

L'art de fractionner l'azote pour optimiser le rendement et la teneur en protéines du blé

Lilia Levy Häner et Cécile Brabant

Agroscope, Institut des sciences en production végétale IPV, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Lilia Levy, e-mail: lilia.levy@agroscope.admin.ch



Figure 1 | Impact de la fumure azotée sur diverses variétés de blé. Au premier plan, les parcelles n'ayant pas reçu de fertilisation azotée.

Introduction

Depuis 2015, les moulins paient les blés de la classe TOP aux centres collecteurs selon leur teneur en protéines (décision swiss granum, Sonderegger & Scheuner 2014). Chaque centre collecteur est libre de répercuter ou non cette mesure sur les producteurs, selon sa propre stratégie.

Agroscope a mis en place des essais pour tester différentes possibilités d'augmenter la quantité de protéines dans les grains de blé (et par conséquent de gluten humide) et pour préciser l'influence de ces critères sur la qualité boulangère. Le rendement en grains étant un critère fondamental pour la production, cette étude vise également à déterminer la fertilisation qui permettra d'atteindre un optimum entre rendement et qualité. Cet article traite des aspects agronomiques, tandis que le deuxième article (Brabant et Levy 2016) se concentre sur la qualité des récoltes.

Dispositif expérimental, observations et analyses

Six variétés de diverses classes de qualité – Runal Top et CH Claro (Top), Suretta et CH Combin (classe I), Levis (classe II) et Premio (référence française équivalent à la classe II) - ont été testées en deux lieux (Changins, VD et Goumoëns, VD) pendant trois ans (récoltes 2011 à 2013).

Huit procédés de fumure azotée ont été comparés: trois niveaux de fumure 0,140 et 200 kg N/ha combinés avec différentes variantes de fractionnement.

Le niveau de 140 kg N/ha a été décliné en cinq procédés se distinguant par le fractionnement de cette dose et le stade du blé lors des apports (tabl. 1). L'azote a été apporté sous forme de nitrate d'ammoniaque 27,5%.

L'efficacité de l'apport azoté a pu être assurée par une irrigation post-application à Changins, mais pas à Goumoëns. Ni des fongicides, ni des régulateurs de croissance n'ont été appliqués. Les essais étaient disposés en split-plot à trois répétitions, avec la fumure N comme procédé principal et la variété comme sous-procédé.

Les observations et mesures des paramètres suivants ont été réalisées: précocité, hauteur, nombre d'épis par m², rendement en grains, poids à l'hectolitre (PHL), poids de mille grains et teneur en protéines. Sur cette base, deux paramètres supplémentaires ont été calculés: l'exportation en protéines (rendement en grains * teneur en protéines) et le coefficient apparent d'utilisation de l'azote dans le grain (CAU, voir équation 1 adaptée de la formule proposée par Collin 2012). Le CAU mesure la valorisation par les grains de l'azote apporté et il a été calculé pour chaque parcelle ayant reçu de l'azote. Il met en relation la quantité supplémentaire d'azote dans les grains observée dans les procédés avec apport d'azote

par rapport au procédé sans apport d'azote avec la quantité d'azote apportée.

Les analyses de qualité, telles que le gluten humide, l'indice de Zeleny, les analyses rhéologiques et les divers types de panification, sont présentées et discutées dans l'article de Brabant et Levy (2016).

Équation 1 | Coefficient apparent d'utilisation de l'azote dans les grains (CAU)

$$CAU = [(QN_D - QN_0)/D]$$

QN_D : [rendement en grain par ha du procédé D à 0% d'humidité * teneur en protéines / 5.7]
 QN₀ : [rendement moyen en grain par ha du P1 à 0% d'humidité * teneur en protéines / 5.7]
 D : quantité d'azote appliquée dans le procédé azoté en question

Une évaluation économique rudimentaire (approche de la marge brute) a été réalisée en prenant en compte le prix indicatif des céréales en 2015 (Top: 52.– CHF/dt, classe I: 50.– CHF/dt, classe II: 49.– CHF/dt), un prix moyen du nitrate d'ammoniaque de 1,80 CHF/kg N, un coût moyen d'épandage des engrais de 89 CHF par ha et passage (matériel d'épandage, tracteur et chauffeur, tarif FAT), le barème de suppléments et réfections pour le poids à l'hectolitre de swiss granum ainsi que le nouveau règlement du paiement à la protéine pour les variétés de classe Top (Sonderegger & Scheuner 2014).

Les analyses de variance (ANOVA) et les tests pour les groupes d'homogénéité ont été réalisés avec le programme Statistica 12, les mises en valeur des coefficients de corrélation avec XLSTAT 2014.

Résumé ■ L'interprofession des céréales a instauré un système de paiement des récoltes basé sur la teneur en protéines pour les blés de la classe TOP. Agroscope a mis en place des essais pour étudier l'impact du fractionnement de la fumure azotée sur le rendement et la qualité du blé. Dans nos conditions pédoclimatiques, une répartition de 20-40-80 kg N/ha – le 3^e apport étant mis au stade CD 37 (dernière feuille pointant) – a donné d'excellents résultats, tant au niveau du rendement en grains que de la teneur en protéines. Les producteurs désireux de produire des grains à haute teneur en protéines peuvent être tentés de choisir les variétés les plus riches en protéines et de les conduire de façon très intensive avec un 3^e apport important au moment de la floraison. Toutefois, cette stratégie présente un risque très élevé de non assimilation de l'azote par la plante et de perte de rendement en grains. D'un point de vue économique, les variétés les plus productives sont également les plus rentables, même si elles appartiennent à des classes de qualité inférieures. L'étude a également mis en évidence que dans des situations de faible disponibilité en azote, une variété à paille haute et développant un grand nombre d'épis par m² est avantagée. Par contre, la taille de la plante devient un élément négatif pour la formation des grains dans les systèmes plus intensifs.

Tableau 1 | Quantité totale d'azote apportée annuellement et fractionnement de cette quantité pour les huit procédés azotés testés. P2 représente la pratique simplifiée, P3 correspond à un fractionnement classique en trois apports, P4, P5 et P6, avec un 3^e apport plus important et/ou tardif, visent à favoriser la synthèse des protéines, P7 et P8 sont les procédés les plus intensifs, avec priorité sur le rendement en grain (P7) ou sur la teneur en protéines (P8).

Procédé azoté	N total [kg N/ha]	1 ^{er} apport [kg N/ha]	Stade	2 ^e apport [kg N/ha]	Stade	3 ^e apport [kg N/ha]	Stade
P1	0	–	–	–	–	–	–
P2	140	60	CD 21	80	CD 30	–	–
P3	140	40	CD 21	60	CD 30	40	CD 37
P4	140	40	CD 21	60	CD 30	40	CD 59-61
P5	140	20	CD 21	40	CD 30	80	CD 37
P6	140	20	CD 21	40	CD 30	80	CD 59-61
P7	200	60	CD 21	80	CD 30	60	CD 37
P8	200	20	CD 21	40	CD 30	140	CD 59-61

CD 21: début du tallage, à la reprise de la végétation; CD 30: redressement (épis 1 cm);
 CD 37: apparition de la dernière feuille; CD 59-61: fin épiaison - début floraison

Résultats et discussion

Effets du milieu, de la variété et de la fumure azotée

La variété et le milieu (combinaison lieu x année) exercent un rôle important sur la plupart des paramètres observés (tabl. 2). La fumure azotée influence aussi significativement tous les critères étudiés, hormis le poids à l'hectolitre. Plusieurs interactions sont ressorties comme hautement significatives, mais avec un faible impact.

La variation du rendement en grains et de la teneur en protéines s'explique à parts presque égales par les influences du pédoclimat (milieu), de la fumure azotée et de la variété (fig. 2). Le choix variétal constitue ainsi le moyen le plus simple pour influencer la teneur en protéines. Parmi tous les paramètres étudiés, l'exportation en protéines est celui qui est le plus influencé par la fumure azotée (44%). Pour le CAU, les conditions du milieu expliquent plus de ¾ des variations observées.

La variation de la densité de tiges fertiles (épis/m²) est déterminée à 88% par l'effet du milieu (influence du tallage), tandis que le choix variétal et la fumure azotée ont un effet beaucoup plus modeste (5%). La hauteur des plantes peut varier considérablement. Après le milieu (61%), ce sont essentiellement le choix variétal (24%) et la fumure azotée (12%) qui contribuent à expliquer ces différences. Les conditions pédoclimatiques, telles que l'absence de précipitation lors de la récolte, sont cruciales pour un bon PHL (69%). De

plus, ce caractère est fortement dépendant de la variété (20%). Contrairement aux résultats d'autres essais réalisés auparavant (Levy *et al.* 2007), la fumure azotée n'a pas contribué à améliorer le PHL, comme l'avaient observé Charles *et al.* (2012). Quant à la taille des grains, ce sont essentiellement les conditions de l'année en fin de cycle (milieu) qui font fluctuer les valeurs de PMG (94%).

Effets de la fumure azotée

Au niveau du rendement en grains, le procédé P1 (aucune fumure azotée) se distingue très clairement des autres procédés (tabl. 3; fig. 3a). Les différences de rendement entre les procédés avec apports d'azote sont plus faibles. Ces essais montrent que le fractionnement de la fumure azotée est aussi important que le niveau de fumure, car il permet d'atteindre des rendements en grains semblables, malgré une quantité totale d'azote différente. Le déplacement de 20 kg N/ha de chacun des deux premiers apports en faveur du 3^e apport (P3 → P5, P4 → P6) n'a pas eu d'impact significatif sur le rendement en grains. Par contre, le moment d'application du 3^e apport joue un rôle important. Un apport tardif d'azote à la floraison entraîne une diminution du rendement (de -1,3 dt/ha entre P3 et P4 et de -4,4 dt/ha entre P5 et P6), cette diminution n'étant pas significative.

Comme pour le rendement en grains, l'absence de fumure azotée a fortement influencé la teneur en

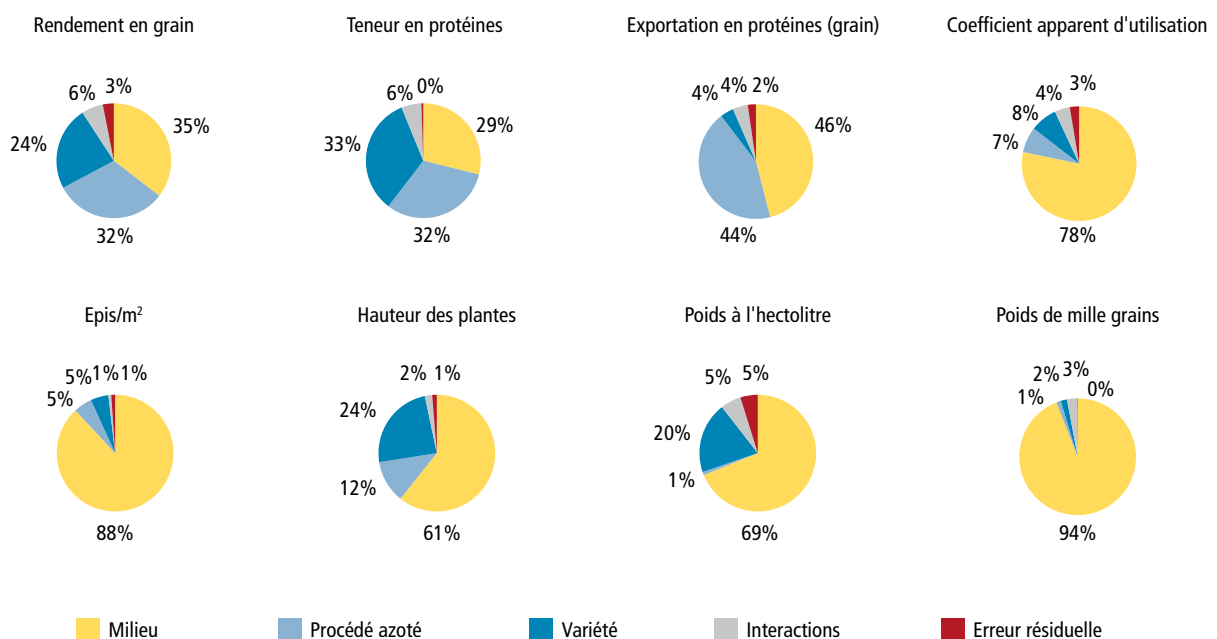


Figure 2 | Effets du milieu, de la fumure azotée et de la variété sur différentes caractéristiques agronomiques du blé d'automne: carrés moyens issus de l'analyse de variances exprimés en pourcents.

Tableau 2 | Effets du milieu, de la fumure azotée et de la variété sur différentes caractéristiques agronomiques du blé d'automne: valeurs de F issues de l'analyse de variances et degré de significativité (n.s.: non significatif, *: P<0,05, **: P<0,01, *: P<0,001) des facteurs analysés.**

	Rendement	Protéines	Exp. prot.	CAU	Epis/m ²	Hauteur	PHL	PMG
Milieu	18,2 ***	135,9 ***	32,6 ***	59,0 ***	121,9 ***	106,0 ***	22,5 ***	5053,6 ***
Procédé azoté (PA)	31,5 ***	146,3 ***	56,5 ***	6,6 ***	20,2 ***	18,6 ***	0,6 n.s.	17,9 ***
Variété	172,5 ***	402,4 ***	33,1 ***	43,8 ***	51,1 ***	287,8 ***	51,9 ***	52,3 ***
Milieu*PA	2,5 ***	17,9 ***	2,9 ***	1,6 n.s.	0,8 n.s.	2,3 **	1,9 **	9,6 ***
Milieu*Variété	23,2 ***	18,2 ***	14,4 ***	12,8 ***	3,8 ***	4,1 ***	5,3 ***	59,1 ***
PA*Variété	1,8 **	2,1 ***	2,0 **	1,0 n.s.	1,4 n.s.	1,6 *	1,4 n.s.	2,7 ***
Milieu*PA*Variété	1,2 n.s.	1,3 *	1,2 n.s.	0,9 n.s.	0,9 n.s.	1,2 n.s.	1,3 *	2,2 ***

PA: procédé azoté; Protéines: teneur en protéines; Exp. prot.: exportation des protéines; CAU: coefficient apparent de l'utilisation dans les grains; PHL: poids à l'hectolitre; PMG: poids de mille grains

Tableau 3 | Effets de la fumure azotée sur différentes caractéristiques agronomiques du blé d'automne: moyennes de deux lieux, trois années, six variétés et trois répétitions (n=108), les lettres indiquent les différences significatives entre les moyennes au seuil de P<0,05.

Procédé azoté [kg N/ha]	Rendement [dt/ha]	Protéines [%]	Exp. prot. [kg/ha]	CAU	Epis /m ²	Hauteur [cm]	PHL [kg/hl]	PMG [g/1000 grains]	Rent. écon. [CHF]
P1: 0	44,6 d	11,0 e	415 c		497 c	70,8 d	77,2 a	46,5 b	2228 d
P2: 60-80	66,9 abc	12,8 d	723 b	0,39 a	631 a	84,0 ab	77,2 a	46,0 c	2928 a
P3: 40-60-40 (DF)	67,1 ab	12,9 d	730 b	0,40 a	616 a	84,0 ab	77,9 a	47,4 a	2853 ab
P4: 40-60-40 (FLO)	65,8 abc	13,1 c	731 b	0,40 a	603 ab	82,8 abc	77,4 a	47,4 a	2789 ab
P5: 20-40-80 (DF)	67,8 ab	13,3 bc	759 ab	0,43 a	603 ab	83,5 ab	77,8 a	47,7 a	2891 ab
P6: 20-40-80 (FLO)	63,4 bc	13,3 b	721 b	0,39 a	579 b	81,7 bc	77,9 a	47,5 a	2674 bc
P7: 60-80-60 (DF)	68,6 a	13,7 a	792 a	0,33 b	623 a	85,2 a	77,2 a	47,8 a	2824 ab
P8: 20-40-140 (FLO)	62,7 c	13,9 a	740 b	0,29 b	584 b	80,1 c	77,9 a	47,6 a	2531 c

Protéines: teneur en protéines; Exp. prot.: exportation des protéines; CAU: coefficient apparent de l'utilisation; PHL: poids à l'hectolitre; PMG: poids de mille grains; Rent. écon.: rentabilité économique

protéines (tabl. 3; fig. 3B). Le dispositif expérimental mis en place pour améliorer la teneur en protéines a répondu aux attentes: celle-ci augmente progressivement du procédé P1 au procédé P8. L'exportation en protéines, qui combine les deux facteurs rendement en grains et teneurs en protéines, est davantage déterminée par le premier que par le second facteur (tabl. 3).

L'absence de fumure azotée a réduit le nombre de tiges fertiles à 79% par rapport à la variante la plus dense obtenue avec un 1^{er} apport de 60 kg N/ha (P2).

Les teneurs en protéines moyennes (fig. 3B) induisent l'impression erronée que l'intensification de la fumure azotée a engendré une augmentation systématique des teneurs en protéines. En 2013 à Goumoëns, l'apport azoté à floraison n'a pas pu être valorisé en raison de la sécheresse. Il est connu qu'un déficit en eau réduit le prélèvement de l'azote par la plante (Sadras *et al.* 2004). Ainsi, en moyenne de toutes les variétés, c'est le procédé P5 qui a obtenu à Goumoëns cette année-là la teneur en protéines la plus élevée (13,2%), tandis que les procédés

P6 et P8, qui n'ont eu que 60 kg N/ha avant la floraison, ont réalisé 10,5% et 10,6% de protéines seulement. Ainsi, même si les teneurs ont tendance à augmenter avec l'intensification de la fumure azotée, les apports tardifs présentent un risque non négligeable.

Une mise en valeur économique rudimentaire (approche de la marge brute) a été faite en prenant en compte le nombre d'épandages, la quantité en fumure azotée appliquée, le rendement de la parcelle, le prix de la récolte selon la classe de qualité, le poids à l'hectolitre ainsi que les teneurs en protéines. Les résultats montrent que le procédé P2, avec seulement deux apports d'azote, ainsi que le procédé P5 sont les plus intéressants (tabl. 3). La variante sans fumure azotée (P1) ainsi que les procédés avec le 3^e apport à floraison (P4, P6 et P8) sont moins rentables.

Effets de la variété

Bien que Runal et Suretta aient obtenu les teneurs en protéines les plus élevées, ce sont Premio et CH Combin qui ont exporté la plus grande quantité de protéines

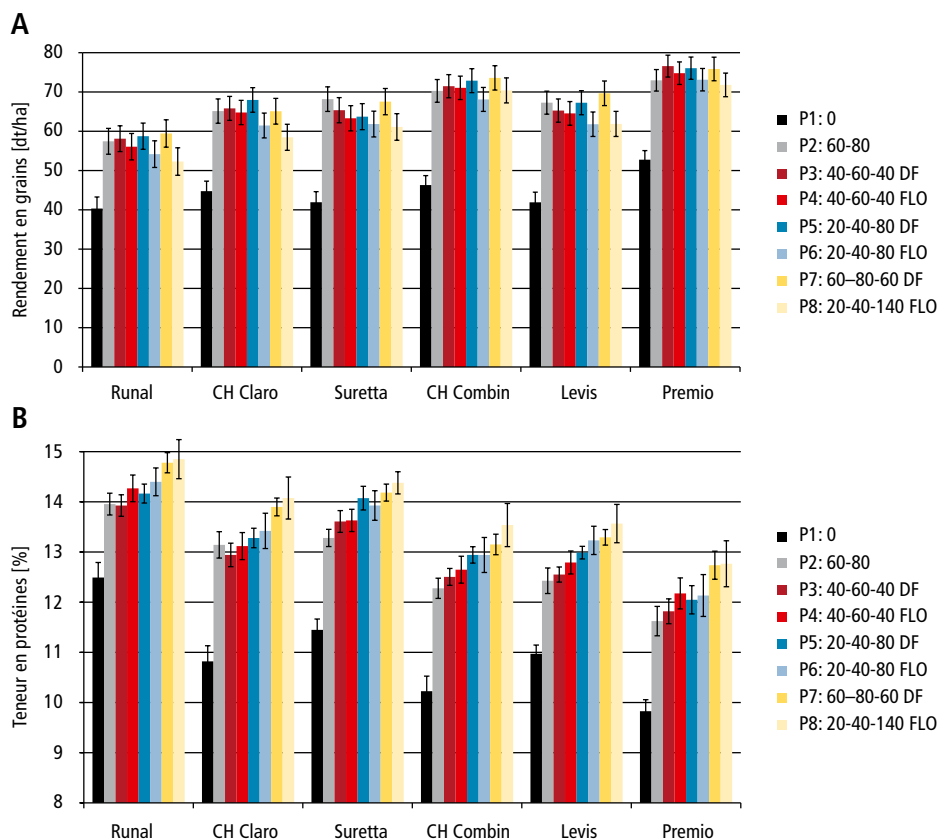


Figure 3 | Moyennes (avec erreur standard) A) du rendement en grains et B) de la teneur en protéines selon la variété et le procédé azoté (n = 18 pour chaque histogramme).

Tableau 4 | Effets de la variété sur différentes caractéristiques agronomiques du blé d'automne: moyennes de deux lieux, trois années, huit procédés azotés et trois répétitions (n = 144), les lettres indiquent les différences significatives entre les moyennes au seuil de P<0,05

Variété	Rendement [dt/ha]	Protéines [%]	Exp. prot. [kg/ha]	CAU	Epis/m ²	Hauteur [cm]	PHL [kg/hl]	PMG [g/1000 grains]	Rent. écon. [CHF]
Runal	54,5 d	14,1 a	656 d	0,29 d	589 c	89,8 a	79,1 a	47,2 b	2397 e
CH Claro	61,7 c	13,1 c	691 c	0,36 c	626 a	87,3 b	78,1 b	47,3 b	2737 c
Suretta	61,6 c	13,6 b	715 b	0,40 b	562 d	79,4 c	77,5 c	47,8 a	2608 d
CH Combin	68,0 b	12,5 e	732 a	0,42 a	609 b	75,6 e	77,2 c	48,0 a	2924 b
Levis	62,4 c	12,7 d	683 c	0,38 c	537 e	79,8 c	78,5 b	47,1 b	2593 d
Premio	71,9 a	11,9 f	735 a	0,38 c	628 a	77,2 d	75,1 d	46,1 c	3031 a

Protéines: teneur en protéines; Exp. prot.: exportation des protéines; CAU: coefficient apparent de l'utilisation; PHL: poids à l'hectolitre; PMG: poids de mille grains; Rent. écon.: rentabilité économique

(tabl. 4). CH Combin et Suretta sont les variétés les plus efficaces en matière de valorisation des apports d'azote (CAU) et Runal la moins efficace. Le CAU de CH Combin est supérieur de 40% à celui de Runal. Premio réalise son rendement élevé par un nombre d'épis/m² très important, tandis que CH Combin est performant grâce à ses grains lourds (PMG). Runal se caractérise par les plantes les plus hautes et le PHL le plus élevé de la série. Avec la prise en charge actuelle des récoltes, les variétés plus

productives en termes de rendement en grains sont aussi les plus rentables.

L'analyse de toutes les combinaisons variété x procédé azoté (fig. 3A) met en évidence un comportement tendanciellement différent de la variété Suretta. Elle a très bien su valoriser les apports précoces importants (60 kg N/ha), mais l'augmentation des 2^e et 3^e apports en détriment du 1^{er} (P4, P6 et P8) lui ont été très défavorables.

Coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU)

Le coefficient apparent de l'utilisation de l'azote dans les grains (CAU) met en évidence l'efficacité de l'utilisation de la fumure azotée. Tandis que le procédé P5 est en tête du classement, les procédés P7 et P8 sont les moins bons (fig. 4A). Même si le rendement en grains est le meilleur dans le procédé P7, ce gain n'est pas suffisant en regard des 60 kg N/ha supplémentaires qui ont été appliqués en comparaison avec P2 à P6. Sadras et Rodriguez (2010) confirment que l'efficacité de l'utilisation des nutriments diminue avec l'augmentation des fertilisants. D'autres études (Arvalis 2014) ont mis en évidence que la capacité d'utilisation de l'azote par la culture évoluait; au stade fin montaison, l'azote est par exemple deux fois mieux utilisé qu'au moment du tallage.

Au niveau des variétés (fig. 4B), Runal valorise très mal la fumure azotée. La plupart des parcelles de la variété CH Combin atteignent un CAU élevé, ce qui explique la supériorité de cette variété. Il est intéressant aussi de relever la grande disparité des valeurs de CAU pour CH Claro. Environ 30% des parcelles de cette variété ont un CAU très bas, alors que quelques parcelles atteignent des scores de CAU très élevés. Ceci pourrait expliquer les discussions parfois très controversées autour de cette variété, avec des agriculteurs qui se

disent extrêmement satisfaits et d'autres qui sont déçus de ses performances.

Facteurs influençant le rendement en grains

Le rendement en grains est influencé par de nombreux facteurs. Selon le niveau de fumure et son fractionnement, des paramètres différents influenceront le rendement en grains. Un facteur ayant un effet positif pour un procédé azoté peut devenir négatif pour un autre niveau de fumure. En l'absence de fumure N (P1), le rendement en grains est étroitement et positivement corrélé avec le nombre d'épis au m² ($r=0,777^{***}$) ainsi qu'avec la hauteur des plantes ($r=0,701^{***}$). Dans tous les procédés azotés, le nombre d'épis par m² est significativement corrélé avec le rendement en grains, mais ce facteur perd en importance dans les procédés qui ont produit les meilleurs rendements. Si dans le procédé sans fumure (P1), une hauteur de plante élevée était favorable au rendement en grains, une hauteur importante est devenue un inconvénient pour les plantes bien alimentées en azote (coefficient de corrélation négatif). On peut supposer que dans ces cas, les avantages d'un appareil foliaire important ont été annulés par la concurrence pour les éléments disponibles entre les feuilles et les grains. La densité des grains (PHL) est corrélée

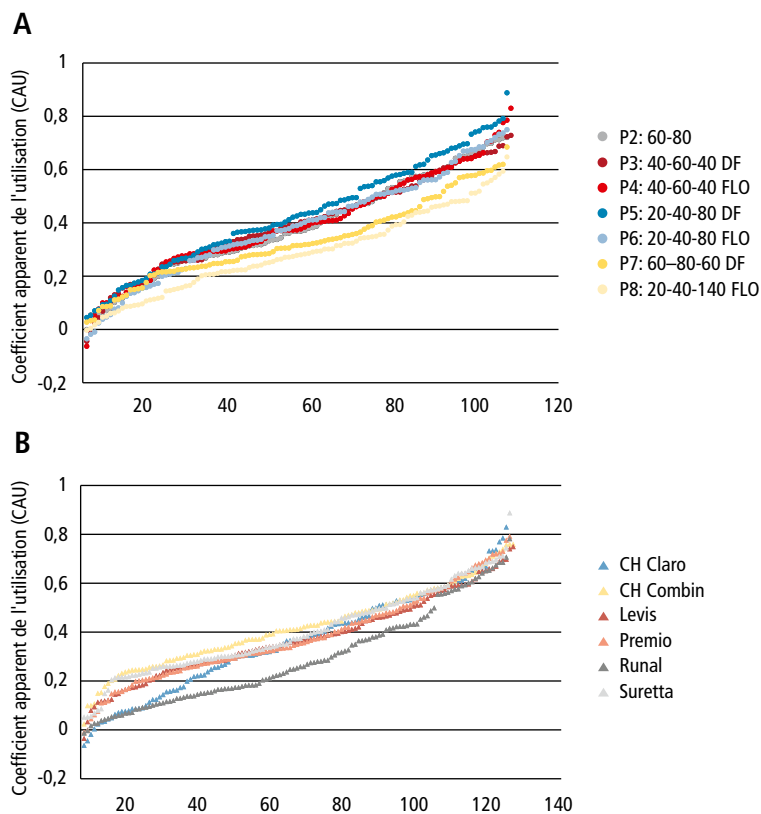


Figure 4 | Coefficient apparent de l'utilisation de l'azote dans les grains (CAU) selon A) la fumure azotée (n=108 parcelles par procédé azoté) et B) la variété (n=126 parcelles par variété). Pour un même procédé, les parcelles sont classées par valeur croissante de CAU.

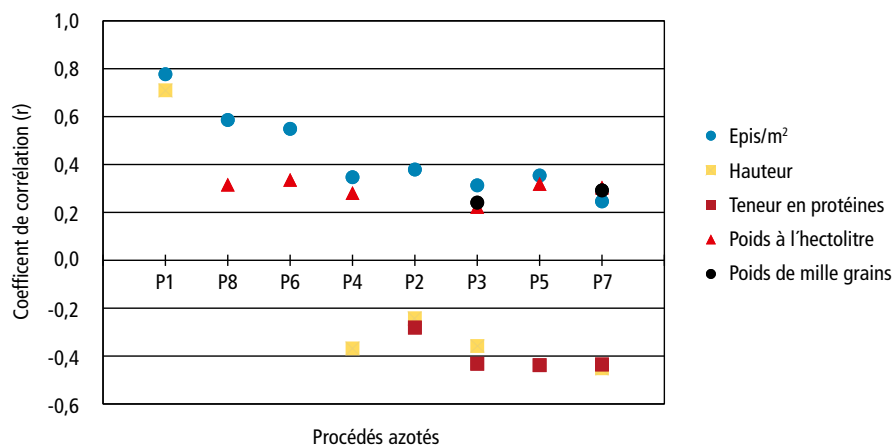


Figure 5 | Coefficient de corrélation (r) entre le rendement en grains et les divers paramètres étudiés pour les différents procédés azotés ($n=108$). Les procédés azotés ont été classés par ordre croissant de rendement en grains. Seuls les points pour lesquels le coefficient de corrélation r est significatif ($P<0,05$) sont représentés.

positivement avec le rendement en grains dans la plupart des procédés azotés. Un poids de mille grains élevé a contribué à un bon rendement dans deux procédés azotés uniquement (P3 et P7).

L'effet de dilution des protéines dans le grain lorsque le rendement augmente a déjà été largement étudié (Waldon 1933; Grant et McCalla 1949; Stuber *et al.* 1962). Nos essais montrent que tant que le rendement en grains est bas, cette corrélation négative n'est pas statistiquement significative. Par contre, dans nos conditions pédoclimatiques, lorsque le rendement dépasse environ 65 dt/ha, cette corrélation négative devient significative et plus importante (r de $-0,281^{**}$ à $-0,438^{***}$).

Conclusions

- Une fumure azotée minimale est nécessaire pour atteindre un niveau de rendement en grains et une teneur en protéines convenables.
- Le choix variétal explique 33% de la variabilité de la teneur en protéines. Pour le producteur, il constitue le facteur le plus facile à maîtriser pour influencer la teneur en protéines du blé.
- Le fractionnement de la fumure azotée en trois apports (au lieu de deux) augmente significativement la teneur en protéines pour la plupart des variétés. Dans des conditions favorables, un fractionnement de 20-40-80 kg N/ha avec un 3^e apport à la dernière feuille (P5) donne des résultats satisfaisants pour la teneur en protéines sans affecter significativement le rendement. Un dernier apport tardif (floraison) augmente la teneur en protéines à condition d'être absorbé par la plante (conditions pédoclimatiques favorables), mais le rendement en grains diminue.

- Les variétés étudiées varient fortement quant à leur efficacité d'utilisation des apports d'azote. CH Combin utilise beaucoup mieux la fumure azotée que Runal (CAU 40% plus élevé). La répartition de la fumure azotée influence également CAU. Dans nos essais, le procédé le plus efficace a été P5, où environ la moitié de la quantité d'azote apportée a pu être valorisée par les grains. Les 60 kg N/ha supplémentaires apportés dans les deux procédés les plus intensifs (P7 et P8) ont été relativement mal valorisés (CAU plus faibles).
- Les facteurs influençant le rendement en grains changent selon le niveau d'intensité de la fumure azotée. En situation de faible disponibilité en azote, la hauteur de la plante et le nombre d'épis/m² favorisent un rendement élevé. Au contraire, en conditions plus favorables, la biomasse foliaire entre en concurrence avec la formation du grain. De plus, la corrélation négative entre rendement en grains et teneur en protéines devient de plus en plus importante au fur et à mesure que le niveau de rendement augmente.
- Du point de vue économique, la variante P2, avec seulement deux épandages, est la plus intéressante, suivie de près par le procédé P5. Les apports au stade floraison sont déconseillés quelle que soit la dose appliquée. ■

Riassunto**L'arte di frazionare l'azoto per ottimizzare la resa e il tenore proteico del grano**

L'interprofession nel settore dei cereali ha instaurato un sistema di pagamento dei raccolti basato sul tenore proteico del grano della classe TOP. Agroscope ha effettuato degli esperimenti per studiare l'impatto del frazionamento della concimazione azotata sulla resa e sulla qualità del grano. Nelle nostre condizioni pedoclimatiche una ripartizione di 20-40-80 kg N/ha – con il 3o apporto allo stadio CD 37 (comparsa dell'ultima foglia) - ha portato a risultati eccellenti, per quanto riguarda sia la resa in semi sia il tenore proteico. I produttori desiderosi di ottenere semi dall'elevato tenore proteico sono probabilmente tentati di scegliere le varietà più ricche di proteine e di coltivarle in maniera molto intensiva con un 3o apporto importante al momento della fioritura. Tuttavia, questa strategia presenta un altissimo rischio di non assimilazione dell'azoto da parte della pianta nonché di perdita di resa in semi. Da un punto di vista economico, le varietà più produttive sono al contempo le più redditizie, anche se appartengono a classi qualitative inferiori. Lo studio ha altresì messo in evidenza che, nelle situazioni di scarsa disponibilità di azoto, risulta avvantaggiata una varietà a paglia alta e in grado di produrre un grande numero di spighe per m². Al contrario, la statura della pianta diventa un elemento negativo per la formazione dei semi nei sistemi più intensivi.

Summary**The art of splitting nitrogen applications to optimise wheat yield and protein content**

The cereals trade association has set up a harvest payment system based on the protein content of 'TOP' class wheats. Agroscope has implemented tests to study the impact of splitting the application of nitrogen fertiliser on wheat yield and quality. In Swiss soil and weather conditions, a 20-40-80 kg N/ha split – the third input being made at the CD-37 stage (flag-leaf sprouting) – yielded excellent results, both in terms of grain yield and protein content. Producers keen to produce grains with a high protein content may be tempted to choose the varieties highest in protein, and to manage them very intensively, with a significant third input at flowering; however, this strategy carries a very high risk of non-assimilation of the nitrogen by the plant, and of loss of grain yield. From an economic perspective, the most productive varieties are also the most profitable, even if they belong to lower quality categories. The study also highlighted the fact that in situations of low nitrogen availability, a high-straw variety developing a large number of spikes per m² has the edge. By contrast, the size of the plant militates against grain formation in the more intensive systems.

Key words: nitrogen fertilization, winter wheat, grain yield, varieties, protein content, apparent coefficient of nitrogen use.

Bibliographie

- Arvalis 2014. Optimiser l'alimentation de la plante en fractionnant l'azote. Accès: http://www.cetiom.fr/fileadmin/cetiom/kiosque/arvalis-info/2014janvier/ACI_janvier2014_interventions_printemps_cereales.pdf [23.11.2015]
- Brabant C. et Levy L., 2016. Influence de la fumure azotée et de son fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 88–95.
- Charles R., Collaud J.-F., Levy L. & Sinaj S., 2012. Variétés, densité de semis et fumure azotée sur orge d'automne. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (2), 88–95.
- Collin F., 2012. Modélisation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote issu d'un engrais minéral apporté sur blé tendre d'hiver. *Agricultural sciences*. 2012. <dumas-00741001> Accès: <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00741001/document> [23.11.2015]
- Grant M. N. et McCalla A. G., 1949. Yield and protein content of wheat and barley. I. Interrelations of yields and protein content of random selections from single crosses. *Canad. J. Res.* 27c (5), 230–240.
- Levy L., Schwaerzel R. & Kleijer G., 2007. Influence de la fumure azotée sur la qualité des céréales panifiables. *Revue suisse Agric.* 39 (5), 255–260.
- Sadras V.O., Baldock J., Cox J., Bellotti B., 2004. Crop rotation effect on wheat grain yield as mediated by changes in the degree of water and nitrogen co-limitation. *Aust. J. Agric. Res.* 55, 599–607.
- Sadras V. O. et Rodriguez D., 2010. Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilization efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *Field Crops Res.* 118, 297–305.
- Sonderegger O. et Scheuner S., 2014. Bekenntnis zur Qualitätsstrategie – Getreidebranche einigt sich auf Proteinbezahlung. Accès: http://www.swissgrainum.ch/files/2014-05-28_mm_loesung_proteingehalt_d.pdf [23.11.2015]
- Stuber C. W., Johnson V. A. & Schmidt J. W., 1962. Grain protein content and its relationship to other plant and seed characters in the parents and progeny of a cross of *Triticum aestivum*. *Crop Sci.* 2, 502–508.
- Waldon L. R., 1933. Yield and protein content of hard red spring wheat under conditions of high temperature and low moisture. *J. agric. Res.* 47, 129–149.