

LES NOUVEAUX OUTILS DU PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTEE DU BLE DUR EN MILIEU SEMI-ARIDE.

Djamel BELAID. Enseignant chercheur. L.E.G JEAN ROSTAND. Laboratoires de Sciences de la Vie et de la Terre. 60500 Chantilly. Djamel.BELAID@ac-amiens.fr

Communication au 1er séminaire international
Problématiques agronomiques en régions arides et semi-arides (SIAZA1)
Batna du 28-29 au 30 octobre 2013.

Résumé:

Les conditions pédo-climatiques des zones semi-arides sont contraignantes pour la culture du blé dur. La fertilisation azotée doit permettre un rendement optimum et une qualité du grain. Actuellement, les préconisations de fumure ne prennent pas en considération la fourniture en azote du sol. Ces fournitures peuvent cependant être quantifiées grâce à la mesure des reliquats azotés en sortie d'hiver. Combinées à la méthode des bilans azotés, il est alors possible d'établir des préconisations fiables. En cas d'intensification, de nouveaux outils permettent d'affiner le niveau et le positionnement du dernier apport d'azote. Les engrais minéraux ne sauraient cependant constituer la seule ressource d'azote des plantes. La minéralisation de l'azote organique et la fixation symbiotiques constituent des sources non négligeables dans le cas des conduites extensives. Des apports exogènes (boues résiduelles) ainsi que des techniques de travail du sol tel le semis direct peuvent permettre d'augmenter le taux de matières organiques du sol.

Les nouveaux outils du pilotage de la fertilisation azotée du blé dur en milieu semi-aride.

Les conditions pédo-climatiques des zones semi-arides sont contraignantes pour la culture du blé dur. La fertilisation azotée doit permettre un rendement optimum et une qualité du grain. Cependant, en conditions semi-arides, la non maîtrise des doses d'azote peut constituer un manque à gagner important. Des apports faibles d'azote réduisent le potentiel de la culture tandis que de trop forts apports ont un effet dépressif sur le rendement.

Le calcul des apports d'azote du blé dur doit donc reposer sur la méthode des bilans azotés. Aux besoins de la plante, il s'agit d'apporter l'azote nécessaire tout en tenant compte de la fourniture du sol. Mais, la fourniture de l'azote par le sol est tributaire de la richesse du sol en matières organique, des antécédents culturaux (historique de la parcelle) et surtout des périodes de minéralisation automnale et printanière. Enfin, de part la nature des sols et la pluviométrie, les zones semi-arides présentent des productivités contrastées.

Dans ces conditions, il s'agit:

- de déterminer les doses d'azotes les plus adaptées et pour cela d'appréhender le niveau d'azote minéral du sol en sortie hiver lors de la reprise de végétation,
- de proposer les pratiques de fertilisation azotées adaptées aux différents niveaux d'intensification,
- de proposer les outils de modélisation les plus appropriés aux pratiques de fractionnement de l'azote.

DES CARACTERISTIQUES PEDO-CLIMATIQUES CONTRAIGNANTES

Le milieu est caractérisé par un fort déficit hydrique lié à une pluviométrie réduite et inégalement répartie durant l'année. Les températures sont basses en hiver mais dépassent dès le printemps 30°C. La période de développement du blé dur se trouve donc réduite. Les sols sont caractérisés par un faible taux en matières organiques souvent bien inférieur au taux de 2% souhaité (MAZOYER, 1970). Il en est de même en Tunisie (BEN HASSINE 2008) « les teneurs des sols en cette matière organique sont souvent inférieures à 2 % avec quelques exceptions où on peut même trouver des valeurs supérieures à 3 %. Si elle influence nettement le pouvoir d'échange des sols, cette matière organique participe faiblement à la dynamique d'échange de cations du fait de ses faibles réserves (particulièrement le potassium). C'est grâce à leurs argiles que ces sols acquièrent parfois de fortes CEC pouvant dépasser les 30 meq/100 g ». Analysant les sols de la région Fisdis-El-Madher (Batna) CHERRAK (1999) note qu'ils « sont dans l'ensemble composés de 48% d'argile, 43% de limon et 9% de sable avec une teneur élevée en calcaire total (28.6%) et pauvre en matière organique (<1%).

Une telle situation handicape l'approvisionnement hydrique de la plante mais également le flux d'éléments minéraux vers les racines. Ce contexte crée une situation d'incertitude permanente pour l'agriculteur.

La fertilisation azotée consiste essentiellement en des apports d'azote sous forme d'urée. Il est très peu fait appel à l'azote que pourraient apporter par des légumineuses dans la rotation ou aux restitutions organiques. Il s'agit d'une conception minéraliste de l'alimentation des plantes.

Les rotations dominantes sont jachère pâturée ou travaillée puis blé. Les exploitations les plus modernes résorbent la jachère au profit des fourrages (dont pois et féverole), légumes secs.

Le travail du sol est essentiellement réalisé à l'aide d'outils à disques (charrues et cultivateurs disques multi-disques). Les outils à dents sont peu présents. Le labour et de pseudos techniques culturales simplifiées dominent. Ces pratiques de travail du sol ont pour effet de favoriser la minéralisation des matières organiques (BELAID, 2013). Le non labour avec semis direct fait l'objet d'initiatives encore limitées.

L'association de la céréaliculture à l'élevage ovin a pour conséquence une absence d'enfouissement des pailles. Ces pailles et chaumes constituant une part de la ration des animaux durant l'été et l'automne. Le fumier d'ovins est le plus souvent dirigé vers les parcelles de cultures maraichères irriguées.

BLE DUR ET DYNAMIQUE DE L'AZOTE DU SOL.

L'azote possède deux particularités. De tous les éléments impliqués dans les grands cycles biogéochimiques, il est celui qui améliore le plus la productivité des végétaux et celui qui est très largement contrôlé par des processus microbiens. Il s'agit donc de cerner sa disponibilité saisonnière dans le sol.

A-Effet de l'azote sur le rendement et la qualité du blé dur.

L'élaboration du rendement du blé dépend de deux composantes (exprimé en poids de grains récoltés par unité de surface) : le nombre de grain par unité de surface et le poids moyen d'un grain. Différents essais en conditions semi-arides montrent un net effet positif de l'azote sur le rendement. La principale composante du rendement améliorée par l'azote est le nombre de gains par unité de surface ATI (2010), LATIRI-SOUKI et *al.*, (1992).

La composante « poids d'un grain » est cependant liée aux conditions d'alimentation hydrique lors de la phase de remplissage du grain. L'azote en favorisant le nombre de grains par unité de surface peut avoir, en cas de déficit hydrique un effet dépressif sur le rendement par le biais du poids d'un grain plus faible (BELAID, 1987). Afin d'améliorer la qualité semoulière du grain, un essai réalisé à Sétif montre qu'outre le fractionnement des doses d'azote, un apport tardif est recommandé (Tableau 1).

Fractionnement dose d'azote.	1/3 semis + 2/3 stade épi 1 cm	1/3 semis + 1/3 stade épi + 1 /3 montaison	2/3 stade épi 1 cm + 1/3 montaison	1/3 stade épi 1 cm + 2/3 montaison
Dose apportée	46 unités 92 unités	46 unités 92 unités	46 unités 92 unités	46 unités 92 unités
Rendement (qx/ha)	32,11 36,76	33,61 38,28	31,51 36,76	34,71 37,6
Taux de protéines	11,63 11,83	12,36 13,20	11,26 11,76	11,73 11,96
Taux de mitadinage	10 8,33	9,33 7,83	9,16 8,66	8,53 9,3

Tableau 1: Préconisations de fumure azotée en zone semi-aride sur blé dur (*site ITGC, 2013*).

L'apport de 92 unités d'azote, fractionnés (semis, stade épi à 1cm, montaison) permet d'obtenir le meilleur rendement et la meilleure qualité du grain dans les conditions de l'année (bonne pluviométrie avec 362 mm notamment en avril et particulièrement en mai).

AISSA et MHIRI (2002) notent également en conditions semi-aride, l'importance des interactions entre azote et potassium. Ce dernier peut être apporté en partie sous forme de pulvérisation foliaire.

B-Préconisations et reliquats azotés.

En Algérie, les préconisations de fumure azotée des services agricoles sont souvent exprimées en doses moyennes à apporter sur la culture. Or afin d'atteindre les objectifs de rendement et de qualité, un pilotage plus précis de la fertilisation est nécessaire. La méthode des bilans azotés est un moyen de répondre aux besoins de la plante tout en

considérant les flux d'azote dans le sol. Cette approche implique de prendre en compte l'azote issu de la minéralisation de l'azote organique du sol. Elle peut être réalisée par la mesure du reliquat azoté en sortie hiver, après la phase de lixivation provoquées par les pluies hivernales. Son principe est de soustraire aux besoins azotés de la culture les fournitures du sol en azote (Tableau 2).

Besoins de la culture	Fournitures du sol
Objectif de rendement x besoins de la plante	Reliquat sortie hiver (RSH) + effet du précédent + azote absorbée sortie hiver + minéralisation de l'humus du sol + amendements organiques + effet prairies + effet CIPAN + azote apporté par l'eau d'irrigation
	Dose conseillée = Besoins de la culture – Fournitures du sol.

Tableau 2: Principe de la méthode des bilans azotés. CIPAN: Culture Intercalaire pour Piège à Nitrates. Les besoins du blé dur sont déterminés en multipliant le rendement (qx/ha) escompté par 3,5 kg d'azote.

Malgré les possibilités de mesurer l'azote minéral du sol, ELALAOUI (2009) note étrangement à propos de la méthode des bilans azotés, que dans les conditions marocaines, « l'application de cette méthode est relativement délicate en raison de la difficulté d'estimer correctement les niveaux de certains paramètres comme l'azote minéral, le lessivage et la dénitrification, en plus de leur variabilité extrême au cours du cycle de la culture ». Le même auteur estime « l'azote minéral provenant de la matière organique est variable et se situerait entre 10 et 50 unités d'azote par hectare ».

C-Une variabilité extrême de l'azote minéral du sol.

Contrairement au phosphore ou au potassium, l'azote minéral du sol est sujet à de fortes variations saisonnières. La réalisation de mesures (reliquat azoté) montre une grande variabilité (Tableau 3). En absence de données locales concernant les reliquats azotés, il est intéressant de se pencher sur les mesures réalisées par la Chambre d'Agriculture de l'Hérault (France).

Années	Kg d'azote du sol après analyse fin janvier		
	Minima	moyenne	Maxima
2005	20	40	62
2006	61	107	162
2007	80	137	159
2008	40	71	138
2009	40	104	198
2010	42	77	118
2011	20	63	158

Tableau 3: Moyennes et fourchettes des teneurs en azote mesurées derrière blé dur (horizon 0-60 cm) dans la zone Mauguio-Lunel de 2005 à 2011 (Chambre d'Agriculture de l'Hérault, 2011).

L'observation de ces niveaux de reliquats azotés en fonction de la pluviométrie automnale montre des corrélations significatives (Tableau 4).

Reliquats azotés entrée hiver	Pluviométrie automnale (septembre à novembre) à Mauguio (Hérault France).	Années
359	63	2011
296	77	2010
294	38	2005
248	107	2006
214	71	2008

134	137	2007
126	104	2009

Tableau 4: Niveau moyen de reliquats azotés et pluviométrie automnale* (Service Productions Végétales/CL Chambre d'Agriculture de l'Hérault, 2012).

(*) Le reliquat azoté entrée hiver est estimé ici dans un but de réduire les cas de pollution des nappes phréatiques par les nitrates. Dans le cas du pilotage de la fertilisation azotée, c'est le reliquat sortie hiver qui est pris en compte.

La minéralisation de l'azote organique dépend des conditions d'humidité et de température. Ainsi, lorsque le sol est humide, elle est de l'ordre de 0,15 kg/ha/jour si la température moyenne est de 5°C et de 0,30 kg/ha/jour si elle atteint 10°C. En l'absence de données locales concernant les reliquats azotés, la grande variabilité des niveaux de pluies automnales dans les conditions algériennes indique que l'azote minéral du sol (en entrée hiver) peut être sujet à de fortes variations. En 1995, par exemple, les pluies automnales à Sétif ont été de 103,9 mm contre seulement 38,7 en 1996.

Mais cette variabilité inter-annuelle se double d'une variabilité selon le précédent cultural (Tableau 3). Le niveau moyen d'azote du sol mesuré à la sortie de l'hiver varie selon différents précédents (Chambre d'Agriculture de l'Hérault 2010). Il peut être de seulement 65 kg d'azote par hectare contre 118 kg derrière melon voire 104 kg derrière blé dur. Mais pour un même précédent ces valeurs varient. Ainsi, une moyenne de 104 kg peut recouvrir des parcelles avec un reliquat azoté de 40 kg/ha et d'autres à 198 kg/ha (Tableau 5).

Précédents	Moyenne (kg N/ha)
Blé dur	104 (40* à 198**)
Melon	118 (70 à 135)
Colza	77
Maïs semence	65
Pois protéagineux, pois-chiche.	121

Tableau 5: Niveau moyen d'azote du sol mesuré à la sortie de l'hiver selon différents précédents. (Chambre d'Agriculture de l'Hérault 2011).

(*) Mesure sur une parcelle avec une fumure ajustée (prise en compte des reliquats) et dans le cas d'un blé dur ayant atteint le rendement objectif.

(**) mesure correspondant à un blé dur en sol riche en matières organiques avec une fertilisation non ajustée (cumul) et un rendement réalisé à 70% du rendement objectif.

D-Azote minéral du sol et historique de la parcelle.

Cette variabilité dépend également de l'historique de la parcelle: précédent cultural (jachère, légumineuses, autre céréale), réalisation du rendement réel par rapport au rendement espéré concernant la culture précédente, fertilisation azotée avec ou non mesure de l'azote minéral du sol, amendements organiques sur les dix dernières années.

En zone semis aride, malgré l'apparente homogénéité du précédent cultural majoritairement constitué par la présence de jachères, les situations culturales et donc les niveaux de reliquats azotés en sortie hiver peuvent être variés. Par ailleurs, il est des situations où cette jachère est progressivement résorbée. Aussi, la mesure du reliquat en sortie hiver s'avère nécessaire et cela d'autant plus que les sols sont profonds.

Les cas de précédents jachère peuvent comporter des jachères pâturées ou travaillées. Dans le cas d'une jachère travaillée, plusieurs facteurs peuvent influencer la fourniture d'azote minéral. C'est le cas de la date de travail du sol, du type d'outils (charrue ou façons superficielles, outils à disques ou à dents).

Dans les régions céréalières semi-arides, ABBAS, et ABDELGUERFI (2005) notent que « les deux types de jachères (pâturée et travaillée) sont intimement liés. Chez un même exploitant, le choix du type de jachère à mettre en place se fait :

- en fonction de la pluviométrie : si elle est jugée suffisante, la jachère peut être travaillée (labourée au printemps) pour favoriser les céréales de la prochaine campagne agricole en accroissant les réserves hydriques ;
- en fonction de la qualité de la parcelle : les bas-fonds, par exemple, constituent souvent des jachères travaillées ;
- en fonction de l'éloignement ou de l'accessibilité de la parcelle: les terres difficilement pâturables sont plutôt

labourées au printemps.

Dans les autres cas (pluie insuffisante, terres plates et peu profondes, parcelles facilement accessibles...), beaucoup plus fréquents, on trouve généralement une jachère pâturée. »

Enfin, une jachère pâturée peut présenter une proportion plus ou moins grande d'espèces de légumineuses naturelles et donc une mobilisation variable de l'azote atmosphérique. Une telle jachère assolée ou non avec un blé historiquement désherbé au 2-4D ne comportera pas la même population de medicago (ABBAS, ABDELGUERFI 2005).

Les cas de résorption de la jachère montrent l'installation de lentilles, féveroles ou pois fourragers comme précédent au blé dur (BEHAMMADI 2011). Enfin, la distance de la parcelle en jachère par rapport à la bergerie ou étable peut déterminer la fréquence d'éventuels amendements organiques. De même que l'existence d'une irrigation d'appoint peut influencer le taux de matières organiques du sol et de ce fait là la fourniture d'azote minéral par le sol.

Enfin l'effet de la profondeur du sol influe considérablement sur le niveau de reliquat azoté (Tableau 6):

	Sol superficiel (< 30 cm)	Sol moyennement profond	Sol profond (>90 cm)
Pailles enlevées	15	40	55
Pailles enfouies	15	50	65

Tableau 6: Synthèse des reliquats azotés dans l'Yonne 89 (Chambre d'Agriculture 2007)

L'AZOTE, UN CYCLE ASSOCIE A CELUI DU CARBONE.

Dans une réflexion sur l'évolution des pratiques de fertilisation azotée en Europe CLEYET-MAREL et HINSINGER (2000) notent qu'une « des particularités de l'entrée naturelle de l'azote dans l'écosystème sol-plante par voie biologique est d'associer de façon étroite le cycle de l'azote et celui du carbone. Ceci explique également que, pendant très longtemps, la fertilité du sol, en particulier sa composante azotée, ait été associée de façon intuitive puis raisonnée à la teneur en matières organiques du sol ». Or, selon ces mêmes auteurs, le « lien étroit et incontournable entre la teneur totale du sol en matières organiques et le pouvoir nutritif azoté du sol a été cassé avec la mise au point de la synthèse de l'ammoniac par le procédé Haber ».

L'évolution des tonnages des engrais azotés annuellement utilisés montre que ce découplage s'est également opéré en Algérie. De ce fait, trop souvent le raisonnement de la fertilisation azotée est faite de façon simpliste. Il doit « être considéré dans sa globalité et il est nécessaire de considérer distinctement l'azote minéral et l'azote organique pour évaluer précisément les flux entre ces deux compartiments et la culture en place ». CLEYET-MAREL, HINSINGER (2000).

Selon l'année climatique et selon le niveau d'intensification en zone semi-aride, l'utilisation de l'azote minéral pourrait constituer toute ou partie de la fertilisation azotée. L'utilisation de ce type d'azote peut se faire selon plusieurs approches: préserver d'une trop forte minéralisation la matière organique produite annuellement, enrichir le sol par des apports exogènes ou favoriser la fixation de l'azote atmosphérique par voie symbiotique grâce à des légumineuses.

A-Préserver le compartiment organique du sol.

Après 8 années d'essais ANGAR et al., (2010) notent dans les conditions semi-arides de la Tunisie, une amélioration du taux de matière organique qui concerne tous les horizons du sol (Tableau 7). Amélioration confirmée dans les mêmes conditions au Maroc par BESSAM et MRABET (2001).

Profondeur du sol.	Avec semis conventionnel	Avec semis direct
0 – 10 cm	1,5	2,17
10 – 20 cm	1,3	2,1
20 – 30 cm	1,5	2,05
30 - 40 cm	1,5	1,9

Tableau: 7 Taux de matière organique du sol selon le type de semis (ANGAR et al., 2010).

Sous climat tempéré des travaux d'Arvalis (ex-ITCF) montrent le rôle des racines dans cet enrichissement en matières organiques (Tableau 8).

Profondeur du sol.	Biomasse racinaire en kg/ha.		
	Labour	Travail superficiel	Semis direct
0 – 20 cm	1750	2500	4500
20 – 40 cm	1500	500	1250
40 – 60 cm	750	250	750
Total	4000	3250	6500

Tableau 8: Evolution de la biomasse racinaire en fonction du type de travail du sol. ITCF-APC Auzeville (France) 1982 sous culture de blé.

En conditions semi-arides, ZAABOUBI (2007) note l'effet des différents outils de travail du sol sur la porosité du sol et le développement racinaire.

B-Enrichir le compartiment organique du sol.

Le maillage progressif du territoire national par 142 stations d'épuration permet d'envisager une large utilisation des boues résiduaires. Plusieurs études locales se sont penchées sur leur utilisation comme amendements organiques. Suite à des essais réalisés à Sétif sur du blé dur ATI (2010) montre que les parcelles ayant reçue des boues résiduaires présentent un rendement de 34,8 quintaux contre seulement 14,7 quintaux pour les parcelles témoins (Tableau 9). CHERAK (1999) note une amélioration de la capacité de tallage herbacée chez l'avoine conduite sur sol amendée avec des boues résiduaires.

Rendement (qx/ha).	Témoin	20 tonnes/ha	30 tonnes/ha	40 tonnes/ha
Grains.	14,7	30	34,2	34,8
Paille.	16,9	44,9	49,6	53,4

Tableau 9: Effet de l'apport de boues résiduaire sur le rendement du blé dur (ATI, 2010).

De nombreux travaux universitaires montrent une augmentation de rendement des cultures recevant des boues résiduaires. Le taux de matière organique du sol se trouve amélioré, il peut passer de 1,2% à 2,4% suite à des apports successifs durant 4 années (BARBATIK et al., 1985). La capacité de rétention du sol en eau également améliorée.

C-Favoriser la fixation de l'azote atmosphérique.

Des travaux menés en zone semi-aride, en Tunisie montrent qu'il est possible d'installer ce type de couvert sur des sols dégradés en implantant une légumineuse pionnière (GRANIER, 2010). L'exploitation raisonnée de ce système de culture aura permis en 6 années le retour à la productivité des terrains traités. Le taux de matière organique du sol passe de moins de 1% à 5%. On passe ainsi d'une offre fourragère de cueillette à une véritable culture des fourrages. La charge ovine à l'hectare est ainsi améliorée.

Dans le système australien, les prairies temporaires ou les jachères améliorées remplacent la jachère pâturée. Selon PUCKRIDGE et FRENCH (1983) elles offrent les avantages suivants: « une production supérieure de fourrage, une meilleure qualité de grain pour les céréales, l'économie d'engrais azotés, la stabilisation de la production et une amélioration de la fertilité du sol ». Le précédent médicago permet d'améliorer de plus d'un point le taux de protéines des grain de blé (Tableau 10).

Rotation	Rendement du blé (quintaux/ha)	Taux de protéines du grain de blé (%)
Blé sur blé	10	9,1

1 année médicago, une année blé	14,5	10,9
3 années médicago, 1 année blé	16,2	11,9

Tableau 10: Effet de la rotation sur le niveau de production du blé et sur sa qualité (Shackley 2000).

Il est également possible d'améliorer les performances des jachères pâturées en favorisant les légumineuses sauvages par un apport d'engrais phosphatées, un scarifiage, une meilleure gestion de la charge d'ovins et des périodes de pacage (ABBAS, ABDELGUERFI, 2005).

Il apparaît que la préservation ou l'augmentation du taux de matières organiques du sol peut permettre d'augmenter la fourniture d'azote minéral par le sol. Il s'agit d'arriver à quantifier le niveau de ces fournitures avant tout apport d'azote.

MODELISATION DES BESOINS AZOTES DU BLE DUR.

La difficulté des préconisations de la fumure azotée sur céréales à pailles provient de la part variable de l'azote minéral issue de la minéralisation de l'azote organique du sol. Dans les conditions du Sud de la France, en fonction du climat de l'année, celle-ci peut varier de 80 à 150 unités N/ha contre 10 à 50 unités au Maroc (ELALAOUI 2009).

Afin d'arriver à des préconisations fiables de fertilisation azotée, le conseil technique se doit de connaître cet azote minéral du sol. Celui-ci est en effet nécessaire pour la méthode utilisée: la méthode des bilans azotés. L'estimation des quantités d'azote minéral disponibles à la reprise de végétation des céréales à paille, repose sur deux types de méthodes:

- déterminer le reliquat azoté sur ses parcelles (ou l'estimer à partir d'un réseau de parcelles de références),
- procéder au calcul de ce même reliquat d'azote à partir de modèles développés par des Institut Techniques.

Enfin, une fois ce reliquat connu ou estimé, le fractionnement de la dose d'azote prévisionnelle peut être ajusté en cours de végétation grâce plusieurs outils d'aide à la décision ou « outils d'ajustement de la dose ».

A-Des outils pour calculer ou estimer le niveau de fertilisation azoté.

Les reliquats azotés sont mesurés à la parcelle ou bien estimés. La première méthode est la plus fiable. Elle permet un pilotage incomparable de la fertilisation. Elle est cependant fastidieuse.

-La méthode des reliquats azotés en sortie hiver.

Ces mesures peuvent être effectuées chez des agriculteurs qui en font la demande ou bien sur un réseau de parcelles de référence faisant partie d'un observatoire. L'opération comprend différentes étapes: prélèvements de sols représentatifs des parcelles, fiches de renseignements (précédent cultural et rendement de la culture précédente, fertilisation, l'objectif de rendement pour la culture en cours) stockage puis l'expédition des échantillons vers un laboratoire d'analyses nécessite avec respect de la chaîne de froid afin de bloquer la minéralisation des échantillons enfin centralisation des résultats afin d'élaborer des synthèses par type de sols et de précédent cultural. L'objectif de rendement doit être estimé avec soin. Il correspond à un objectif de rendement historique: rendement moyen calculé sur les 5 dernières années après avoir écarté les 2 extrêmes. La mesure du reliquat (quand elle est possible) permet une bonne estimation du stock initial d'azote, mais ne représente qu'une partie du conseil final. La qualité des renseignements concernant l'historique de la parcelle est primordiale pour le traitement informatique.

En général, il est préférable et conseillé de réaliser un reliquat à la parcelle plutôt que de se baser sur un reliquat moyen. Un reliquat moyen ne peut refléter la réalité de la parcelle, surtout en cas de précédent riche ou de rendement objectif non réalisé sur le précédent.

-Disposer d'un réseau de parcelles de références.

Afin de disposer d'un nombre suffisant de parcelles analysées (réalisation du reliquat azoté en sortie hiver), il est intéressant de disposer d'un réseau d'observations fiables. Les parcelles de référence doivent être choisies avec précision. Elles doivent permettre de « disposer de situations représentatives de la variabilité pédo-climatique régionale, de la disponibilité des agriculteurs pour recevoir le préleveur et fournir les informations techniques concernant les parcelles » (BOSCHER , LAFON 2012). Les reliquats mesurés dans un tel réseau englobent ainsi des cas-type: (type et profondeur de sol, succession culturale ou type d'exportation des pailles et chaumes ou types d'amendements organiques).

-Estimer les reliquats azotés.

Arvalis développe un modèle d'estimation de reliquats azotés en sortie hiver prenant en compte principalement 4 paramètres. Concernant la minéralisation de l'année précédente: la valeur donnée par Arvalis chaque année. Elle varie entre 60 unités en année très défavorable, jusqu'à 140. Sont pris en compte les pluies du 1er octobre au 1er mars. Elles interviennent dans le calcul du coefficient de lessivage de l'azote minéral du sol. Ce coefficient est estimé d'après la formule de Burns. Les types de sols et la profondeur sont paramétrables. Le bilan entrée-sortie sur le précédent est classique. Cependant pour les céréales à paille enfoui, le prélèvement est augmenté de 0,3 unités par quintal. Enfin concernant les engrais de ferme avant la culture, leur effet obtenu à partir de leur valeur et d'un fichier coefficient d'utilisation de l'azote des effluents. Les valeurs sont classiques, en tenant compte du type d'effluent, du type de culture et de la période d'apport. La part de l'effet direct qui entre dans le reliquat est obtenu en appliquant un coefficient spécifique.

Des méthodes spécifiques sont appliquées en France pour les sols peu profonds. La mesure du reliquat azoté en sortie hiver est parfois délicate du fait de sols superficiels ou de la présence de cailloux. La méthode CAU est alors utilisée. La fourniture du sol (P_o) est estimée à l'aide de parcelles non fertilisées (ou de simulations à partir de références expérimentales et du climat). On estime également le coefficient apparent d'utilisation (CAU) de l'azote à partir de parcelles recevant des doses de fertilisation croissantes. L'azote apporté par les produits résiduels organiques (PRO) sont déduits.

$$\text{Dose X} = (\text{besoins} - P_o - \text{effet PRO}) / \text{CAU}$$

Cette méthode nécessite des références locales importantes: besoin de réseau de témoins non fertilisés par précédent cultural et par type de système de culture et de données régionales pour le CAU.

Au Maroc, une méthode est proposée pour la détermination de la dose optimale pour le blé (ELALAOUI 2009)

A l'échelle d'une région et pour une culture donnée, la dose optimale d'azote peut être déterminée à partir d'essais dans lesquels la culture donnée a répondu positivement à l'apport d'azote. Dose de N à apporter (kg N/ha) = $G \times (R - r) / \text{CUA}$.

Avec:

- G (quantité de N requise pour produire 1 quintal de grain) = 3 kg de N par quintal de grain en irrigué et 3,5 à 4 kg en bour favorable.
- R = Rendement objectif en qx/ha.
- r = Rendement permis par la fertilité propre du sol (témoin sans N) en qx/ha.
- CUA = Coefficient d'utilisation apparent de N de l'engrais. CUA = 60% en irrigué et 50% en bour favorable.

B-Des outils pour piloter la fertilisation azotée.

1) Date du déclenchement du premier apport d'azote.

Afin de mieux positionner la dose à apporter lors du premier apport, il est conseillé de recourir à la technique de la Bande Double Densité (B.D.D) appelée aussi méthode LIMAUX. Elle consiste à semer à double dose une petite zone de parcelle. Cette double dose de semis provoque une plus forte utilisation de l'azote du sol. Elle permet donc d'identifier visuellement le début de l'absorption de l'azote du sol et le début de carence azotée. Il est alors possible de déclencher le premier apport d'azote lorsque cette bande se décolore par rapport au reste de la parcelle. En effet, cette décoloration traduit une « faim d'azote » de la culture par anticipation par rapport au reste de la parcelle.

2) Dates du fractionnement de l'azote.

Les outils de pilotage (Jubil, N-Tester, GPN Pilot, Farmstar,) indiquent le niveau de la dose complémentaire à apporter et à quelle période. Le calage des outils de pilotage GPN Pilot, N-Tester nécessite d'installer lors du 2ème apport d'azote une placette surfertilisée (double dose) d'environ 100-200 m²

Jubil et Ramses: une valeur fiable mais longue. Cette méthode a été mise au point en France au début des années 90 conjointement par Inra et Arvalis. Elle consiste en un dosage des nitrates dans la plante à partir du jus de bas de tige d'une vingtaine de maîtres brins et dosage par bandelettes colorimétriques). Ce dosage permet la lecture d'abaques permettant un conseil de fumure en fonction de la variété, du stade et de la densité de la culture. L'intérêt de la méthode réside dans sa fiabilité. Mais son utilisation est fastidieuse. Elle nécessite une phase de prélèvements à la parcelle (tôt le matin), une phase d'extraction du jus de tiges puis une phase de dosage en laboratoire. La fiabilité de la méthode est assurée par un prélèvement de tiges représentatif de la parcelle et par la réalisation d'une double analyse du jus de tiges. Cette méthode est très utilisée par des exploitations d'élevage aux sols riches en matières

organiques et souhaitant tenir compte de la minéralisation printanière. Les résultats obtenus indiquent comme préconisations l'impassé (0 unités d'azote) voire des apports de 80 unités d'azote.

Hydro-N-Tester: une solution plus pratique. Cette méthode repose sur la mesure de la quantité de chlorophylle d'une trentaine de feuilles par parcelle. Celle-ci est en effet corrélée au niveau de nutrition azotée de la plante. L'opérateur dispose d'un appareil de mesure constitué d'une pince comprenant d'un côté une source de lumière et de l'autre un capteur. En pinçant les feuilles il est possible de lire la transmittance et donc la lumière absorbée par la feuille. Les mesures sur parcelles puis la saisie sur internet permet de recevoir des préconisations personnalisées. Sur la base d'un conseil prévisionnel de fumure azotée réalisée par la méthode des bilans et donc d'un reliquat azoté, il est donc possible d'ajuster le niveau du dernier apport d'azote.

GPN: une lecture du conseil au champ. Développé depuis 2006, cet outil consiste en un boîtier qui est tenu par un opérateur à environ 60 cm au-dessus de la végétation et qui se déplace lentement dans la parcelle. L'appareil est pourvu de deux capteurs qui mesurent l'intensité de la réflectance de la végétation et la densité de végétation. Ces paramètres sont mesurés toutes les 15 secondes. Le GPN permet d'obtenir un conseil de fertilisation en direct au champ selon la variété utilisée.

Cette méthode permet une fiabilité du même ordre que Jubil mais avec la possibilité d'une représentativité plus importante de la parcelle (zone de mesure plus grande) et pour un temps d'utilisation plus court (pour une dizaine de mesures, le temps est environ d'un quart d'heure). Le calage de l'outil nécessite la mise en place d'une zone de référence surfertilisée lors du stade « épi 1 cm ». Le coût de l'appareil est d'environ 2800 €.

Farmstar: vers l'agriculture de précision. Cet outil proposé par deux instituts techniques français (Arvalis et Cétiom) repose sur la télédétection. L'animation technique autour de cet outil est assurée par Arvalis pour les céréales, et par le Cétiom pour le colza. Comme pour la méthode GPN la méthode utilise la mesure de la réflectance de la culture à partir de vues aériennes. La précision des mesures permet d'accéder à un haut niveau de fiabilité. La définition est de 20 mètres sur 20 mètres. La carte des préconisations, repose donc sur environ 250 mesures par hectares. Un capteur positionné sur la cabine du tracteur et un équipement spécifique connecté à l'épandeur d'engrais permettent de moduler les doses intra-parcellaire.

N-SENSoR : un calcul instantané de la dose d'azote. Ce dernier outil correspond à une agriculture de précision. Comme avec le GPN, le N-SENSOR mesure la réflectance de la culture. Cependant, le capteur optique est installé au niveau de la cabine du tracteur. Au fur et à mesure de l'avancement du tracteur dans la parcelle, l'ordinateur de bord peut transmettre à chaque instant à l'épandeur d'engrais la dose d'azote à apporter selon les besoins de la culture. Ce type d'appareil encore peu répandu coûte environ 20000 €. En France les principaux utilisateurs sont des agriculteurs organisés en coopératives d'utilisation de matériel.

Conclusion sur ces outils dits « d'aide à la décision »:

Le pilotage de la fertilisation azotée passe donc par un passage obligé: la mesure du reliquat azoté en sortie hiver. En effet, selon COSPEREC (2013) « tous les outils de pilotage de la fertilisation azotée s'utilisent en complément de la méthode des bilans (reliquats). Pour ajuster une dose, il faut l'avoir au préalable calculée... ». Pour un positionnement optimal du premier apport la méthode Limaux est intéressante. Quant aux outils de pilotage, ils ne viennent qu'affiner le niveau et la date d'un troisième apport d'azote.

Il s'agit là d'outils « d'aide à la décision » et non pas d'outils « de décision ». Aussi, le ressenti de l'exploitant est primordial. Dans des conditions semi-arides, les préconisations concernant le dernier apport d'azote peuvent parfois être élevés alors que tout l'azote déjà apporté n'a pas été entièrement utilisé par la plante. Selon COSPEREC (2012), « pour que la mesure soit fiable, il est indispensable d'avoir un cumul de 15 mm d'eau entre le dernier apport d'azote et la mesure, avec un délai d'au moins 5 jours après le retour des pluies ».

Cette revue des outils d'ajustement de la dose utilisés en France, montre la préoccupation d'apporter les doses d'azote adéquates mais aussi de réduire les risques de lessivages de nitrates vers les nappes phréatiques.

C-Orge brassicole: exemple de pilotage de l'azote par la méthode des reliquats.

La production d'orge brassicole a la particularité d'exiger un taux de protéines des grains ne dépassant pas 11%. Tout dépassement de ce taux entraîne de fortes réfections de la part des organismes de collecte. Dans le cas d'une enquête sur les itinéraires techniques pratiqués par des agriculteurs du Nord du Bassin Parisien. Il est apparu que, pour de mêmes rendements, les taux de protéines les plus faibles correspondaient aux parcelles où avait été réalisée

la mesure du reliquat azoté du sol en sortie de l'hiver (Tableau 11).

	Dose d'azote (unités/ha)	Rendement Qx/ha	Calibrage	Taux de protéines du grain
Sans reliquat azoté.	90 à 112 unités	64,4	88	11,00%
Avec reliquat azoté.	90 à 112 unités	64,1	92	9,10%

Tableau 11: Résultats du pilotage de la fertilisation azotée sur culture d'orge de printemps sur la base de mesure du reliquat azoté (BELAID, 1993).

Connaissant, les quantités d'azote encore présentes dans le sol, le complément d'engrais azoté apporté lors de la reprise de végétation au début du printemps, a pu être déterminé avec précision.

CONCLUSION.

En conditions semi-arides, la fertilisation azotée constitue un bon marqueur des pratiques agricoles actuelles. Force est de remarquer que cette fertilisation repose actuellement sur la seule fourniture d'azote minéral par les engrais. Les forts besoins en azote du blé dur nécessitent de trouver des solutions originales afin de viser le rendement optimum en grain et la qualité semoulière exigée par les industriels de l'agro-alimentaire.

La forte variabilité pluviométrique est à l'origine d'une minéralisation ainsi que de fournitures hétérogènes d'azote minéral par le sol. Raisonner la fertilisation en milieu semi-aride nécessite donc de cerner avant tout la dynamique de l'azote du sol. La technique des reliquats azotés en sortie hiver s'avère être un outil indispensable. En situation de déficit hydrique, il est à rappeler l'effet dépressif de fortes doses d'azote sur le rendement. Son développement, sous forme d'un réseau de parcelles de référence chez des agriculteurs permettrait de (i) cerner plusieurs situations (type de sol, précédent cultural, restitutions organiques) et (ii) d'assurer des préconisations de fertilisation azotée plus fiables. La mise en place d'un tel réseau peut se faire en collaboration avec organismes de collecte, instituts techniques, services agricoles locaux, chambres d'agriculture et université. En effet, si la méthode du bilan reste la base de toute fertilisation azotée sérieuse, des adaptations et des simplifications sont possibles à la condition de disposer de références expérimentales et d'enquêtes à la parcelle.

Afin de piloter l'apport d'azote à la montaison, de nouveaux moyens d'analyse *in situ* du niveau de besoin d'azote par la plante existent. Ils doivent être réservés aux cas de haut niveau d'intensification céréalière, de blés durs de qualités et notamment aux parcelles irriguées. Un outil comme GPN s'avère facile à mettre en œuvre. Le coût de cet équipement nécessite cependant une utilisation groupée. Cela peut être envisageable avec un organisme de collecte engagé dans une politique d'amélioration de la qualité technologique des blés durs, un semoulier ou un fournisseur d'engrais azotés.

Par ailleurs, la fertilisation azotée ne saurait être considérée sous le seul angle minéral. On ne saurait sous estimer l'interaction entre les compartiments d'azote organique et minéral du sol et l'effet du climat. Afin de réduire les coûts de la fertilisation azotée et de tenir compte des sols à faibles potentialités, la préservation et l'enrichissement du stock de matières organiques du sol s'avèrent déterminante. A cet égard, différentes solutions sont envisageables.

-Le non-labour et notamment les techniques culturales simplifiées ou le semis direct représentent le facteur déterminant pour la préservation du stock de matières organiques du sol.

-La valorisation des surfaces fourragères par l'utilisation de légumineuses de type médicago lors de la jachère pâturée ou d'écotypes de vesce plus adaptés aux conditions semi-arides permettent des apports d'azote non négligeables dans la rotation.

-Des apports ponctuels de matière organique exogènes à l'exploitation (boues résiduelles, composts urbains) peuvent permettre de corriger des cas critiques. L'enfouissement de chaumes ou de pailles mérite également d'être envisagé.

Dans tous les cas, des dispositifs incitatifs (subventions) peuvent créer des impulsions décisives.

Seule, une fertilisation azotée raisonnée associée à des techniques de travail de sol valorisant correctement l'humidité du sol peut permettre de réduire l'effet de l'incertitude climatique sur les cultures de blé dur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.

AISSA A.D., MHIRI A., 2002 Fertilisation phospho-potassique du blé dur en culture intensive en Tunisie. *In*

Cahiers Agricultures. Volume 11, Numéro 6, 391-7, Notes de recherche.

ATI S 2010 *Étude de l'effet des boues résiduelles sur sol cultivé: dynamique du phosphore et son utilisation en zone semi-aride*. Mémoire de magister en Sciences Agronomiques. Université Hadj Lakhdar Batna. Département d'Agronomie. 62 p.

ABBAS K., ABDELGUERFI A., 2005. Perspectives d'avenir de la jachère pâturée dans les zones céréalières semi-arides. *In Fourrages* 184, 533-546

ANGAR H., BEN HAJ SALAH H., BEN-HAMMOUDA M., 2010 Semis direct et semis conventionnel en Tunisie: les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. *In Options Méditerranéennes Série A* 96, 53-59.

BARBATIK A., LAWARANCE JR., SIKPRA J., COLACICCO D., 1985 *Factors affecting the mineralization of nitrogen in sewage applied to soil*. *In Am.J.Soil Sci.* 49, 1403-1406.

BELAID D., 1987 : Etude de la fertilisation azotée et phosphatée d'une variété de blé dur (Hedba3) en conditions de déficit hydrique. Mémoire de magister. I.N.A 108p.

BELAID D., 1993 Enquête orge de Printemps. Chambre d'Agriculture de l'Oise. SUAD (ODASE). 6 p.

BELAID D., 2013 Amélioration de la fertilité des sols de grandes cultures en Algérie. Colloque international « 50 ans de formation et de recherche ». ENSA El-Harrach.

BENHAMADI A., 2011 Témoignage Algérie. Agriculteur, Benbadis, Constantine (Algérie) In : Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B. (ed.). 4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT, 2011. p. 89-90. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n°96). 4. Actes des Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct, Sétif (Algérie).

BEN HASSINE H., ALOUI T., GALLALI T., BOUZID T., EL AMRI S., BEN HASSEN R., 2008 Evaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones sub-humides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie. *In Agrosolutions. Vol. 19 (2), 1-17.*

BESSAM F., MRABET R., 2001. *Time influence of no tillage on organic matter and its quality of a vertic Calcixerol in a semiarid area of Morocco*. *In: Proceedings of international congress on conservation agriculture*. Madrid. Vol. 2, 281-286.

BOSCHER A. LAFON C., 2012 Blé dur : niveau des reliquats azotés à l'automne 2011. Chambre d'Agriculture de l'Hérault 4p.

CHAMBRE D'AGRICULTURE Midi Pyrénées 2012 Reliquats d'azote en Midi-Pyrénées. Bilan de 3 campagnes de suivi. Note n° 10. Chambre d'Agriculture Midi-Pyrénées. 4p.

CHERAK L., 1999 Incidences des eaux usées résiduelles sur la microflore et le comportement de l'avoine. Thèse magister Université de Batna (Algérie). 110 p.

CLEYET-MAREL J-C, HINSINGER Ph. 2000 Le sol milieu vivant, un territoire qui reste à découvrir et à valoriser. *In Oléagineux, Corps Gras, Lipides*. Volume 7, Numéro 6, 490-3, Dossier : "Agriculture, recherche et territoire".

COSPEREC Y., 2013 Blé: Pilotage de l'azote en végétation. *In Clé des champs N°12 -Bulletin des Groupes d'Etudes et de Développement agricole du Nord-Pas de Calais*.

ELALAOUI A.C., 2009 *In Bulletin Mensuel de Liaison et d'Information du PNTTA TRANSFERT DE TECHNOLOGIE EN AGRICULTURE* n°155

GRANIER M., 2010 La rénovation par la culture de terrains dégradés par une exploitation continue: Un itinéraire technique mis en place pour la réhabilitation d'un ensemble de parcelles en zone semi-aride supérieure dans la

région de Goubellat de 2003 à 2009. In *Options Méditerranéennes. Série A (96). Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. 117-121.*

HINSINGER P., 1998. How do plant roots acquire mineral nutrients ? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advances in Agronomy*, 64 : 225-65.

LATIRI-SOUKI K., AUBRY C., DORE T., SEBILLOTTE M., 1992 Elaboration du rendement en blé dur en conditions semi-arides en Tunisie: relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique. In *Agronomie*. 12, 31-43.

MAZOYER M 1970 *Agriculture et développement en Algérie*. Document photocopié. Centre Culturel Français d'Alger. 14p.

PUCKRIDGE S.W., FRENCH R.J. (1983): «The annual legume pastures in cereal-ley farming systems of southern Australia : A review», *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 9, 229-267.

SHACKLEY B.J., 2000. Crop management. In W.K. Anderson & J. Garlinge, eds. *The wheat book - principles and practice. Bulletin 4443*, p. 131-163. Perth, Australia, Agriculture Western Australia.

ZAABOUBI S 2007 Effets comparatifs de deux outils aratoires (disques et dents) et de différents précédents culturaux sur les propriétés physiques d'un sol cultivé en céréales dans la région de Timgad. Université de Batna - magister en sciences agronomiques.