)

Le choix définitif entre la formule G2 et G3 dépend de la contribution relative des différentes composantes dans l'amélioration du rendement grains.

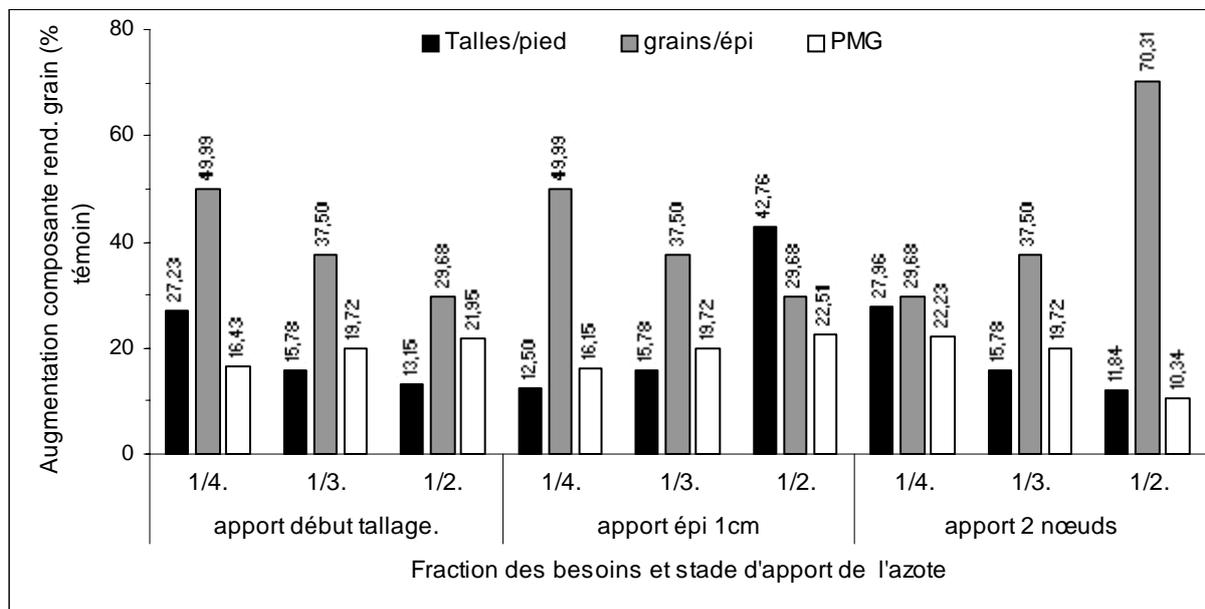


Fig.17 : Comparaison des augmentations moyennes (% témoin) des composantes de rendement grain en fonction des proportions et stades d'apport d'azote dans la modalité à 3 fractions.

3.2.1.2- Rendement en grains

3.2.1.2.1- Analyse des valeurs moyennes

Les rendements moyens en grains obtenus et les taux d'augmentation liés à la fertilisation azotée fractionnée et groupée sont indiqués dans le tableau 7.

L'apport de l'azote, toutes modalités confondues a permis d'obtenir une production moyenne de 30,27 qx de grains / ha, sensiblement égale aux prévisions établies (30 qx /ha). L'amélioration liée à l'engrais azoté est de 8,07qx /ha, soit 36,34 % (tableau 7).

Cependant, les 3 modalités de répartition des besoins azotés expriment de grands écarts dans leur efficacité.

La fumure groupée est moins efficace que celle fractionnée. Le gain qu'elle rapporte est inférieur de 27,22 % à celui de la fertilisation répartie en 2 et 3 fois réunies (40.05 % de gain pour les fertilisations fractionnées, contre 12,83% pour celle en un seul apport). En fait, le rendement grain du blé augmente progressivement avec le nombre de répartitions des besoins azotés. Il passe de 22,20 qx /ha en absence de l'azote à 25,05 qx/ha pour un apport unique, 29,32 qx /ha pour 2 apports et à 37,75 qx /ha pour 3 apports (tableau 7, et fig.18). Ces résultats correspondent dans l'ordre à des augmentations par rapport au témoin de 12,83, 32,06 et 70,03 % (Fig.18).

Par ailleurs, même si la fertilisation est fractionnée, la proportion d'engrais et le stade d'apport influencent significativement la valorisation de l'azote par la plante. Ainsi, les différentes variantes de la modalité à 2 et à 3 fractions ne donnent pas le même rendement grain. La meilleure formule qui assure plus de production de grains est donc celle dont les apports sont suffisamment bien équilibrés entre les différents stades végétatifs.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le tableau 7 montre pour la modalité à 2 fractions, que ce sont les variantes dont les apports au début tallage faibles de 1/4 à 1/2, combinés avec ceux plus forts de 1/2 à 3/4 du stade épi 1cm qui sont les plus efficaces (Formules F1, B1 et D1, tableau 7).

L'engrais azoté est encore plus rentable avec un troisième apport au stade 2 nœuds, possible avec la modalité à 3 fractions.

Tableau 7 : Valeurs moyennes (qx /ha) et des augmentations (% témoin) du rendement grain en fonction des différentes modalités et variantes de fertilisation azotée. Test de Newman et Keuls au seuil de 5 % ⁽¹⁾

Modalités	Sans apport	Avec apport d'azote																					
		Non fractionné			Fractionné																		
Nombre d'apports	0	1			2									3									
Stades d'apport ⁽²⁾	-	DT	E1c	2N	Début tallage : 2N					Epi 1cm : 2N				Début tallage : épi 1cm				DT : E1c : 2N					
Symboles de variantes	T	A1	A2	A3	E3	C3	F3	B3	D3	E2	B2	C2	F2	D2	E1	C1	F1	B1	D1	G1	G3	H	G2
Proportions par stade	0	1	1	1	2:1	3:1	1:2	1:1	1:3	2:1	1:1	3:1	1:2	1:3	2:1	3:1	1:2	1:1	1:3	2:1:1	1:1:2	1:1:1	1:2:1
Moyennes (qx / ha)		24.5	25.9	24.8	28.0 a	28.7 b	29.1 ab	28.4 a	29.0 a	29.4 a	29.5 a	28.4 b	29.1 b	29.3 a	27.4 b	28.0 b	31.1 a	32.1 a	32.4 a	35.5 c	36.1 c	37.9 b	41.4 a
					28.63 b					29.1 b				30.2 a									
	22.2 d	25.0 c			29.3 b									37.7 a									
	-	25.0 b			31.1 a																		
22.2 b	30.27 a																						
Augmentation (% témoin)		10.3	16.5	11.7	26.1	29.4	31.0	27.8	30.6	32.5	32.9	27.8	30.9	31.9	23.5	26.1	40.1	44.7	45.8	59.9	62.6	70.9	86.7
		12.83			28.97					31.20				36.02				70.03					
					32.06									40.05									
		36.34																					

(1) = Les valeurs moyennes de chaque ligne non suivies par une même lettre minuscule sont significativement différentes au seuil de 5 %.

(2) DT= début tallage, E1c = épi-1cm, 2N = 2 nœuds.

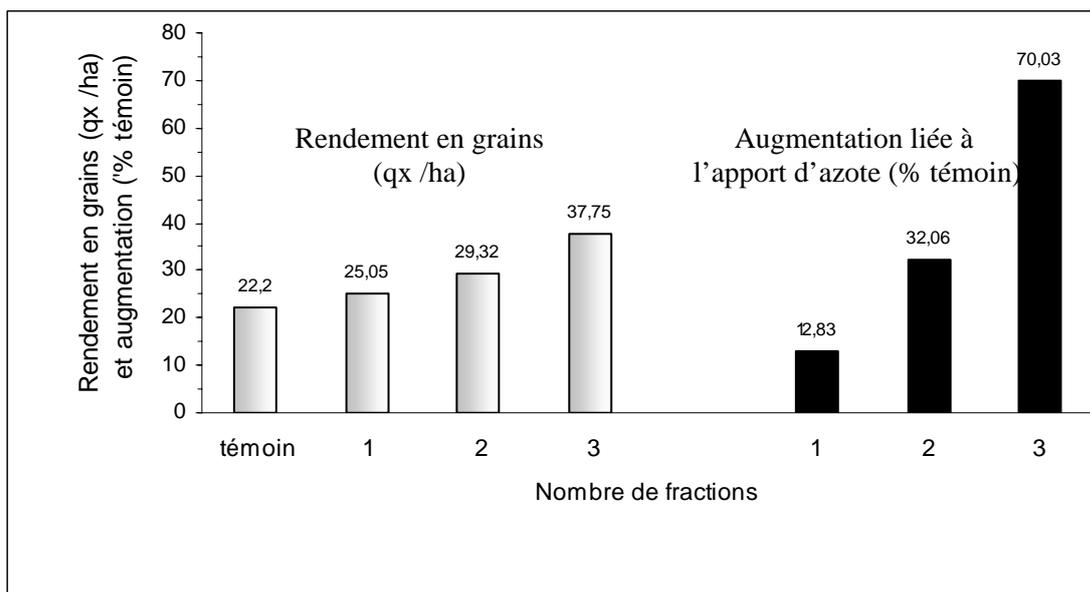


Fig.18 : Variations du rendement en grains et de l'efficacité de l'engrais azoté en fonction du nombre de fractions des besoins.

Le meilleur ajustement des proportions affectées aux 3 stades végétatifs est 1/4 des besoins au début tallage, 1/2 à l'épiaison et 1/4 au stade 2 nœuds (Formule G2, tableau 7). Cet équilibre donne 41,45 qx de grains /ha, soit une hausse de 19,25 qx /ha (86,71 %) de mieux que le témoin sans azote (Tableau 7).

L'efficacité de cette répartition s'explique par le fait que le gain en rendement grain est plus étroitement lié à celui du tallage épi /m² (coefficient de corrélation = 0,68), du PMG (coefficient de corrélation = 0,58) et surtout de la biomasse épiaison et maturité (coefficient de corrélation = 0,93) que cette combinaison favorise, qu'à l'amélioration du nombre de grains / m² (coefficient de corrélation = 0,53). L'amélioration du tallage épi /m², du poids du grain et de la biomasse paille par l'apport de l'azote expliquent respectivement 46,30, 34,00 et 87,1 % de la variation totale du gain en grains entre les 22 variantes de fumure analysées (R², fig.19).

Ces liens des taux d'augmentation du rendement en grains avec ceux du tallage épi et le PMG suggèrent d'écarter définitivement la formule G3 (tableau 7) retenue provisoirement plus haut (paragraphe 3.2.1.1.4), bien qu'elle exprime la plus forte augmentation en grains.

L'intérêt de la formule G2 réside également dans la forte fraction de 50 % des besoins qu'elle attribue au stade épi 1cm qui stimule par la suite fortement la biomasse végétative épiaison et maturité. L'amélioration de cette dernière favorise à son tour la production en grains. Les taux d'augmentation du rendement en grains sont en effet fortement corrélés positivement à la dose d'azote destinée à ce stade (coefficient de corrélation = 0,999).

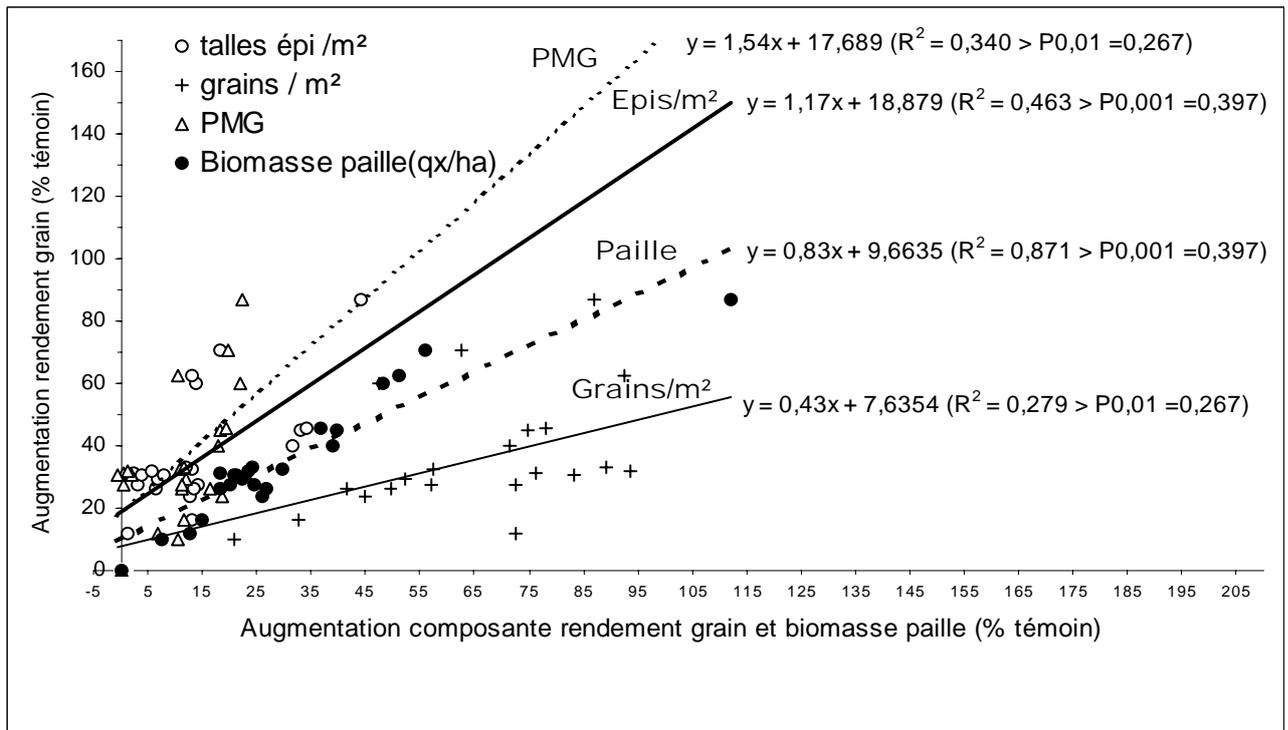


Fig.19 : Variation du taux d’augmentation du rendement grain (y) en relation avec celui des composantes talles épi /m², grains / m² et PMG et rendement paille (x). Equations de régression linéaire.

3.2.2-Discussions

3.2.2.1 Composantes de rendement grain

Les travaux concernant la relation entre la nutrition azotée et les différentes composantes du rendement ne sont pas récents, puisque Coïc a démontré déjà en 1956, qu’une même quantité d’azote peut avoir des impacts différents sur le rendement et même la qualité du grain, suivant le stade de végétation d’apport, correspondant à la formation de l’une ou de l’autre des composantes de rendement en grains.

Un mauvais équilibre de la nutrition azotée affecte le nombre de grains par épis (Jeuffroy et Bouchard, 1999), qui pénalise à son tour le nombre de grains par m². Or, il a été établi dans diverses conditions expérimentales que le rendement en grains est en général étroitement lié avec ce dernier paramètre (Fisher et Maurer, 1978).

La présente étude confirme globalement que l’apport d’azote équivalent aux besoins de la culture améliore les composantes de rendement grain, notamment la fertilité épi. Pour qu’elle soit plus efficace, la fumure azotée doit être répartie en plusieurs fractions. Par ailleurs, une bonne combinaison entre les fractions d’engrais et les stades d’apport permet de valoriser encore plus l’engrais azoté.

Dans nos conditions expérimentales, les meilleurs résultats ont été obtenus avec la modalité à 3 fractions en général et ses variantes G2 et G3 en particulier. L’intérêt de cette

modalité réside dans le fait que son application couvre les 3 stades végétatifs critiques du blé vis-à-vis de l'azote.

Le premier apport de 25 % des besoins et le second plus massif de 50 % des besoins, pratiqués successivement au début tallage et à l'épi 1cm assurent une biomasse élevée et par conséquent le futur peuplement en épis, comme cela a été rapporté par Ewert et Honermeier (1999). Ce peuplement en épis qui est représenté par le tallage épis / pied et même d'épillets / épi. Les deux apports déjà cités coïncident avec la mise en place de ces composantes qui débutent au début tallage et prend fin à la mi-montaison pour la première et 1 nœud pour la seconde (Meynard, 1985). La chute du nombre d'épillets / épi contribue à côté du nombre de grains / épillet dont la formation débute au début montaison à la diminution du nombre de grains / épi (Abad et al., 2004; 2005). L'intérêt d'une forte proportion d'azote au stade épi 1cm est en accord avec les conclusions de Sieling et al., (2005) qui rapportent que cette phase du cycle végétatif est celle qui a le plus besoin d'azote pour assurer la montaison et un bon tallage épi. Ce dernier s'améliore suite à la l'atténuation du phénomène de régression des talles par la dose (50%) d'engrais azoté (Darwinkel, 1983).

Le troisième apport tardif au stade 2 nœuds qu'assure la modalité à 3 fractions est nécessaire pour améliorer la fertilité épi. Sticksel et al., (2000) ont observé également qu'un apport au stade début montaison est favorable à la production du nombre de grains / épi. De même, Randall et al., (2001) ont remarqué qu'un apport d'azote aux environs de cinq talles permet d'obtenir un peuplement épis convenable tout en créant chez la culture, des besoins ultérieurs qui doivent être satisfaits par un deuxième apport au stade début montaison.

L'étude réalisée par Adjetey et al., (2001), sur le taux et la période d'application d'une fertilisation azotée sur le blé conduit en région aride avec des irrigations supplémentaires, démontre également que l'apport tardif (2 nœuds – gonflement) permet d'améliorer le nombre de grains par épi en diminuant de façon significative l'avortement de jeunes ovules.

Ces conclusions sont confirmées par les essais de Demotes-Mainard et Jeuffroy (2001) portant sur l'élaboration d'un modèle qui incorpore nombre de grains avec les radiations, les températures et la nutrition azotée. Ces auteurs ont démontré que le nombre de grains par épi est très affecté par la nutrition azotée trop tardive (méiose pollinique).

Cependant, il est à noter que les apports excessifs au stade 2 nœuds sont non justifiés pour le tallage épi dont la formation s'achève aux alentours de la mi-montaison (Meynard, 1985).

Le nombre de grains est la deuxième composante qui reflète la nutrition azotée (Jeuffroy et Bouchard, 1999). La réponse de cette composante aux changements nutritionnels du blé a été étudiée par de nombreux auteurs (Masle et Sebillotte, 1981; Triboï et Ntonga, 1993; Ntonga Mimbé et Lafarge, 1995 et Bouthier, 1997). Par ailleurs, Boiffin et al., (1981) estiment que le nombre de grains par m² est un critère pertinent de la réponse à l'azote du blé, voire mieux approprié que le rendement grain, car ce dernier intègre la phase de remplissage des grains où interviennent d'autres facteurs que la nutrition azotée.

Le grain commence à prendre du poids au début floraison (Meynard, 1985). Le poids de mille grains se construit est le paramètre le moins maîtrisable, car il est fortement lié aux effets de l'environnement au moment de la formation et du remplissage du grain. La dynamique d'accumulation des différents assimilés dont l'azote est en fonction de leurs quantités disponibles au moment du remplissage (Plénet, 1995).

Dans la présente étude, cette composante répond positivement à la fumure azotée. La parcelle conduite avec un apport d'azote produit un grain significativement plus lourd. Par contre, le fractionnement de la fumure reste globalement sans effet notable sur cette composante.

Cette faible contribution de la répartition de l'engrais azoté à l'amélioration du poids du grain serait la conséquence de la compétition pour les différents assimilats y compris l'azote, entre les grains produits en plus grand nombre par le fractionnement de l'azote. Cette hypothèse de concurrence possible entre grains est soutenue par Plénet (1995) qui rapporte qu'on rencontre souvent un poids de mille grains élevé pour des nombres de grains faibles, Garcia del Moral *et al.*, (2003) et surtout par Varga et Svečnjak (2006), qui ont travaillé sur les effets d'une fertilisation tardive (pulvérisation d'urée) sur le rendement et la qualité du grain de blé.

3.2.2.2- Rendement en grains

Le potentiel de production en grains varie selon les traitements azotés. La hausse liée à l'apport de l'engrais azoté est hautement significative. Cependant, le fractionnement de la fumure azotée, notamment en 3 apports, est encore plus bénéfique, car il agit positivement sur l'ensemble des composantes de rendement analysées. Les corrélations positives et très significatives mises en évidence entre l'augmentation du rendement en grains d'une part et celui de la biomasse végétative maturité (ou épiaison) (coefficient de corrélation = 0,93) et le tallage épi / m² (coefficient de corrélation = 0.68) d'autre part, concordent avec les résultats de Bahloul, (1985). Ce dernier a obtenu un coefficient de corrélation de 0,73 entre le rendement en grains et le nombre de talles épi / m² en travaillant sur trois variétés de blé dur en conditions climatiques méditerranéennes en France. López-Castaneda et Richards (1994), López-Bellido *et al.*, (2005) sont parvenus également aux mêmes résultats.

L'avantage de la répartition de la fumure azotée en plusieurs apports a été également démontré par Robert *et al.*, (2005) et surtout par López-Bellido *et al.*, (2005) qui ont étudié la réponse d'une variété de blé tendre à une fertilisation azotée de 150 unités /ha appliquée en 1, 2 et 3 apports destinés aux stades semis, tallage et début montaison.

La forte amélioration du rendement grain liée à l'apport de 50 % des besoins au stade épi 1cm, obtenue tant avec la modalité à 2 qu'à 3 fractions est également observée par López-Bellido *et al.*, (2005) en affectant 1/3 à 1/2 de la dose totale au stade B (début montaison). Bradford et Steven, (2006) sont parvenus également à la même conclusion.

3.3- Variations de la teneur en azote de la biomasse épiaison et en protéines du grain récolté

3.3.1- Analyse des valeurs moyennes

Depuis longtemps, la première démarche pour conduire la fertilisation azotée du blé à fin de pouvoir intervenir sur la culture par des apports d'engrais, reste la nutrition azotée qui repose sur le diagnostic du statut azoté. L'appréciation de ce dernier, nécessite un suivi de l'évolution de la teneur en azote dans la matière sèche produite et même le taux de protéines dans le grain. Il permet de déterminer les quantités prélevées et le rythme d'absorption de l'azote qui varient en fonction des besoins de la culture au cours de son développement.

Les valeurs moyennes et les taux d'amélioration des teneurs en azote de la biomasse totale épiaison et en protéines du grain sont reportés dans le tableau 8. Ils montrent que le recours à la fumure azotée augmente significativement l'accumulation de l'azote dans la masse végétale et enrichie le grain en protéines. Les taux d'amélioration sont respectivement de 50.60 % et 12,13 % (tableau 8).

Par ailleurs, comme pour les paramètres de production, la teneur en protéines du grain et la teneur en azote de son support dépendent énormément du mode d'apport des besoins en engrais azotés. Elle s'améliore davantage si la fumure azotée est répartie entre les différents stades. L'augmentation liée au fractionnement est en moyenne de 55.75% pour la teneur en azote de la biomasse épiaison et 13.68 % pour le taux de protéines du grain.

Mieux encore, la répartition en 3 apports, toutes variantes confondues est plus enrichissante que celle à 2 fractions. Son grain et sa biomasse épiaison contiennent respectivement 40,30 et 86,14 % de plus que le témoin, contre 6,31 et 47,65 % pour l'option à 2 apports (tableau 8). En d'autres termes, l'efficacité de la fumure à 3 fractions est 6,4 fois supérieure à celle de la modalité à 2 apports pour les protéines du grain, et 1,8 fois pour la teneur en azote de la biomasse épiaison.

Il faut noter également qu'un équilibre judicieux entre les proportions d'engrais destinées à chacun des 3 stades végétatifs retenus est nécessaire pour valoriser encore plus l'usage de la modalité tripartite. En effet, les écarts entre les résultats des teneurs en azote de la masse végétative et en protéines du grain varient significativement avec la combinaison entre les fractions et les stades d'apport de l'engrais (Tableau 8). Par exemple, la répartition des proportions des 3 apports, 25% au stade début tallage, 50% à l'épi 1cm et 25% au stade 2 nœuds de la formule G2, rapporte 9,5 à 15 % d'azote dans la biomasse épiaison et 11 à 33,5 % de protéines dans le grain, de plus que les autres combinaisons de la même modalité (G1, G3 et H, tableau 8, fig.20). Ces écarts significatifs signifient que l'efficacité d'une même proportion d'engrais, notamment si elle est forte, varie selon le stade fertilisé. Ils confirment également l'intérêt d'un apport d'une forte proportion des besoins en azote au stade épi 1cm.

Comme pour le reste des paramètres analysés, c'est également la formule G2 (tableau 8, fig.20) permettant un apport de 50 % des besoins au stade épi 1cm qui s'avère la plus optimale pour l'assimilation de l'azote par la culture de blé et son accumulation dans les organes végétatifs et le grain. En comparaison avec le témoin, elle produit une biomasse végétative épiaison pratiquement 2 fois plus riche en azote par rapport au témoin (1,45 % d'azote pour G2, contre 0,74 % d'azote pour le témoin) et un grain 59,13 % plus riche en protéines totales (15,42 % de protéines pour G2, contre 9,69 pour le témoin).

Tableau 8 : Valeurs moyennes (% MS) et taux d'augmentation (% témoin) des teneurs en azote de la biomasse épiaison et en protéines du grain en fonction des différentes modalités et variantes de la fertilisation azotée. Test de Newman et Keuls au seuil de 5 % ⁽¹⁾

Modalités	Sans apport	Avec apport d'azote																							
		Non fractionné			Fractionné																				
Nombres d'apport	0	1			2										3										
Stades d'apport ⁽²⁾	-	DT	E1c	2N	Début tallage : 2 noeuds					Epi 1cm: 2 noeuds					Début tallage : épi 1cm					DT : E1c : 2N					
Symboles de variantes	T	A1	A2	A3	E3	C3	F3	B3	D3	E2	B2	C2	F2	D2	E1	C1	F1	B1	D1	G1	G3	H	G2		
Proportions par stade	0	1	1	1	2:1	3:1	1:2	1:1	1:3	2:1	1:1	3:1	1:2	1:3	2:1	3:1	1:2	1:1	1:3	2:1:1	1:1:2	1:1:1	1:2:1		
Teneur en azote de la biomasse épiaison																									
Valeurs moyennes (% MS)		.86 a	.88 a	.88 a	.96 a	.96 a	.94 b	.95 b	.95 b	1.13 a	1.12 a	1.13 a	1.12 a	1.13 a	1.12 b	1.12 b	1.24 a	1.26 a	1.26 a	1.34 c	1.34 c	1.38 b	1.45 a		
		0.74 c			0.95c					1.12b					1.20a					1.38 a					
		0.87c			1.09 b																	1.15 a			
		0.87 b			1.11a																	1.11a			
Augmentation (% témoin)		16.2	18.9	18.9	29.7	29.7	27.0	28.4	28.4	52.7	51.4	52.7	51.4	52.7	51.4	51.4	67.6	70.3	70.3	81.1	81.1	86.5	95.9		
		18.01			28.64					52.16					62.16					86.14					
		-			47.65																	55.75			
		0.74 b			50.60																	50.60			
Teneur en protéines du grain																									
Valeurs moyennes (% MS)		9.9 a	9.9 a	10.0 a	10.0 b	10.3 b	10.1 a	10.2 a	10.2 a	10.2 a	10.2 a	10.1 a	10.2 a	10.3 a	10.1 b	10.1 b	11.0 a	11.0 a	10.9 a	12.2 d	12.8 c	14.4 b	15.4 a		
		9.69 c			10.1					10.2					10.6					13.69 a					
		9.91 c			10.30 b																	11.01 a			
		9.91 b			10.86 a																	10.86 a			
Augmentation (% témoin)		1.85	2.16	2.88	3.50	3.50	4.54	4.85	5.15	4.85	5.26	4.02	5.67	5.98	4.02	4.33	13.1	13.9	12.1	25.6	32.2	48.3	59.1		
		2.29			4.30					5.15					9.49					40.30					
		-			6.31																	13.68			
		9.69 b			12.13																	12.13			

(1) = Les valeurs moyennes de chaque ligne non suivies par une même lettre minuscule sont significativement différentes au seuil de 5 %.

(2) DT= début tallage, E1c = épi-1cm, 2N = 2 nœuds.

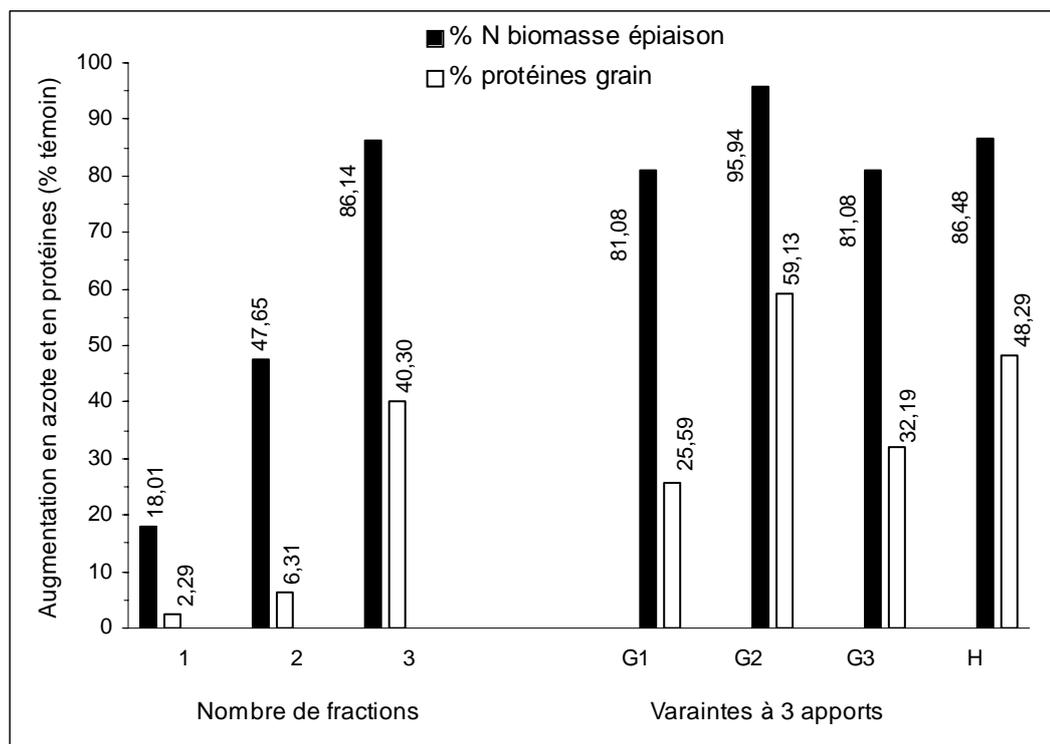


Fig.20 : Comparaison des taux d'augmentation (% témoin) de la teneur en azote de la biomasse épiaison et en protéines du grain en fonction du nombre de fractions des besoins de la culture en engrais azoté. Variation intervariantes de la modalité à 3 apports.

3.3.2 Discussions

Durant le cycle de la plante, le prélèvement d'azote peut être caractérisé dans un premier lieu par les quantités accumulées dans la biomasse surtout aérienne.

Comme pour la production de matière sèche, l'apport d'azote conduit à une amélioration de la teneur en azote de la matière sèche végétative et des protéines du grain produit. Ces derniers sont le principal paramètre de qualité du grain, et en relation directe avec le type de fertilisation azotée (Pan *et al.*, 2006). C'est également lorsque les besoins en azotes sont répartis en 2 ou mieux encore en 3 apports que la culture du blé absorbe mieux l'élément azote et produit un grain plus riche en protéines (40,30 % du témoin pour une fumure à 3 apports et 6,31 % pour celle à 2 fractions, contre 2,29 % pour la fertilisation non répartie) (Clark et Ellsworth, 2004). Le fractionnement en 2 et en 3 apports confondus des besoins totaux en azote de la culture, enrichie de 55,75 % la teneur en N de la biomasse épiaison et 13,68 % celle en protéines du grain par rapport au témoin.

L'avantage de répartir la fumure azotée a également mis en évidence par Limaux (1999) et Latiri-Souki *et al.*, (1992). Ces derniers auteurs ont montré sur la culture du blé dur conduite en zone semi-aride tunisienne, que plus l'engrais azoté est fractionné (surtout au

stades début tallage et début montaison), plus il est mieux valorisé et son grain est plus riche en protéines. Dans une autre étude menée par Farrer et *al.*, en 2006, ils ont montré que le stade d'apport et la dose d'azote (Effet fractionnement), contribuent avec 51.4% dans la variabilité du taux protéique du blé. Selon ces auteurs, le stade B (début montaison) augmente plus le taux protéique que le tallage (5 talles dans leurs conditions expérimentales). Ces résultats concordent avec nos résultats.

Comme pour la production de biomasse végétative, de talles épi / pied, de PMG et finalement de rendement en grains / ha, l'apport massif de 50 % des besoins en azote au stade épi 1cm, accompagné par des doses faibles de 25% au début tallage et au stade 2 nœuds est le modèle de fertilisation azotée le plus optimal pour l'alimentation en azote du blé et la richesse de son grain en protéines. A ce niveau encore, la dose d'azote réservée au stade épi 1cm est déterminante pour la richesse en azote de la biomasse végétative et du grain. Lemaire et Gastal (1997) ont abouti à des résultats semblables déduits du suivi de la croissance et de l'accumulation de l'azote par des plantes isolées, en étudiant la croissance, l'utilisation de l'eau et l'accumulation d'azote par le blé en conditions méditerranéennes, Garabet et *al.*, (1998) sont parvenus aux mêmes conclusions.

En fin, l'assimilation azotée du blé (avant et après floraison), reste la principale source de protéines au niveau des grains (Vocanson, 2002). Le fractionnement azoté permet la bonne valorisation des différents apports, l'amélioration de la teneur en azote des différentes parties végétatives et une bonne remobilisation de cet azote vers le grain produit (Martre et *al.*, 2003).

CONCLUSION GENERALE

La variété locale Waha prise comme modèle pour l'optimisation de la fertilisation azotée des céréales en zones semi-arides répond assez bien à la variation des modalités d'apport de cet engrais.

Les résultats présentés ont prouvé que le recours à la fertilisation azotée demeure une source d'amélioration de la culture des céréales non négligeable, même en conditions semi-arides. Les gains en grains et en paille, toutes variantes d'apport confondues, sont respectivement 8 et 9,5 qx /ha. L'impact de l'engrais azoté, évalué par les mesures des taux d'augmentation en comparaison avec le témoin est en accord avec d'autres preuves expérimentales rapportées par la littérature.

La fertilisation azotée agit différemment, mais toujours favorablement sur l'ensemble des paramètres analysés. Cependant, son efficacité dépend énormément de la modalité pratique adoptée. Le nombre de répartitions, la proportion des besoins totaux attribuée à chaque apport et le stade de la culture fertilisé sont autant de facteurs influents.

L'analyse des résultats de 22 combinaisons d'apport de 115 unités /ha d'ammonitrate 33,5 % correspondant aux besoins de la culture, a révélé une grande variation dans leur contribution à l'amélioration de la biomasse aérienne, du rendement grain et de ses composantes et de la richesse en azote ou en protéines des produits récoltés. Les coefficients de variations vont de 32 à 128 %, selon le paramètre pris en compte. La teneur en protéines du grain et le nombre de talles épi / pied sont les plus sensibles. La variation du rendement en grains et en paille dépasse 50 %.

Cette analyse a montré aussi qu'en situation de fertilisation fractionnée, les fortes proportions des besoins, sont moins valorisées quand elles sont apportées au début tallage ou au stade 2 nœuds qu'à l'épi 1cm. Une partie de ces apports massifs n'est pas très profitable pour le blé, car elle arrive, soit trop tôt au moment où la culture n'est pas suffisamment développée, soit trop tard, après que les composantes de rendement sont déjà formées.

Les résultats de ces 22 variantes de fertilisation conçues sur la base de la variation des proportions associées à celles des périodes d'apport de l'azote, témoignent finalement de la nécessité d'ajuster les apports d'engrais aux besoins de la culture évoluant au cours de son développement.

Une fertilisation azotée appliquée en un seul apport à un stade ou à un autre est beaucoup s'avère moins efficace que celle répartie en 2 ou 3 fois. Ce fractionnement contribue globalement à une hausse des rendements en paille (+ 20,6 %), en grain (+ 24 %) et en protéines du grain (+ 11 %).

Des deux modalités de fertilisation azotée fractionnées testées, celle en 3 tranches, réparties entre le début tallage, l'épi 1cm et 2 nœuds est plus productive. Avec ses rendements en grains de 38 qx /ha et en paille de 51 qx /ha et la teneur en protéines de son grain de 14%, elle dépasse les résultats du témoin de 67 % pour la paille (+21 qx /ha), 70 % pour le grain (+15.5 qx /ha) et 40 % pour la richesse en protéines du grain (+ 4 %). Son efficacité est 2,2 fois supérieure à celle de la modalité à 2 apports pour la production en grain, 2,6 fois pour la paille et 6,4 fois pour la richesse en protéines du grain.

Cette répartition en 3 fractions donne des résultats encore meilleurs, lorsque les proportions de ses 3 apports sont suffisamment équilibrées et ajustées aux 3 stades de la

CONCLUSION GENERALE

culture. La meilleure combinaison est l'apport de 25 % des besoins au début tallage, 50 % à l'épi 1cm et 25 % au stade 2 nœuds. Elle produit 41, 5 qx de grains /ha à 15, 4 % de protéines, et 63,7 qx de paille / ha. Soit une amélioration de 86,7 % (+19,2 qx /ha) pour le rendement grain et 112,1 % (33,7 qx/ha) pour la paille.

Cette étude aurait pu être complétée par l'analyse des résidus d'azote dans le sol à l'issue de la campagne, pour confirmer ou infirmer l'efficacité des différentes formules testées. Cette démarche envisagée au départ n'a pu être concrétisée, suite aux résultats non fiables des analyses rendues par le laboratoire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abad A., Lioveras J., Michelena A., 2004.** Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 87: 257 – 269.
- Abad A., Michelena A., and Lioveras J., 2005.** Effects of nitrogen supply on wheat and on soil nitrate. *Agron. Sustain. Dev.*, 25: 439 – 446.
- Adjetey J. A., Searle P. G. E., and Campbell L. C., 2001.** Rate and timing of nitrogen fertilizer applications on wheat grown under dryland and supplementary irrigation. *S. Afr. J. Plant Soil*, 18(1): 15 – 20.
- Akkal N., 1998.** Pilotage de la fertilisation azotée du blé d'hiver sur la base d'une évaluation précoce de la réflectance radiométrique et du taux de couverture du sol : application à l'agriculture de précision. Ph.D. thesis, Institut National de Paris-Grignon, pp : 1 – 38.
- Angus J. F., 1995.** Modeling N fertilization requirements for crops and pastures. In : Bacon PE, eds. *Nitrogen fertilization in the environment*. New York : Marcel Dekker, Inc., 109 – 127.
- Austin R. B., Edrich J. A., Ford M. A., Blackwell R. D., 1977.** The fate of the dry matter and carbohydrates from the leaves and stems of wheat during grain filling. *Ann. Bot.*, 41 : 1309 – 1321.
- Bahloul A., 1985.** Contribution à l'étude de la fertilisation azotée du blé en zone méditerranéenne: méthode des bilans. Diplôme d'agronomie approfondie. E.N.S.A. de Montpellier, 73p + annexes.
- Bélanger G., Gastal F., Lemaire G., 1992.** Growth analysis of a tall fescue fertilized with different rates of nitrogen. *Crop. Sci.* 32: 1371 – 1376.
- Benseddik B., 2000.** L'efficience de l'eau en zone semi-aride. Une approche simple pour l'optimisation du rendement et une meilleure gestion de l'eau. CIHEAM – Options Méditerranéennes. 3p.
- Boiffin J., Caneill J., Meynard J. M., Sebillotte M., 1981.** Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en champagne crayeuse. I- Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie*. 1(7): 549 – 558.
- Bouthier A., 1997.** Efficacité d'un apport d'azote sur blé tendre. La pluie est rarement limitante courant montaison. *Pers. Agric.*, 223: 56 – 59.
- Bradford D. Brown, Steven Petrie, 2006.** Irrigated hard winter wheat response to fall, spring, and late season applied nitrogen. *Field Crops Research*, 96: 260 – 268.
- Carlotti B., 1992.** Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures. Ministère de l'agriculture – Ministère de l'environnement : Mission EAU – NITRATES. 246p.
- Chambenoit C., 1999.** Evaluation en Poitou – Charentes d'un modèle de fonctionnement d'une culture de blé tendre, Azodyn. Mémoire de fin d'études. ENITA Clermont – Ferrand, 36p.
- Christensen L. E., Below F. E., Hageman R. H., 1981.** The effects of ear removal on senescence and metabolism of maize. *Plant Physiol.*, 68 : 1180 - 1185.
- Clark, L. J. and Ellsworth K. F., 2004.** Durum wheat response to nitrogen fertilization at Safford Agricultural Center. A College of Agriculture and Life Sciences Report. The University of Arizona, Tucson, AZ. Series P-135, pp: 34 – 37.
- Coïc Y., Coppenet M., Helias M., 1950.** Influence de l'époque d'apport des engrais azotés sur le comportement du rendement du blé. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 36 (3) : 231 – 234.
- Coïc Y., 1956.** La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. Les besoins en azote du blé d'hiver. Conséquences agronomiques. *Ann. Agron.*, 7(1), 115 – 131.

- COMIFER, 1996.** Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. 59p.
- Corbeels M., Hofman G., Cleemput O., 1998.** Analysis of water use by wheat grown on cracking clay soil in a semi – arid mediterranean environment: weather and nitrogen effects. *Agricultural water management*, 38 : 147 – 167.
- Dagnelie P., 1984.** Théorie et méthodes statistiques. Vol. II, Ed. Presse Agronomique de Gembloux (Belgique), 463p.
- Daniel C., and Triboï E., 2000.** Effects of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat : Effects on gliadin content and composition. *Journal of Cereal Science*, 32 : 45 – 56.
- Darwinkel A., 1983.** Ear formation and grain yield of winter wheat as affected by time of nitrogen supply. *Neth. J. Agric. Sci.* 31 : 211 – 225.
- Delécolle R., Gurnade J. C., 1980.** Liaison entre le développement et la morphologie du blé tendre d'hiver. I – Stades de développement de l'apex, apparition des feuilles et croissance de la tige. *Ann. Amélior. Plant.* 30 (4) : 479 - 498.
- Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., De Falcis D., Maggiore T., Stanca A. M., 1998.** Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9 : 11 – 20.
- Demotes-Mainard S., Jeuffroy M. H., 1998.** Elaboration du nombre de grains de blé en situation de nutrition azotée variée pendant la période de croissance de l'épi. In : R. Bonhomme et G. Lemaire (Eds.) : *Proceedings du colloque franco – Argentin à Buenos Aires le 13 – 14 novembre 1997.*
- Demotes Mainard S., Jeuffroy M. H., 2001.** Incorporating radiation and nitrogen nutrition into a model of kernel number in wheat. *Crop. Sci.*, 41: 415 – 423.
- Demotes Mainard S., Jeuffroy M. H., 2004.** Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat. *Field Crops Research*, 87 : 221 – 233.
- Destain J. P., 1997.** Améliorer l'efficacité de l'azote priorité économique, nécessité environnementale. Dans : *Efficacité de l'azote en production végétale et animale*, édité par le centre de recherches agronomiques de Gembloux, 4 – 9.
- Destain J. P., Bodson B., 2003.** Evolution de la fumure azotée. Dans : *Fumure et protection phytosanitaire des céréales*. Edition février 2003. Gembloux, 2003.
- Ehdaie B., Waines J. G., 2001.** Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *Field Crops Research*, 73: 47 – 61.
- Engels C., Marschner H., 1995.** Plant uptake and utilization of nitrogen. In : Bacon P E, Ed. *Nitrogen fertilization in the environment*. New York Marcel Dekker, Inc., 41 – 81.
- Evans J. R., 1983.** Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Aust. J. Plant Physiol.*, 72 : 297 – 302.
- Ewert F., Honermeier B., 1999.** Spikelet initiation of winter triticale and winter wheat in response to nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, 11: 107 – 113.
- Farrer Dianne C. Weisz Randy, Heiniger Ronnie, Murphy Paul J., and White Jeffrey G., 2006.** Minimizing protein variability in soft red winter wheat : Impact of nitrogen application timing and rate. *Agronomy Journal*, 98: 1137 – 1145.
- Fisher R. A., Maurer R., 1978.** Drought resistance in spring wheat cultivar. I. Grain yields responses. *Aust. J. Agr.*, 29: 897 – 912.
- Franc J., 1996.** La fumure azotée appliquée au stade dernière feuille en froment d'hiver. TFE. FUSAGx, 88p.

- Garabet S., Wood M., Ryan J., 1998.** Nitrogen and water effects on wheat yield in a mediterranean – type climate. I. Growth, water – use and nitrogen accumulation. *Field Crops Research*, 57 : 309 – 318.
- Garcia del Moral L. F., Rharrabti Y., Villegas D., and Royo C., 2003.** Evaluation of grain yield and its compnents in durum wheat under mediterranean conditions: An ontogenic approach. *Agronomy Journal*, 95: 266 – 274.
- Garel B., 2001.** 9 questions – réponses pour élaborer son plan de fertilisation. Dossier spécial : fertilisation azotée. *Pers. Agri.* 265 : 44 – 45.
- Gastal F., Lemaire G., 2002.** N uptake and distribution in crops : an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, vol. 53 ; n° 370, 789 – 799.
- Gate P., Grimaud L., 1989.** L'épi de blé à la floraison : un outil remarquable pour l'analyse et la prévision du nombre de grains. *Pers. Agri.* 132 : 18 – 30.
- Gate P., 1995.** Ecophysologie du blé. In : *Technique et documentation – Lavoisier (Eds.)*. 429p.
- Gembloux, 1990.** Le froment d'hiver: conduite de sa culture. Les presses agronomiques de Gembloux. 212p.
- Girard M. L., 1997.** Modélisation de l'accumulation de biomasse dans les grains de blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum L.*) ; simulation de la teneur en protéines à la récolte. Thèse de doctorat, INA – PG, Paris 96p.
- ICARDA, 1996.** A soil and plant analysis manual adapted for the west Asia and north Africa region. 131p.
- Jamieson P. D., Brooking I. R., Porter J. R., Wilson D. R., 1995.** Prediction of leaf apearance in wheat : a question of temperature. *Field crops Res.*, 41 : 35 – 44.
- Jeuffroy M. H., 1994.** Rôle de l'azote dans l'élaboration du rendement du blé. *Compte rendu de la réunion scientifique du groupe céréales de l'INRA*, 11p.
- Jeuffroy M. H., Bouchard C., 1999.** Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop. Sci.*, 39: 1385 – 1393.
- Jeuffroy M. H., 2001.** Nouveaux outils de gestion de la fertilisation azotée du blé : Comment concilier rendement, qualité et environnement ? In : *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*, G. Thevenet et A. Joubert (Eds.), 5^{ème} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre, Blois, 27 – 29 novembre 2001. p 237 – 249.
- Justes E., 1993.** Diagnostic de la nutrition azotée du blé, à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Application au raisonnement de la fertilisation. Thèse Doc. INA - PG, 227p. + annexes.
- Justes E., Mary B., Meynard J. M., Machet J. M., Thellier – Huche L., 1994.** Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* 74, 397 – 407.
- Justes E., Jeuffroy M. H., Mary B., 1997.** Wheat, barley and durum wheat. In: *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, G. Lemaire (Ed), springer, Berlin, pp: 73 – 91.
- Khelil M., 2003.** Etude par la technique du marquage isotopique du devenir des différentes sources d'azote en irrigation avec les eaux usées traitées Thèse Doc. Scie. Bio. Université El Manar. Tunis.
- Kirby E. J. M., Appleyad M., Fellowes G., 1985.** Effect of sowing date and variety on main shoot leaf emergence and number of leaves of barley and wheat. *Agronomy.* 5 (2) : 117 – 126.
- Latiri-Souki K., Aubry C., Doré T., Sebillotte M., 1992.** 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. *Agronomie*, (12) 1 : 31 – 43.

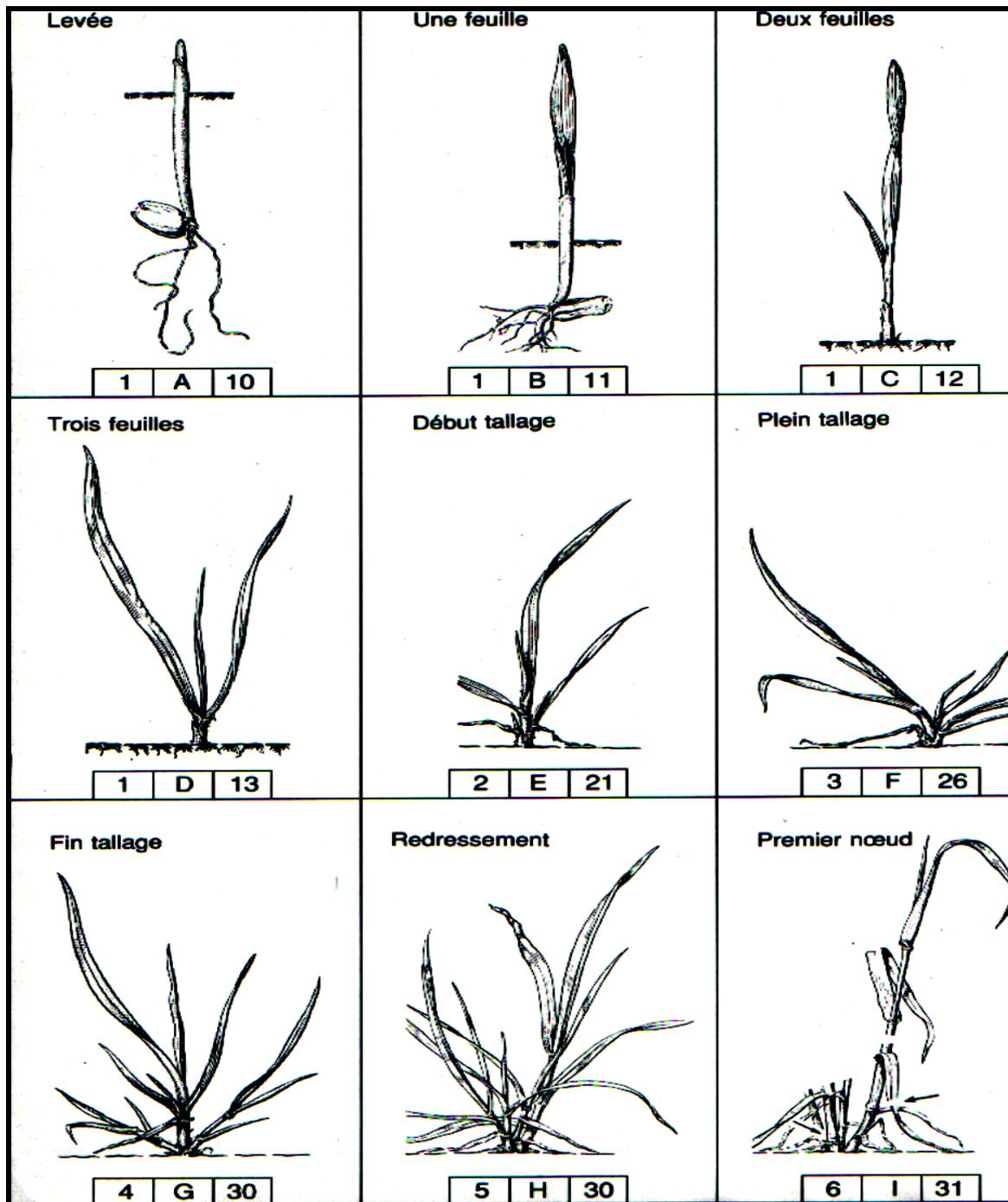
- Laurent F., 2001.** Azote, les clés de la fertilisation raisonnées. Perspectives Agricoles, 265 : 39 – 43.
- Lemaire G., Salette J., 1984.** Relation entre la dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I – Etude de l'effet du milieu. Agronomie 4, 423 – 430.
- Lemaire G., Gastal F., Salette J., 1989.** Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. XVI Inter. Grassland Cong. Nice, France, 197 – 180.
- Lemaire G., Gastal F., Plenet D., Le Bot J., 1996.** Le prélèvement de l'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures. Dans : Lemaire G., Nicolardot B., eds. Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Paris : Les colloques de l'INRA Editions n° 83, 121 -139.
- Lemaire G., Gastal F., 1997.** N uptake and distribution in plant canopies. In Lemaire G. eds. Diagnosis on the nitrogen status in crops. Heidelberg : Springer – Verlag, 3 – 43.
- Le Souder C., 1997.** L'azote un élément clé de la vie des plantes. Pers. Agric. 221 : 46 – 63.
- Limami A., Ameziane R., 1997.** Nutrition azotée (NO₃) et distribution du carbone dans la plante. In : Assimilation de l'azote chez les plantes, J. F., Moroy – Gaudry (Eds.), Mieux Comprendre, INRA – Eds, Paris, pp. 369 – 380.
- Limaux F., 1994.** Facteurs de variation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais. Conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver et du maïs en Lorraine. Diplôme de thèse INPL, 109 p. + annexes.
- Limaux F., Benoit M., Jacquin F., Recous S., 1998.** Le devenir des fertilisants azotés : utilisation, lixiviation et pertes par voie gazeuse. C. R. Acad. Agric. Fr., 84 (5) : 95 – 117.
- Limaux F., 1999.** Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. Thèse de Doctorat, INPL, Nancy, 154 p.
- López-Bellido Luis, López-Bellido Rafel J., Redondo Ramón, 2005.** Nitrogen efficiency in wheat under rainfed mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. Field Crops Research, 94: 86 – 97.
- López-Castaneda C., Richards R. A., 1994.** Variations in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristics. Field Crops Research, 37 (1): 51 – 62.
- M.A.D.R., 2003.** Série "B" des Statistiques Agricoles du Ministère de l'agriculture et du Développement Rural (Janvier 2003).
- Martre Pierre, Porter John R., Jamieson Peter D., and Triboï Eugène, 2003.** Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the Sink / Source regulations of nitrogen remobilization for wheat. American Society of plant biologists, 133: 1959 – 1967.
- Mary B., Justes E., 2001.** La fourniture d'azote par les matières organiques du sol. Colloque GEMAS – COMIFER. 5^{ème} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. Blois, le 27 – 29 novembre 2001 : 1 – 27.
- 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 de doctorat. INA – PG. 274p.
- Masle J., Sebillotte M., 1981.** Etude de l'hétérogénéité d'un peuplement de blé d'hiver. II- Origines des différentes catégories d'individus du peuplement ; éléments de description de sa structure. Agronomie, 1(13) : 217 – 224.

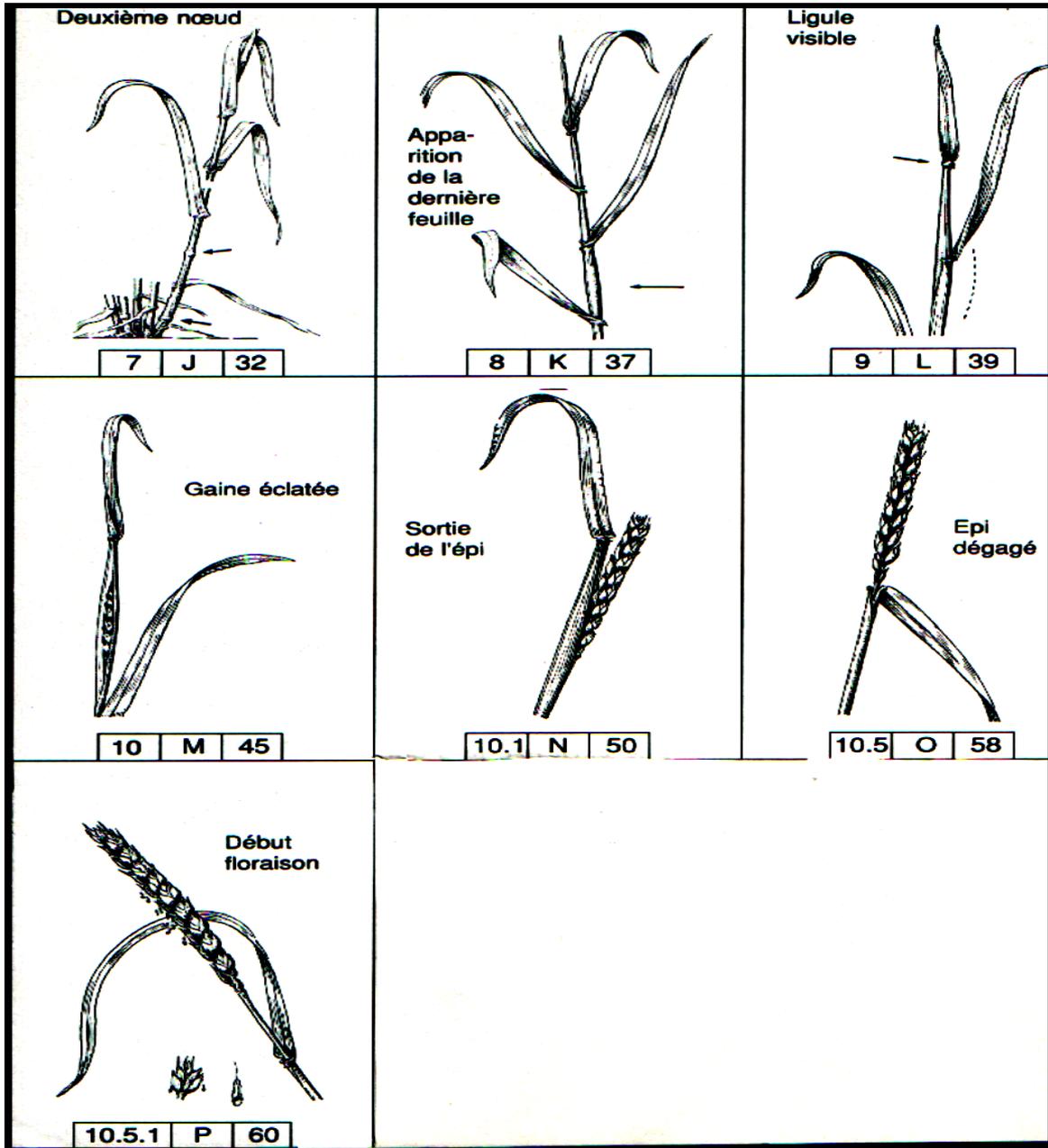
- Masle J., 1981a.** Relation entre croissance et développement pendant la montaison d'un peuplement de blé d'hiver. Influence des conditions de nutrition. *Agronomie*. 1 (5) : 365 – 374.
- Masle J., 1981b.** Elaboration du nombre d'épis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote. I – Mise en évidence d'un stade critique pour la montée d'une talle. *Agronomie*. 1 (8) : 623 – 632.
- Masle J., 1982.** Elaboration du nombre d'épis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote. II– Modélisation du nombre d'épis. *Agronomie*. 2(1) : 17 – 24.
- Masle J., 1985.** Elaboration du nombre de grains potentiel d'un peuplement de blé d'hiver. *C.R. Acad. Agri. Fr.* 71 (8) : 857 – 869.
- Meynard J. M., Boiffin J., Canneill J., Sebillotte M., 1981.** Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en champagne crayeuse. II – Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1 (9), 795 – 806.
- Meynard J. M., 1985.** Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison. *Agronomie*. 5 (7) : 579 -589.
- Meynard J. M., Aubry C., 1988.** Itinéraires techniques pour le blé en condition d'excès d'eau. *Persp. Agric.*, 126 : 80 – 89.
- Meynard J. M., Sebillotte M., 1994.** L'élaboration du rendement du blé, base pour l'étude des autres céréales à talles. In " Un point sur l'élaboration du rendement des principales cultures annuelles". INRA ed. pp: 31 – 51.
- Meynard J. M., Justes E., Machet J. M., Recous S., 1996.** Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. Dans : Lemaire G., Nicolardot B., eds. *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Paris : Les colloques de l'INRA Editions n° 83, 183 -199.
- Miglietta F., 1991.** Simulation of wheat ontogenesis. III – Effect of variety, nitrogen fertilization and water stress on leaf appearance and final leaf number in the field. *Clim. Res.* 1 : 233 – 242.
- Millard P., 1998.** The accumulation and storage of nitrogen by herbaceous plants. *Plant, cell and environment*. 11 : 1 – 8.
- Ntonga Mimbé J., Lafarge M., 1995.** Nitrogen and reduced irradiance effects on ear fertility in winter wheat. *Eur. J. Agron.* 4 (1) : 135 – 142.
- Olesen Jorgen E., Berntsen Jorgen, Hansen Elly M., Petersen Bjorn M., Petersen Jens, 2002 :** Crop nitrogen demand and canopy area expansion in winter wheat during vegetative growth. *European Journal of Agronomy*, 16 : 279 – 294.
- Pan Jie, Zhu Yan, Jiang Dong, Dai Tingbo, Li Yingxue, Cao Weixing, 2006.** Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 97: 322 – 336.
- Plas D., 1992.** Adaptation régionale du raisonnement de la fertilisation azotée : cas du blé tendre en Aunis. Thèse UTC, Compiègne, 174 p.
- Plénet D., 1995.** Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Thèse de doctorat INPL. pp : 153 – 171.
- PNTTA, 1999.** Fertilisation azotée des céréales : Cas des blés en bour et en irrigué. Programme Nationale de Transfert de Technologie en Agriculture. Bulletin mensuel N°62. 4p.
- Randall weisz, Crozier Carl R., and Heiniger Ronnie W., 2001.** Optimizing nitrogen application timing in no-till soft red winter wheat. *Agronomy Journal*, 93: 435 – 442.
- Recous S., 1983.** Utilisation réelle de l'engrais azoté par une culture de blé. Quatre années d'expérimentations avec l'azote 15. INRA 6 ITCF, 57 p. + Annexes.

- Recous S., Jeuffroy M. H., Mary B., Meynard J. M., 1996.** Gestion de l'azote en zone d'agriculture intensive. Rapport de synthèse. 37p.
- Recous S., Loiseau P., Machet J. M., Mary B., 1997.** Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, G. Lemaire, B. Nicolardot (Eds.). Les colloques, INRA – Eds. Paris : 105 – 120.
- Recous S., Machet J. M., 1999.** Short – term imobilisation and crop uptake of fertilizer N applied to winter wheat : effect of date of application in spring. *Plant Soil*, 206 : 137 – 149.
- Richards R. A., 1996.** Increasing the yield potential of wheat : manipulating sources and sinks. In : Reynolds MP, Rajarams, McNab A, eds. Increasing yield potential in wheat : breaking the barriers. Mexico : CIMMYT, 134 – 149.
- Rinaldi Michele, 2004.** Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES – Wheat model. *Field Crops Research*, 89 : 27 – 37.
- Robert J. Kratochvil, Harrison Michael R., Pearce Justin T., Conover Kevin J., and Sultenfuss Mark, 2005.** Nitrogen management for mid-atlantic hard red winter wheat production. *Agronomy Journal*, 97: 257 – 264.
- Sebillotte M., 1980.** An analysis of yield elaboration in wheat. In « Wheat – Documenta Ciba – Geigy ». Bale. Suisse. 25 – 32.
- Sieling K., Stahl C., Winkelmann C., Christen O., 2005.** Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. *European Journal of Agronomy*, 22 : 71 – 84.
- Sieling K., Brase T., Svib V., 2006.** Résidual effects of different N fertilizer treatments on growth, N uptake and yield of oilseed rape, wheat and barley. *European Journal of Agronomy*, 25 : 40 – 48.
- Simon H., Codaccioni P., Le Coeur X., 1989.** Produire des céréales à paille. Lavoisier eds. 333p.
- Soltner D., 1999.** Les grandes productions végétales. 19^e Edition. pp: 25 – 31.
- Sticksel E., Maidl F. X., Retzer F., Dennert J., Fischbeck G., 2000.** Efficiency of grain production of winter wheat as affected by N fertilization under particular consideration of single culm sink size. *European Journal of Agronomy*, 13: 287 – 294.
- Tardieu F., 1989.** Comment juger l'efficacité du système racinaire comme capteur d'eau. *Persp. Agric. « Les racines »*. Tiré à part des n° 119,122 et 128, 45 – 50.
- Ter Steege M. W., Stulen I., Mary B., 2001.** Nitrogen in the environment. In : Lea PJ, Morot – Gaudry J-F, eds. *Plant nitrogen*. Berlin : Springer – Verlag, 379 – 397.
- Triboï E., Ntonga J., 1993.** Effet de l'azote et du rayonnement sur le développement des feuilles et de l'épi chez le blé d'hiver : mise en place de l'appareil foliaire et de la structure de l'épi. *Agronomie*. 13 : 253 – 265.
- Triboï E., Triboï-Blondel A. M., 2001.** Environmental effects on wheat grain growth and composition. *Aspects of applied Biology* 64 : 91 – 101.
- Van Sandford D. A., Mackown C. T., 1987.** Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. *Crop Sci.*, 27 : 295 – 300.
- Varga Boris, Svečnjak Zlatko, 2006.** The effect of late-season urea spraying on grain yield and quality of winter wheat cultivars under low and high basal nitrogen fertilization. *Field Crops Research*, 96: 125 – 132.
- Villegas D., Aparicio N., Blanco R., and Royo C., 2001.** Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under mediterranean conditions. *Annals of Botany*, 88 : 617 – 627.

Vocanson Aurélie, 2002. Elaboration de la teneur en protéines de variétés de blé dur en fonction de la stratégie de fertilisation azotée: approche par expérimentation et par simulation. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'agronomie approfondie. E.N.S.A. de Rennes. 58p + Annexes.

Annexe A1 : Stades de développement de A à P, selon KELLER et BAGGIOLINI, avec correspondance des échelles de FEEKES (Chiffres de gauche) et de ZADOKS (Chiffres de droite) (Gembloux, 1990).





ANNEXE A2 : Les stades repères du blé pour mieux positionner les différentes Interventions (Laurent, 2001).

épi 1 cm

l'épi est à 1 cm
de la base du plateau de tallage

Dès le début, la structure de la future plante est en place

1 nœud

*l'épi est à 3 à 5 cm**
de la base du plateau de tallage

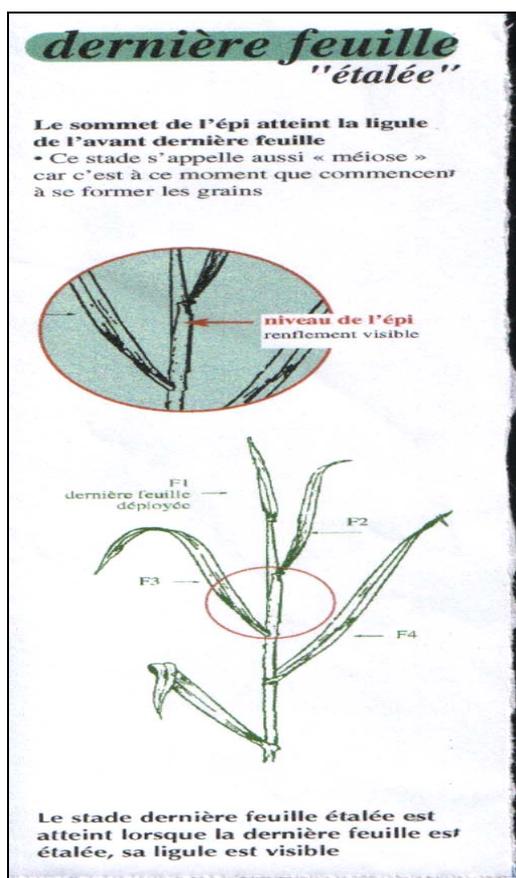
2 nœuds

*l'épi est à 6 à 10 cm**
de la base du plateau de tallage

dernière feuille "pointante"

L'épi va commencer à gonfler la gaine de l'avant dernière feuille.
- fendre les tiges les plus développées :
- s'assurer qu'il ne reste plus de feuille engainant l'épi

Le stade dernière feuille pointante est atteint lorsque la dernière feuille est visible, encore enroulée, sur 50 % des tiges



Annexe A3 : Températures et précipitations moyennes mensuelle (Poste climatologique S.R.P.V. Ain-Touta, 2003-2004)

Mois (*)	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	T _{moy} (°C)	Précipitation (mm)
Octobre	23.54	12.23	17.88	89.20
Novembre	15.72	5.75	10.73	31.40
Décembre	11.82	0.81	6.31	31.20
<u>Janvier</u>	12.51	0.86	6.68	11.60
<u>Février</u>	14.59	0.74	7.66	10.40
<u>Mars</u>	16.94	3.96	10.45	67.20
<u>Avril</u>	15.57	5.07	11.32	82.70
<u>Mai</u>	20.09	8.36	14.22	61.30
<u>Juin</u>	29.68	13.75	21.71	16.10
Juillet	34.15	17.18	25.66	00.40
Août	34.70	18.97	26.83	18.20
Septembre	28.91	13.16	21.03	09.80
Total	260.22	109.87	185.05	429.50

(*) Janvier à juin = période de culture

Annexe A4 : Caractéristiques physico-chimiques du sol cultivé

Paramètres (<i>méthode</i>)	Résultats par profondeur	moyenne
Granulométrie (%) (<i>Méthode Internationale = Pipette de Robinson</i>)	Argiles 0 – 20 cm : 38.81 20 – 40 cm : 34.66 40 – 60 cm : 44.53	39,3
	Limons fins 0 – 20 cm : 43.41 20 – 40 cm : 44.21 40 – 60 cm : 28.60	38,7
	Limons grossiers 0 – 20 cm : 12.56 20 – 40 cm : 11.03 40 – 60 cm : 15.72	13,1
	Sables fins 0 – 20 cm : 2.79 20 – 40 cm : 2.23 40 – 60 cm : 2.98	2,7
	Sables grossiers 0 – 20 cm : 5.89 20 – 40 cm : 6.18 40 – 60 cm : 8.72	6,93
pH eau (<i>Electrométrie : pH-mètre</i>)	0 – 20 cm : 8.26 20 – 40 cm : 8.20 40 – 60 cm : 8.50	8,32
Calcaire total (%) (<i>Calcimètre de Bernard</i>)	0 – 20 cm : 32.72 20 – 40 cm : 32.53 40 – 60 cm : 34.28	31,18
Calcaire actif (%) (<i>Méthode Drouineau -Galet</i>)	0 – 20 cm : 19.00 20 – 40 cm : 17.75 40 – 60 cm : 20.00	18,92
Conductivité électrique : C.E (mmhos/cm) (<i>Conductimètre électrique</i>)	0 – 20 cm : 0.54 20 – 40 cm : 0.49 40 – 60 cm : 0.34	0,46
Carbone (%) (<i>Méthode Walkley-Black</i>)	0 – 20 cm : 0.49 20 – 40 cm : 0.26 40 – 60 cm : 0.24	0,33
Matière organique (%) = $C (\%) \times 1.72$	0 – 20 cm : 0.83 20 – 40 cm : 0.44 40 – 60 cm : 0.40	0,56
C / N	0 – 20 cm : 3.63 20 – 40 cm : 2.60 40 – 60 cm : 2.66	2,96
Bases échangeables (C.E.C.en meq /100 g. sol)	0 – 20 cm : 25.60 20 – 40 cm : 27.20 40 – 60 cm : 26.46	26,42
Phosphore total (ppm)	0 – 20 cm : 0.18 20 – 40 cm : 0.08 40 – 60 cm : 0.46	0,24
Phosphore assimilable (P ₂ O ₅) en ppm (<i>Méthode Joret-Hebert</i>)	0 – 20 cm : 0.023 20 – 40 cm : 0.028 40 – 60 cm : 0.028	0,026
Potassium (K ₂ O) (meq/100 g. sol) (<i>Spectrophotométrie à flamme</i>)	0 – 20 cm : 2.05 20 – 40 cm : 1.77 40 – 60 cm : 1.63	1,82
Azote total (%) (<i>Méthode Kjeldhal</i>)	0 – 20 cm : 0.135 20 – 40 cm : 0.100 40 – 60 cm : 0.09	0,108
Na ⁺ (meq / 100 g. de sol) (<i>Spectrophotométrie à flamme</i>)	0 – 20 cm : 0.02 20 – 40 cm : 0.03 40 – 60 cm : 0.02	0,02

ANNEXE 5 : Résultats parcellaires

Formules azotées	Nombre de pieds / 1 m ²				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0/0/0)	200,00	203,33	203,33	196,66	200,83
A3 (0/0/100)	205,00	201,66	205,00	198,33	202,50
A1 (100/0/0)	200,00	200,00	206,66	201,66	202,08
A2 (0/100/0)	205,00	196,66	200,00	203,33	201,25
E3 (2/3 / 0 / 1/3)	195,00	200,00	205,00	198,33	199,58
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	201,66	196,66	206,66	200,00	201,25
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	203,33	200,00	195,00	200,00	199,58
B3 (1/2 / 0 / 1/2)	198,33	200,00	205,00	203,33	201,67
D3 (1/4 / 0 / 3/4)	205,00	201,66	206,66	195,00	202,08
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	205,00	203,33	200,00	196,66	201,25
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	196,66	203,33	198,33	195,00	198,33
C2 (0/ 3/4 / 1/4)	203,33	201,66	198,33	208,33	202,91
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	205,00	198,33	200,00	205,00	202,08
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	201,66	195,00	206,66	193,33	199,16
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	196,66	203,33	208,33	200,00	202,08
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	205,00	195,00	201,66	200,00	200,42
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	203,33	206,66	195,00	200,00	201,25
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	205,00	205,00	198,33	201,66	202,50
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	206,66	198,33	208,33	195,00	202,08
G1 (1/2/1/4/1/4)	198,33	205,00	201,66	201,66	201,66
G3 (1/4/1/4/1/2)	206,66	203,33	198,33	203,33	202,91
H (1/3/1/3/1/3)	205,00	201,66	206,66	205,00	204,58
G2 (1/4/1/2/1/4)	203,33	206,66	200,00	200,00	202,50
Moyenne Générale	202,39	201,16	202,39	200,07	201,50

Formules azotées	Biomasse Totale Aérienne à l'épiaison (qx / ha de Matière sèche)				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0 / 0 / 0)	28,66	29,29	29,01	28,85	28,95
A3 (0 / 0 / 100)	33,44	31,94	32,30	31,51	32,30
A1 (100 / 0 / 0)	31,08	30,79	30,48	31,00	30,84
A2 (0 / 100 / 0)	29,12	30,60	30,97	29,75	30,11
Moyenne : un seul Apport d'azote	31,21	31,11	31,25	30,75	31,08
E3 (2/3 / 0 / 1/3)	38,52	38,12	37,78	38,32	38,19
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	37,67	37,25	38,00	35,85	37,19
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	37,24	36,51	36,81	35,42	36,50
B3 (1/2 / 0 / 1/2)	36,73	35,22	35,53	36,08	35,89
D3 (1/4 / 0 / 3/4)	36,76	37,39	36,25	35,03	36,36
Moyenne: Stade E1C = 0 Azote	37,38	36,90	36,87	36,14	36,82
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	39,95	40,24	38,72	40,46	39,84
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	40,53	41,08	40,58	39,31	40,38
C2 (0/ 3/4 / 1/4)	40,59	41,17	39,51	39,93	40,30
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	38,08	39,94	39,13	40,56	39,43
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	40,53	37,94	39,48	38,62	39,14
Moyenne: Stade Début Tallage = 0 Azote	39,94	40,07	39,48	39,78	39,82
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	40,74	40,22	39,53	40,07	40,14
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	40,48	39,66	39,16	40,64	39,99
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	48,53	48,01	47,71	48,32	48,14
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	48,78	49,25	50,02	49,66	49,43
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	49,69	48,97	49,92	50,17	49,69
Moyenne:Stade 2 nœuds = 0 Azote	45,64	45,22	45,27	45,77	45,48
Moyenne : 2 Apports d'azote	40,99	40,73	40,54	40,52	40,70
G1 (1/2 / 1/4 / 1/4)	55,63	54,96	55,02	56,46	55,52
G3 (1/4 / 1/4 / 1/2)	57,09	56,66	56,91	55,15	56,45
H (1/3 / 1/3 / 1/3)	62,49	63,03	62,76	63,21	62,87
G2 (1/4 / 1/2 / 1/4)	73,69	74,22	73,95	75,44	74,33
Moyenne : 3 Apports d'Azote	62,23	62,22	62,16	62,57	62,29
Moyenne: Fractionnement Azoté	45,46	45,25	45,09	45,19	45,25
Moyenne: Azote	43,52	43,33	43,21	43,23	43,32

ANNEXE

Formules azotées	Teneur en Azote (g d'N / 100g de Matière sèche)				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0 / 0 / 0)	0,74	0,75	0,75	0,73	0,74
A3 (0 / 0 / 100)	0,86	0,88	0,89	0,88	0,88
A1 (100 / 0 / 0)	0,85	0,85	0,88	0,87	0,86
A2 (0 / 100 / 0)	0,88	0,88	0,86	0,89	0,88
Moyenne : un seul Apport d'azote	0,86	0,87	0,88	0,88	0,87
E3 (2/3 / 0 / 1/3)	0,96	0,97	0,97	0,95	0,96
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	0,94	0,97	0,97	0,96	0,96
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	0,94	0,95	0,95	0,93	0,94
B3 (1/2 / 0 / 1/2)	0,95	0,95	0,95	0,93	0,95
D3 (1/4 / 0 / 3/4)	0,94	0,96	0,96	0,94	0,95
Moyenne : Stade E1C= 0 Azote	0,95	0,96	0,96	0,94	0,95
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	1,14	1,13	1,11	1,13	1,13
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	1,13	1,13	1,13	1,10	1,12
C2 (0 / 3/4 / 1/4)	1,13	1,12	1,14	1,11	1,13
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	1,11	1,11	1,14	1,10	1,12
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	1,13	1,13	1,12	1,14	1,13
Moyenne : Stade Début tallage = 0 Azote	1,13	1,12	1,13	1,12	1,12
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	1,14	1,13	1,11	1,11	1,12
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	1,10	1,14	1,14	1,11	1,12
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	1,25	1,25	1,23	1,24	1,24
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	1,25	1,27	1,28	1,24	1,26
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	1,28	1,26	1,24	1,27	1,26
Moyenne : Stade 2 nœuds = 0 Azote	1,20	1,21	1,20	1,19	1,20
Moyenne: 2 Apports d'azote	1,09	1,10	1,10	1,08	1,09
G1 (1/2 / 1/4 / 1/4)	1,34	1,34	1,35	1,33	1,34
G3 (1/4 / 1/4 / 1/2)	1,33	1,34	1,34	1,35	1,34
H (1/3 / 1/3 / 1/3)	1,37	1,38	1,38	1,39	1,38
G2 (1/4 / 1/2 / 1/4)	1,45	1,48	1,43	1,45	1,45
Moyenne : 3 Apports d'Azote	1,37	1,39	1,38	1,38	1,38
Moyenne : Fractionnement azoté	1,15	1,16	1,15	1,15	1,15
Moyenne : Azote	1,11	1,12	1,12	1,11	1,11

Formules azotées	Nombre d'épis / pied				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0 / 0 / 0)	1,53	1,50	1,52	1,51	1,52
A3 (0 / 0 / 100)	1,51	1,52	1,53	1,53	1,52
A1 (100 / 0 / 0)	1,60	1,63	1,61	1,63	1,62
A2 (0 / 100 / 0)	1,71	1,71	1,69	1,73	1,71
Moyenne : un seul Apport d'azote	1,61	1,62	1,61	1,63	1,62
E3 (2/3 / 0 / 1/3)	1,62	1,64	1,60	1,63	1,62
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	1,61	1,63	1,63	1,60	1,62
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	1,57	1,57	1,56	1,55	1,56
B3 (1/2 / 0 / 1/2)	1,56	1,55	1,55	1,57	1,56
D3 (1/4 / 0 / 3/4)	1,58	1,56	1,56	1,55	1,56
Moyenne : Stade E1C = 0 Azote	1,59	1,59	1,58	1,58	1,58
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	1,70	1,73	1,70	1,72	1,71
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	1,72	1,71	1,74	1,71	1,72
C2 (0 / 3/4 / 1/4)	1,72	1,70	1,73	1,69	1,71
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	1,63	1,62	1,61	1,63	1,62
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	1,60	1,63	1,62	1,62	1,62
Moyenne : Stade Début tallage = 0 Azote	1,67	1,68	1,68	1,67	1,68
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	1,72	1,70	1,70	1,68	1,70
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	1,74	1,73	1,68	1,73	1,72
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	2,08	2,02	1,97	1,89	1,99
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	2,05	2,11	1,90	1,94	2,00
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	2,14	1,95	1,90	2,10	2,02
Moyenne : Stade 2 nœuds = 0 Azote	1,95	1,90	1,83	1,87	1,89
Moyenne : 2 Apports d'azote	1,74	1,72	1,70	1,71	1,72
G1 (1/2 / 1/4 / 1/4)	1,72	1,72	1,70	1,73	1,72
G3 (1/4 / 1/4 / 1/2)	1,68	1,72	1,68	1,70	1,70
H (1/3 / 1/3 / 1/3)	1,75	1,76	1,75	1,78	1,76
G2 (1/4 / 1/2 / 1/4)	2,06	2,10	2,30	2,20	2,17
Moyenne : 3 Apports d'Azote	1,80	1,83	1,86	1,85	1,83
Moyenne : Fractionnement azoté	1,75	1,74	1,73	1,74	1,74
Moyenne : Azote	1,73	1,73	1,71	1,72	1,72

ANNEXE

Formules azotées	Nombre d'épis / m ²				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0/0/0)	306,00	305,00	309,06	296,96	304,25
A3 (0/0/100)	309,55	306,52	313,65	303,44	308,29
A1 (100/0/0)	320,00	326,00	332,72	328,71	326,86
A2 (0/100/0)	350,55	336,29	338,00	351,76	344,15
Moyenne : un seul apport d'azote	326,70	322,94	328,12	327,97	326,43
E3 (2/3 / 0 /1/3)	315,90	328,00	328,00	323,28	323,79
C3 (3/4 / 0 /1/4)	324,67	320,56	336,86	320,00	325,52
F3 (1/3 / 0 /2/3)	319,23	314,00	304,20	310,00	311,86
B3 (1/2 / 0 /1/2)	309,39	310,00	317,75	319,23	314,09
D3 (1/4 / 0 /3/4)	323,90	314,59	322,39	302,25	315,78
Moyenne: Stade E1C = 0 Azote	318,62	317,43	321,84	314,95	318,21
E2 (0 / 2/3 /1/3)	348,50	351,76	340,00	338,26	344,63
B2 (0 / 1/2 /1/2)	338,26	347,69	345,09	333,45	341,12
C2 (0/ 3/4 / 1/4)	349,73	342,82	343,11	352,08	346,93
F2 (0 / 1/3 /2/3)	334,15	321,29	322,00	334,15	327,90
D2 (0 / 1/4 /3/4)	322,66	317,85	334,79	313,19	322,12
Moyenne : Stade Début tallage = 0 N	338,66	336,28	337,00	334,23	336,54
E1 (2/3 / 1/3 /0)	338,26	345,66	354,16	336,00	343,52
C1 (3/4 / 1/4 /0)	356,70	337,35	338,79	346,00	344,71
F1 (1/3 / 2/3 /0)	422,93	417,45	384,15	378,00	400,63
B1 (1/2 / 1/2 /0)	420,25	432,55	376,83	391,22	405,21
D1 (1/4 / 3/4 /0)	442,25	386,74	395,83	409,50	408,58
Moyenne : Stade 2 nœuds = 0 azote	396,08	383,95	369,95	372,14	380,53
Moyenne : 2apports d'azote	351,12	345,89	342,93	340,44	345,09
G1 (1/2/1/4/1/4)	341,13	352,60	342,82	348,87	346,36
G3 (1/4/1/4/1/2)	347,19	349,73	333,19	345,66	343,94
H (1/3 / 1/3 / 1/3)	358,75	354,92	361,66	364,90	360,06
G2 (1/4 / 1/2 / 1/4)	418,86	433,99	460,00	440,00	438,21
Moyenne : 3Apports d'Azote	366,48	372,81	374,42	374,86	372,14
Moyenne: Fractionnement azoté	354,35	351,56	349,56	347,69	350,79
Moyenne : Azote	350,58	347,65	346,64	345,00	347,47

Formules azotées	Nombre de grains / épis				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0 / 0 / 0)	16,00	17,00	15,00	16,00	16,00
A3 (0 / 0 / 100)	28,00	27,00	28,00	26,00	27,25
A1 (100 / 0 / 0)	17,00	20,00	18,00	17,00	18,00
A2 (0 / 100 / 0)	19,00	18,00	18,00	20,00	18,75
Moyenne : un seul Apport d'azote	21,33	21,67	21,33	21,00	21,33
E3 (2/3 / 0 /1/3)	23,00	21,00	23,00	23,00	22,50
C3 (3/4 / 0 /1/4)	22,00	24,00	22,00	23,00	22,75
F3 (1/3 / 0 /2/3)	29,00	27,00	28,00	26,00	27,50
B3 (1/2 / 0 /1/2)	27,00	27,00	25,00	28,00	26,75
D3 (1/4 / 0 /3/4)	29,00	27,00	28,00	29,00	28,25
Moyenne : Stade E1C = 0 Azote	26,00	25,20	25,20	25,80	25,55
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	21,00	23,00	22,00	23,00	22,25
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	26,00	26,00	29,00	27,00	27,00
C2 (0 / 3/4 / 1/4)	23,00	19,00	22,00	24,00	22,00
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	29,00	28,00	28,00	30,00	28,75
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	30,00	30,00	28,00	29,00	29,25
Moyenne : Stade Début tallage = 0 Azote	25,80	25,20	25,80	26,60	25,85
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	20,00	19,00	22,00	21,00	20,50
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	20,00	20,00	21,00	19,00	20,00
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	22,00	22,00	19,00	20,00	20,75
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	20,00	21,00	21,00	22,00	21,00
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	20,00	20,00	22,00	23,00	21,25
Moyenne : Stade 2 nœuds = 0 Azote	20,40	20,40	21,00	21,00	20,70
Moyenne : 2 Apports d'azote	24,07	23,60	24,00	24,47	24,03
G1 (1/2 / 1/4 / 1/4)	22,00	19,00	21,00	21,00	20,75
G3 (1/4 / 1/4 / 1/2)	26,00	26,00	28,00	29,00	27,25
H (1/3 / 1/3 / 1/3)	21,00	22,00	22,00	23,00	22,00
G2 (1/4 / 1/2 / 1/4)	20,00	21,00	20,00	22,00	20,75
Moyenne : 3 Apports d'Azote	22,25	22,00	22,75	23,75	22,69
Moyenne: Fractionnement azoté	23,68	23,26	23,74	24,32	23,75
Moyenne: Azote	23,36	23,05	23,41	23,86	23,42

ANNEXE

Formules azotées	Poids de 1000 grains en (g)				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0 / 0 / 0)	40,80	40,65	40,71	41,09	40,81
A3 (0 / 0 / 100)	43,40	44,72	42,73	43,60	43,61
A1 (100 / 0 / 0)	45,78	43,90	45,65	44,81	45,04
A2 (0 / 100 / 0)	46,16	45,49	46,23	44,20	45,52
Moyenne : un seul apport d'azote	45,11	44,70	44,87	44,20	44,72
E3 (2/3 / 0 / 1/3)	45,56	44,70	45,25	45,93	45,36
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	45,77	45,60	44,90	46,82	45,77
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	41,20	40,64	42,40	39,68	40,98
B3 (1/2 / 0 / 1/2)	40,86	41,50	41,46	40,27	41,02
D3 (1/4 / 0 / 3/4)	40,06	41,20	40,33	40,90	40,62
Moyenne : Stade E1C = 0 Azote	42,69	42,73	42,87	42,72	42,75
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	45,20	46,11	45,70	43,93	45,24
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	44,96	45,70	45,53	46,07	45,57
C2 (0 / 3/4 / 1/4)	45,70	45,22	46,13	44,27	45,33
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	40,26	42,54	41,90	41,73	41,61
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	42,11	40,75	40,92	41,66	41,36
Moyenne : Stade Début tallage = 0 Azote	43,65	44,06	44,04	43,53	43,82
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	46,30	48,70	48,52	49,97	48,37
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	46,81	47,73	47,07	48,43	47,51
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	49,72	45,90	48,22	48,80	48,16
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	46,98	48,70	48,83	48,78	48,32
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	48,21	49,97	47,50	48,96	48,66
Moyenne : Stade 2 nœuds = 0 Azote	47,60	48,20	48,03	48,99	48,21
Moyenne : 2apports d'azote	44,65	45,00	44,98	45,08	44,93
G1 (1/2/1/4/1/4)	50,17	50,03	48,90	49,97	49,77
G3 (1/4/1/4/1/2)	44,02	45,62	46,14	44,33	45,03
H (1/3/1/3/1/3)	49,61	48,30	47,80	49,73	48,86
G2 (1/4/1/2/1/4)	49,70	50,20	49,63	50,47	50,00
Moyenne : 3 Apports d'Azote	48,38	48,54	48,12	48,63	48,41
Moyenne: Fractionnement azoté	45,43	45,74	45,64	45,83	45,66
Moyenne : Azote	45,39	45,60	45,53	45,61	45,53

Formules azotées	Rendement Réel en grains (qx/ha)				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0/0/0)	22,70	21,76	21,93	22,42	22,20
A3 (0/0/100)	24,87	24,29	24,91	25,12	24,80
A1 (100/0/0)	25,30	24,22	23,90	24,51	24,48
A2 (0/100/0)	25,56	26,24	25,49	26,17	25,87
Moyenne : un seul apport d'azote	25,24	24,92	24,77	25,27	25,05
E3 (2/3 / 0 / 1/3)	27,43	28,56	27,91	28,04	27,99
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	28,63	29,02	28,26	28,95	28,72
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	29,21	29,70	28,94	28,46	29,08
B3 (1/2 / 0 / 1/2)	28,69	28,04	29,17	27,63	28,38
D3 (1/4 / 0 / 3/4)	28,98	29,63	28,25	29,12	29,00
Moyenne : Stade E1C=0 azote	28,59	28,99	28,51	28,44	28,63
E2 (0 / 2/3 / 1/3)	28,98	29,94	29,15	29,57	29,41
B2 (0 / 1/2 / 1/2)	29,45	28,86	29,77	29,90	29,50
C2 (0 / 3/4 / 1/4)	28,00	28,53	27,99	29,01	28,38
F2 (0 / 1/3 / 2/3)	29,62	29,19	28,05	29,38	29,06
D2 (0 / 1/4 / 3/4)	29,00	29,82	28,84	29,51	29,29
Moyenne: Stade Début tallage=0 N	29,01	29,27	28,76	29,47	29,13
E1 (2/3 / 1/3 / 0)	27,58	26,99	27,27	27,81	27,41
C1 (3/4 / 1/4 / 0)	28,40	27,93	27,61	28,00	27,99
F1 (1/3 / 2/3 / 0)	31,21	32,14	30,96	30,07	31,10
B1 (1/2 / 1/2 / 0)	31,57	32,56	33,31	31,08	32,13
D1 (1/4 / 3/4 / 0)	32,67	33,01	31,59	32,15	32,36
Moyenne : Stade 2 nœuds= 0 azote	30,29	30,53	30,15	29,82	30,20
Moyenne : 2apports d'azote	29,29	29,59	29,14	29,25	29,32
G1 (1/2/1/4/1/4)	35,77	36,02	35,05	35,21	35,51
G3 (1/4/1/4/1/2)	36,62	35,87	36,47	35,38	36,09
H (1/3/1/3/1/3)	38,02	37,87	38,47	37,38	37,94
G2 (1/4/1/2/1/4)	40,77	41,29	41,67	42,08	41,45
Moyenne : 3Apports d'azote	37,80	37,76	37,92	37,51	37,75
Moyenne : Fractionnement azoté	31,08	31,31	30,99	30,99	31,09
Moyenne : Azote	30,29	30,44	30,14	30,21	30,27

ANNEXE

Formules azotées	Rendement en paille (qx/ha)				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0/0/0)	30,45	28,53	31,16	30,02	30,04
A3 (0/0/100)	33,94	34,10	34,62	32,77	33,86
A1 (100/0/0)	32,31	33,06	32,70	31,24	32,33
A2 (0/100/0)	35,24	33,50	35,09	34,15	34,50
Moyenne : un seul apport d'azote	33,83	33,55	34,14	32,72	33,56
E3 (2/3 / 0 /1/3)	35,04	36,51	36,25	34,34	35,54
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	36,15	37,56	38,29	34,86	36,72
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	35,33	35,92	36,61	34,35	35,55
B3 (1/2 / 0 /1/2)	36,90	35,01	36,27	36,18	36,09
D3 (1/4 / 0 /3/4)	37,02	35,85	36,78	36,10	36,44
Moyenne: Stade E1C= 0 azote	36,09	36,17	36,84	35,17	36,07
E2 (0 / 2/3 /1/3)	36,16	36,98	37,40	37,14	36,92
B2 (0 / 1/2 /1/2)	37,27	36,28	38,04	37,78	37,34
C2 (0/ 3/4 / 1/4)	37,99	38,23	36,57	36,97	37,44
F2 (0 / 1/3 /2/3)	35,92	36,34	36,97	36,04	36,32
D2 (0 / 1/4 /3/4)	37,75	37,60	36,88	35,92	37,04
Moyenne : Stade Début tallage = 0 N	37,02	37,09	37,17	36,77	37,01
E1 (2/3 / 1/3 /0)	37,66	37,05	38,12	38,39	37,81
C1 (3/4 /1/4 /0)	38,56	38,27	37,99	37,50	38,08
F1 (1/3 / 2/3 /0)	41,57	42,38	41,19	41,92	41,77
B1 (1/2 / 1/2/0)	41,28	41,93	42,56	42,13	41,98
D1 (1/4 /3/4 /0)	40,98	41,72	41,49	40,28	41,12
Moyenne : Stade 2 nœuds= 0 azote	40,01	40,27	40,27	40,04	40,15
Moyenne : 2apports d'azote	37,71	37,84	38,09	37,33	37,74
G1 (1/2/1/4/1/4)	44,65	45,18	43,99	44,23	44,51
G3 (1/4/1/4/1/2)	45,83	45,32	45,11	45,56	45,46
H (1/3/1/3/1/3)	49,88	50,35	48,74	49,36	49,58
G2 (1/4/1/2/1/4)	63,67	63,18	65,21	62,76	63,71
Moyenne : 3 Apports d'Azote	51,01	51,01	50,76	50,48	50,81
Moyenne : Fractionnement azoté	40,51	40,61	40,76	40,10	40,49
Moyenne : Azote	39,60	39,65	39,86	39,09	39,55

Formules azotées	Teneur en protéines du grain (N%MS*5,7)				
	Bloc 01	Bloc 02	Bloc 03	Bloc 04	Moyenne
T (0/0/0)	9,69	9,63	9,74	9,69	9,69
A3 (0/0/100)	9,97	10,03	9,91	9,97	9,97
A1 (100/0/0)	9,80	9,80	9,91	9,97	9,87
A2 (0/100/0)	9,86	9,86	9,97	9,91	9,90
Moyenne : un seul apport d'azote	9,88	9,90	9,93	9,95	9,91
E3 (2/3 / 0 /1/3)	10,03	9,97	10,08	10,03	10,03
C3 (3/4 / 0 / 1/4)	10,08	10,03	10,03	9,97	10,03
F3 (1/3 / 0 / 2/3)	10,20	10,14	10,14	10,03	10,13
B3 (1/2 / 0 /1/2)	10,14	10,20	10,20	10,08	10,16
D3 (1/4 / 0 /3/4)	10,20	10,26	10,14	10,14	10,19
Moyenne : Stade E1C = 0 azote	10,13	10,12	10,12	10,05	10,10
E2 (0 / 2/3 /1/3)	10,14	10,14	10,26	10,08	10,16
B2 (0 / 1/2 /1/2)	10,26	10,20	10,20	10,14	10,20
C2 (0/ 3/4 / 1/4)	10,08	10,08	10,14	10,03	10,08
F2 (0 / 1/3 /2/3)	10,26	10,31	10,20	10,20	10,24
D2 (0 / 1/4 /3/4)	10,26	10,26	10,31	10,26	10,27
Moyenne : Stade Début tallage = 0 N	10,20	10,20	10,22	10,14	10,19
E1 (2/3 / 1/3 /0)	10,08	10,14	10,03	10,08	10,08
C1 (3/4 /1/4 /0)	10,14	10,14	10,03	10,14	10,11
F1 (1/3 / 2/3 /0)	11,00	10,83	10,94	11,05	10,96
B1 (1/2 / 1/2/0)	11,11	11,05	11,05	10,94	11,04
D1 (1/4 /3/4 /0)	11,11	11,11	10,05	11,17	10,86
Moyenne : Stade 2 nœuds= 0 azote	10,69	10,65	10,42	10,68	10,61
Moyenne : 2apports d'azote	10,34	10,32	10,25	10,29	10,30
G1 (1/2/1/4/1/4)	11,91	12,02	12,14	12,59	12,17
G3 (1/4/1/4/1/2)	12,59	13,11	12,19	13,33	12,81
H (1/3/1/3/1/3)	14,47	14,64	14,25	14,13	14,37
G2 (1/4/1/2/1/4)	15,39	15,44	15,27	15,56	15,42
Moyenne : 3 Apports d'Azote	13,59	13,80	13,46	13,90	13,69
Moyenne : Fractionnement azoté	11,02	11,06	10,93	11,05	11,01
Moyenne : Azote	10,87	10,90	10,79	10,90	10,86

RESUME

L'étude porte sur l'optimisation du fractionnement et de la période d'apport des besoins azotés des céréales d'hiver. L'essai a été réalisé sur une variété locale (waha) conduite en plein champ en zone semi-aride. Un total de 22 combinaisons d'apport de 115 unités d'ammonitrate 33,5 % / ha a été testé. La biomasse aérienne épiaison et paille, le rendement grain et de ses composantes, ainsi que la teneur en azote ou en protéines de certains organes ont été déterminés.

Les résultats obtenus ont montré que la fertilisation azotée favorise l'ensemble des paramètres considérés, mais son efficacité varie beaucoup avec la modalité d'apport. Le nombre de fractions, la proportion des apports et le stade de la culture fertilisé sont très influents.

Les résultats confirment qu'une fertilisation azotée appliquée en un seul apport est moins efficace que celle fractionnée. Le fractionnement améliore le rendement en paille de 20,6 %, en grain de 24 % et la teneur en protéines du grain de 11 %.

La plus efficace des 19 modalités fractionnées étudiées est celle en 3 apports, répartis entre le début tallage, épi 1cm et 2 nœuds. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des apports de 25 % des besoins au début tallage, 50 % à l'épi 1cm et 25 % au stade 2 nœuds. Cette répartition a permis d'améliorer le rendement en grains de 86,7 % (+ 19 qx /ha), en paille de 112,1 % (+34 qx /ha) et la richesse en protéines du grain de 59 % (+ 6 %).

Mots clés : Céréales, Blé dur, *Triticum durum* desf., variété Waha, Fertilisation azotée Fractionnée, stade d'apport azoté, zone semi-aride.

ملخص

أجريت الدراسة قصد تحسين طرق و فترات التسميد الأزوتي المقسم على عدة مراحل، و الخاص بالمحاصيل الكبرى الشتوية.

التجربة خصت صنفا محليا من القمح الصلب (واحة)، ضمن نظام زراعي حقل في منطقة شبه جافة. في هذا السياق، تم اختبار مجموع 22 كيفية من التسميد الأزوتي، لكمية مقدرة ب 115 وحدة أمونترات 33.5 % لكل هكتار. خلال التجربة تم قياس الكتلة النباتية الهوائية عند الإسبال و عند النضج، المردود و مكوناته، كمية الأزوت و البروتين في الحبات.

النتائج أثبتت أن الأزوت يؤثر بشكل إيجابي على الإنتاج و مكوناته، هذا التأثير يتغير حسب كيفية التسميد، عدد مراحل و كميات التسميد في كل مرحلة. كما بينت أن التسميد المقسم على عدة مراحل يحسن بمقدار 20.6% منتج الكتلة الهوائية (كتلة بدون سنابل) عند النضج، 24% مردود القمح و 11% كمية البروتينات. من بين نتائج 19 كيفية للتسميد المقسم على عدة مراحل، الكيفية المقسمة على ثلاثة مراحل (25% في بداية التفريخ، 50% في بداية الصعود و 25% عند طور الساق بعقدتين) أعطت أفضل النتائج، بحيث تم تحسين المردود ب 86.7% (+19 قنطار / هكتار)، الكتلة النباتية بدون سنابل عند النضج ب 112.1% (+34 قنطار / هكتار) و كمية البروتينات ب 59% (+6%).

الكلمات المفتاحية : الحبوب، القمح الصلب، *Triticum durum* desf.، التسميد الأزوتي المقسم، مرحلة التسميد الأزوتي، المنطقة شبه جافة.