

Performances de variétés de blés panifiables cultivées en agriculture biologique en conditions peu fertiles

Auteurs: Pierre Stevenel^{1,2}, Marina Wendling¹, Cécile Brabant², Hélène Suss¹, Charlotte Savoyat^{1,4}, Hansueli Dierauer³, Fabio Mascher², Raphaël Charles¹

¹Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, antenne romande, 1008 Lausanne, Suisse

²Agroscope, Amélioration des grandes cultures et ressources génétiques, 1260 Nyon, Suisse

³Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, 5070 Frick, Suisse

⁴Proconseil, 1008 Lausanne, Suisse

Renseignements: Raphaël Charles, e-mail: raphael.charles@fibl.org

<https://doi.org/10.34776/afs13-151f> Date de publication: 19. Octobre 2022



Figure 1 | Essais on-farm de variétés de blé panifiable en situation peu fertile – essais en bande à Suchy. (Photo: Raphaël Charles, FiBL)

Résumé

L'azote est le principal élément limitant la production de blé panifiable en agriculture biologique. Son manque peut entraîner une baisse de la teneur en protéine du grain et donc des pénalités de paiement. Dans cette étude, cinq variétés de blé d'automne ont

été cultivées *on-farm* sur quatre exploitations aux conditions pédoclimatiques et itinéraires techniques différents pendant trois années consécutives. Les résultats sur les comportements relatifs des variétés montrent que Molinera valorise les sites à haut potentiel de rendement, alors qu'elle présente des performances analogues aux autres variétés sur des sites limitant. Par ailleurs, ses teneurs en protéines restent parmi les plus élevées (> 12 %) et les plus stables, avec une faible diminution sur site à haut potentiel de rendement. A l'inverse, Aszita valorise les sites plutôt extensifs, tout en garantissant une teneur en protéines moyenne. D'autres variétés telles que Titlis, Pizza et Wiwa ont montré des rendements intermédiaires, avec toutefois des réponses variables selon les potentiels des sites. Pizza a montré les écarts de teneurs en protéine les plus importants entre sites à faible et à haut potentiel. Ces variations de comportements indiquent des stratégies différentes en termes d'utilisation des ressources parmi les variétés de blé testées. Certes, un optimum en teneur en protéines a été observé pour les sites à potentiels de rendements moyens (40–55 dt/ha), offrant un bon compromis entre quantité et qualité du grain pour la majorité des variétés. Toutefois, il est essentiel de bien choisir la variété à cultiver non seulement selon les conditions pédoclimatiques du site, mais également selon les objectifs de rendement et de qualité visés, afin de pouvoir adopter une conduite culturale adaptée au site. Dans cette perspective, il est nécessaire de conduire des essais variétaux en conditions peu fertiles.

Key words: winter wheat, organic farming, soil conditions, stability, protein content, low fertility.

Introduction

Depuis 2016, la production de blé panifiable bio est confrontée à l'introduction d'une rétribution liée à la teneur en protéines, exigeant de l'agriculteur qu'il pilote attentivement la nutrition azotée de ses cultures. Pour certaines situations culturales peu fertiles, des solutions doivent être trouvées, par exemple pour des sols légers, peu profonds ou faibles en humus, des domaines sans bétail ou encore des sols en reconversion biologique qui n'ont plus eu de prairie ou d'apports d'amendements organiques depuis longtemps dans la rotation de cultures. Il est aussi important que la conduite des cultures corresponde aux caractéristiques et potentiels des sites.

La sélection variétale du blé permet de proposer de nouvelles variétés plus performantes et utilisant l'azote (N) du sol de manière plus efficace (Foulkes *et al.*, 2009; Häner et Brabant, 2016). L'agriculture biologique ne permettant pas d'intrants minéraux, les performances en termes de quantité et de qualité de certaines variétés peuvent alors varier et montrer des limites en conditions peu fertiles (Büchi *et al.*, 2016; Ceccarelli 1996). Herrera *et al.* (2019) ont montré par une méta-analyse d'un large set de données que la variance induite par les conditions pédoclimatiques impactait plus fortement le rendement que la concentration en N du grain. Tester les nouvelles variétés dans des conditions moins favorables afin d'évaluer l'impact des interactions génotype × environnement (G × E) sur le rendement et la qualité du grain paraît donc être une étape indispensable dans la sélection

des céréales (Dawson *et al.*, 2008). Dès lors, une analyse méthodique de la variabilité des performances des variétés apparaît comme nécessaire pour décrire leurs propriétés agronomiques. Bien que les analyses des interactions G×E sont utiles à la compréhension des sources de variabilité (Herrera *et al.*, 2019), elles restent toutefois complexes à mettre en œuvre dans un contexte *on-farm*. Pour ce faire, l'étude de la stabilité de la performance, c'est-à-dire la capacité d'une variété à maintenir son rendement ou la qualité de son grain de manière constante dans n'importe quelle condition, est un outil important pour la caractérisation des variétés. Büchi *et al.* (2016) ont d'ailleurs analysé la réponse de certaines variétés à différents niveaux et avec différentes sources minérales ou organiques de fertilisation en N et mis en évidence une importante variabilité entre les variétés, suggérant des stratégies différentes d'allocation de N. Dans cette étude, des régressions linéaires entre performances des variétés en fonction des rendements moyens des sites ont permis de préciser leur capacité à répondre aux différents contextes agronomiques. D'autres méthodes plus accessibles permettent de rendre compte de la stabilité des variétés sur la base des données issues de l'étude variétale. La méthode plus commune d'écovalence variétale permet d'évaluer la contribution d'une variété à la réponse d'un assortiment aux conditions culturales (Wricke 1962). Ces méthodes complémentaires offrent une perspective de compléter les descriptifs des variétés

Tableau 1 | Rendements (écarts-types), cumul des précipitations sur la période de croissance, teneurs en matière organique (MO) et en argile du sol et rapport MO/argile pour chaque site d'essai durant les trois années de l'étude.

Année	Site	Rendement (dt/ha)	Précipitations de mars à juin (mm)	MO (%) ^a	Argile (%)	MO/argile ^b
2017	Allens	60 (11)	361	3,4	20,8	16,3
	Juriens	68 (13)	240	5,0	27,7	18,1
	Montignez	45 (11)	199	3,1	21,7	14,3
	Suchy	58 (19)	317	3,2	29,5	10,8
2018	Allens	33 (3)	343	3,1	23,2	13,4
	Juriens	53 (7)	256	6,3	30,6	20,6
	Montignez	44 (9)	301	2,5	18,8	13,3
	Suchy	37 (9)	323	4,1	28,7	14,3
2019	Allens	33 (6)	363	3,5	25,6	13,7
	Juriens	38 (5)	327	4,2	25,4	16,5
	Montignez	34 (11)	397	3,4	28,2	12,1
	Suchy	41 (5)	294	3,1	35,4	8,8

^ale code couleur correspond à l'appréciation de la teneur en MO selon PRIF 2017: bleu = humifère (5 < MO < 10) et orange = faiblement humifère (2 < MO < 5).

^ble code couleur correspond à l'appréciation du rapport MO/argile selon Johannes *et al.* (2017): bleu = bon (MO/A > 17), orange = insuffisant (12 < MO/A < 17) et rouge = pauvre (MO/A < 12).

qui rendent compte de la stabilité des performances par des commentaires généralement empiriques.

Cette étude variétale a pour but (i) d'évaluer la réponse de différentes variétés de blé d'automne standards, recommandées pour l'agriculture biologique suisse, à des conditions de sols variables et (ii) d'identifier méthodologiquement les traits spécifiques pour différentes conditions culturales. Il s'agit également (iii) de rendre compte de deux méthodes complémentaires pour évaluer la stabilité des performances. L'essai a consisté à tester cinq variétés de blé, sur quatre sites, durant trois ans, dans des contextes culturels contrastés, augmentant ainsi la plage des conditions environnementales.

Matériel et Méthodes

Cette étude a été menée *on-farm* sur quatre exploitations aux conditions pédoclimatiques différentes en Suisse romande, dont trois dans le canton de Vaud (Allens 562 m, Suchy 581 m et Juriens 792 m) et un dans le canton du Jura (Montignez 421 m), entre 2016 et 2019. Les principaux paramètres pour chaque site sont résumés dans le tableau 1. Sur la période de mars à juin, le cumul moyen des précipitations représentait 279 mm en 2017, 306 mm en 2018 et 345 mm en 2019. Montignez

montre la teneur moyenne en matière organique (MO) du sol la plus faible (3,0 %) alors que la plus élevée est observée à Juriens (5,2 %). Concernant la teneur en argile, Montignez présente aussi la teneur moyenne la plus basse avec 22,9 % et Suchy la plus élevée avec 31,2 %. Johannes *et al.* (2017) ont récemment démontré que la qualité structurale du sol pouvait être évaluée simplement en utilisant le rapport matière organique/argile (MO/A) du sol comme indicateur. Ce rapport permet également d'estimer partiellement la fertilité d'un sol, montrant ainsi que les sites de cette étude ont des conditions de fertilité différentes. C'est à Juriens que l'on observe les rapports MO/A les plus favorables, alors que ceux de Suchy sont en général les plus faibles. Sur chaque site, deux procédés de systèmes de culture ont été conduits faisant varier l'intensité du travail du sol ou la présence de couvert végétaux, permettant ainsi de doubler le nombre de situations culturales. Pour chaque site et chaque procédé, cinq variétés de blé d'automne, identifiées sur la base de leur stratégie d'utilisation de l'azote (N) (Büchi *et al.*, 2016) et recommandées en agriculture biologique, ont été testées: Aszita, Titlis, Wiwa, Molinera et Pizza. L'essai a été conduit pendant trois années consécutives (2017, 2018 et 2019). Les blés ont

Tableau 2 | Moyennes annuelles, moyennes de chaque site et moyenne générale des rendements, teneurs en protéines et poids de mille grains (PMG) de chaque variété de blé d'automne.

	Variété	2017	2018	2019	Allens	Juriens	Montignez	Suchy	Moyenne
Rendement (dt/ha)	Aszita	38,0 ^{c#}	36,0 ^b	37,8	35,7	47,6	31,2 ^b	34,2 ^b	37,2 ^b
	Molinera	70,0 ^a	43,8 ^{ab}	34,1	39,8	58,4	44,6 ^a	49,3 ^a	48,4 ^a
	Pizza	57,5 ^b	40,7 ^{ab}	38,7	43,9	48,6	38,8 ^{ab}	49,1 ^a	45,1 ^a
	Titlis	59,7 ^{ab}	42,8 ^{ab}	37,7	34,2	51,5	45,5 ^a	51,0 ^a	46,0 ^a
	Wiwa	60,5 ^{ab}	45,9 ^a	34,6	38,2	56,9	45,5 ^a	43,8 ^{ab}	46,4 ^a
		g	*	<i>p=0,139</i>	<i>p=0,235</i>	<i>p=0,109</i>	*	**	***
Teneur en protéines (%)	Aszita	12,6 ^{ab}	12,0 ^b	11,6 ^{bc}	11,3 ^b	12,2 ^b	13,2 ^a	11,9 ^b	12,1 ^b
	Molinera	12,9 ^a	13,2 ^a	13,1 ^a	12,6 ^a	13,2 ^a	13,4 ^a	13,0 ^a	13,0 ^a
	Pizza	12,0 ^b	12,3 ^{ab}	11,2 ^c	11,1 ^b	11,9 ^b	13,3 ^a	11,6 ^b	11,9 ^b
	Titlis	11,9 ^b	12,2 ^b	12,1 ^b	11,7 ^b	12,2 ^b	12,1 ^b	12,3 ^{ab}	12,1 ^b
	Wiwa	12,1 ^b	12,8 ^{ab}	11,4 ^{bc}	11,8 ^{ab}	12,3 ^{ab}	12,6 ^{ab}	12,0 ^{ab}	12,1 ^b
		**	**	***	***	**	**	**	***
PMG (g)	Aszita	38,3 ^c	38,0 ^c	36,7 ^c	38,4 ^c	39,2 ^b	35,3 ^d	37,7 ^c	37,6 ^c
	Molinera	41,1 ^b	42,7 ^{ab}	40,2 ^b	42,7 ^{ab}	44,0 ^a	36,1 ^{cd}	42,9 ^b	41,4 ^b
	Pizza	41,2 ^b	42,4 ^b	40,6 ^{ab}	43,7 ^a	43,6 ^a	37,8 ^c	41,0 ^b	41,4 ^b
	Titlis	45,3 ^a	44,7 ^{ab}	42,5 ^a	42,4 ^{ab}	44,8 ^a	43,9 ^a	45,0 ^a	44,1 ^a
	Wiwa	42,3 ^b	45,1 ^a	39,9 ^b	41,8 ^b	44,0 ^a	41,2 ^b	42,6 ^b	42,4 ^b
		***	***	***	***	***	***	***	***

[#]les variétés avec la même lettre ne sont pas significativement différentes

^gsignificativité: *p*<0,001 (***), *p*<0,01 (**), *p*<0,05 (*)

été semés en bandes entre le 13 octobre et le 12 novembre, avec une densité de 250 kg/ha pour chaque variété (fig. 1). Les récoltes se sont déroulées entre le 13 et le 25 juillet, à l'aide d'une batteuse expérimentale en 2017 et manuellement en 2018 et 2019. Au final, un total de 24 modalités présentant des situations culturales distinctes (3 années \times 4 sites \times 2 procédés) ont été testées. Les itinéraires techniques ont été choisis par l'agriculteur selon ses techniques usuelles et les bonnes pratiques agricoles. Elles varient donc d'un site à l'autre sans possibilité d'analyses factorielles.

Le rendement et la teneur en protéines du grain ont été mesurés pour chacune des 120 modalités testées (3 années \times 4 sites \times 2 procédés \times 5 variétés). Pour chaque modalité, le rendement a été calculé en faisant la moyenne de trois échantillons correspondant à une surface récoltée de 50 \times 50 cm. L'homogénéité des parcelles a pu être vérifiée grâce au coefficients de variation inférieurs à 10%. La comparaison des rendements, des teneurs en protéines et des poids de mille grains (PMG) a été réalisée avec une analyse de la variance (ANOVA) sur le facteur variété.

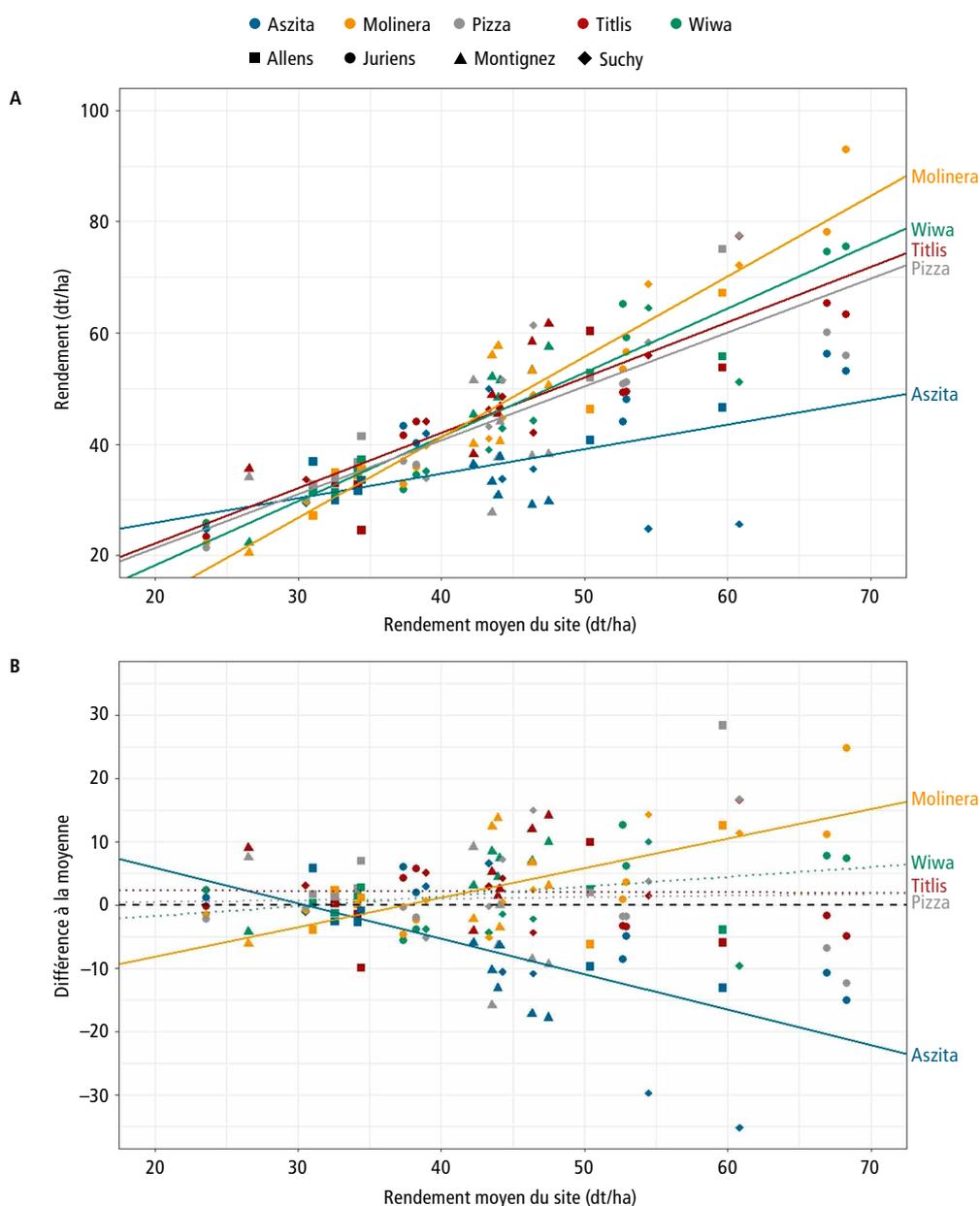


Figure 2 | Valeurs absolues (A) et étude de la stabilité (B) du rendement des 5 variétés de blé d'automne en fonction du potentiel du site. Les régressions linéaires en ligne pleine (graphique B) signifient que la relation entre le rendement moyen du site et la différence à la moyenne du rendement est significative au seuil $\alpha=0,05$.

Les données des essais en bandes ont été valorisées statistiquement sur la base de régressions linéaires (origine, pente) et les potentiels des sites exprimés par leur rendement moyen (moyenne des rendements de toutes les variétés par procédé sur un site annuel donné) selon Büchi *et al.* (2016). Parallèlement, l'estimation de la stabilité avec l'écovalence variétale (Wricke 1962) a été calculée à partir des rendements moyens de chaque génotype, des rendements moyens de chaque modalité et du rendement moyen annuel. Plus l'écovalence (W_{ij}) est faible, plus la variété est considérée comme stable.

Résultats et discussion

Performances agronomiques

L'un des objectifs de cette étude consistait à évaluer et à comparer la réponse de cinq variétés de blé panifiable à des conditions pédoclimatiques différentes et cultivées dans un contexte extensif.

En moyenne sur les 3 années, tout site et variété confondus, le rendement était de 44,6 dt/ha avec une variation relativement importante de $\pm 14,6$ dt/ha. Contrairement aux années 2017 et 2018, l'année 2019 n'a pas présenté

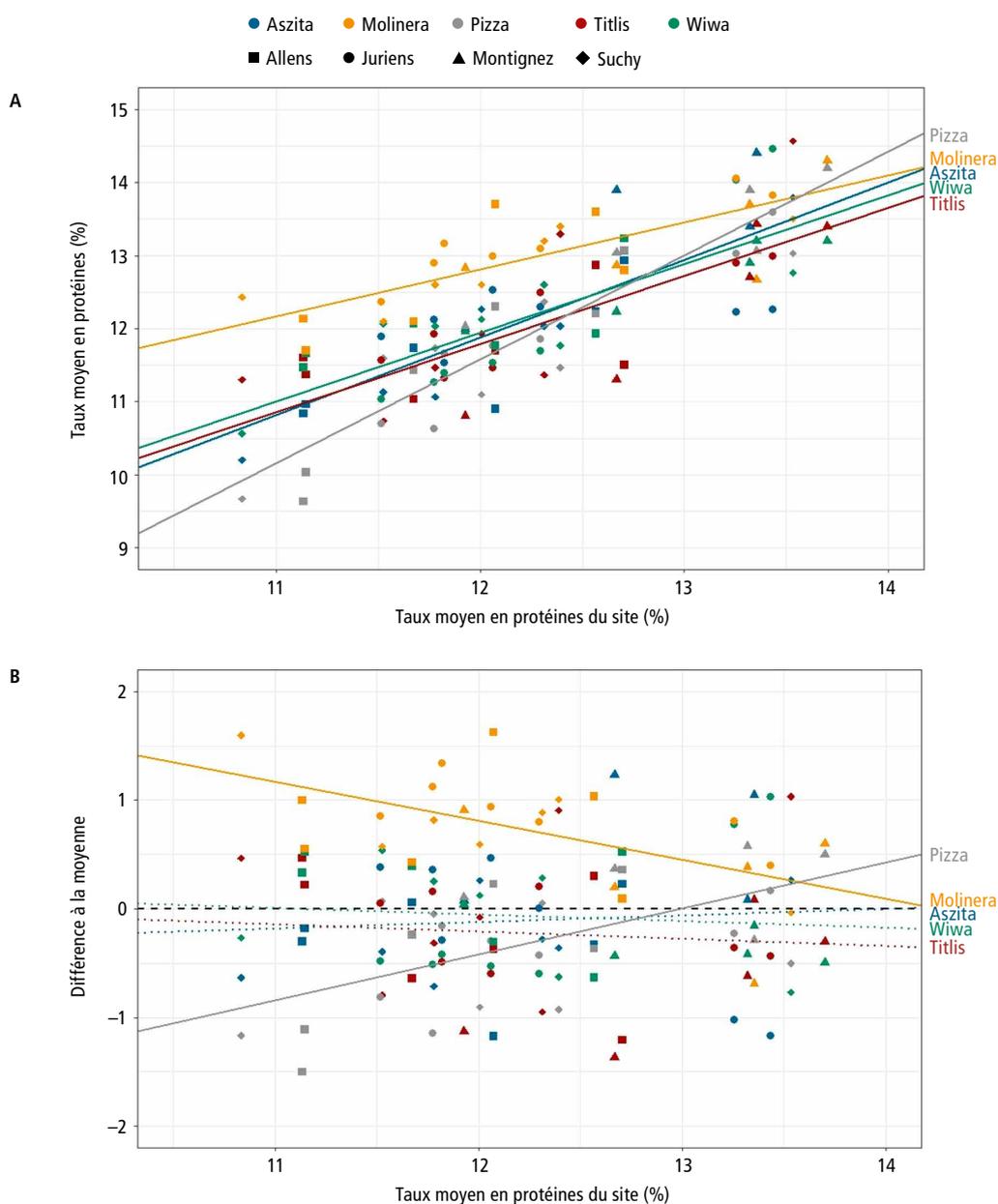


Figure 3 | Valeurs absolues (A) et étude de la stabilité de la teneur en protéines (B) des 5 variétés de blé d'automne en fonction du potentiel du site. Les régressions linéaires en ligne pleine (graphique B) signifient que la relation entre la teneur moyenne du site et la différence à la moyenne est significative au seuil $\alpha = 0,05$.

de différence significative de rendement entre les variétés. Aszita a montré le rendement moyen le plus faible (37,2 dt/ha) et Molinera le plus élevé (48,4 dt/ha) avec des écarts-types relativement importants sous les effets des différentes variables (année, procédé et site).

Les rendements les plus élevés ont été observés sur le site de Juriens (52,3 dt/ha) pour toutes les variétés, alors que les sites d'Allens (38,4 dt/ha) et de Montignez (41,1 dt/ha) étaient les moins productifs (tabl. 2). Les rendements importants obtenus sur le site de Juriens, confirmés par des poids de mille grains élevés (PMG), peuvent en partie être expliqués par les hautes teneurs en MO relativement à l'argile du site. En effet, Juriens présentait les rapports MO/A les plus élevés sur les 3 années, suggérant une qualité structurale du sol et un potentiel de minéralisation de la matière organique supérieurs aux autres sites et donc une meilleure fertilité. Cependant, le rapport MO/A ne permet pas à lui seul d'évaluer précisément le potentiel de rendement d'un site. D'autres paramètres du sol (teneurs absolues en matière organique et en argile, profondeur du sol, capacité de rétention d'eau) ou de l'itinéraire technique (date de semis, travail du sol, précédent cultural, fumure, santé des plantes) entrent également en ligne de compte. Ainsi, Suchy montre en moyenne de meilleures performances comparé à Allens ou à Montignez, malgré des rapports MO/A faibles. Ce résultat peut s'expliquer par le type de sol, les sols plus lourds (teneur en argile) étant favorables à la culture céréalière. Les résultats ont également montré de fortes variations de rendement entre les années, confirmant que le rendement en grains est grandement influencé par l'environnement, l'année et leur interaction (Herrera *et al.*, 2019).

Les teneurs moyennes en protéines dans le grain étaient comprises entre 11,9 % pour Pizza et 13,0 % pour Molinera (tabl. 2), avec une moyenne générale de 12,3 %. Molinera a d'ailleurs obtenu des teneurs significativement ($p < 0,001$) plus élevées que les quatre autres variétés, alors que Pizza a montré les variations les plus fortes (écart-type moyen de 1,3 %). Pour une variété donnée, les teneurs les plus faibles ont toujours été observées sur le site d'Allens (teneur moyenne 11,7 %), sans bétail et conduit de façon extensive, tandis que les plus élevées l'ont été principalement à Montignez (teneur moyenne 12,9 %) dans un contexte de fertilisation plus intensif (digestat), alors que la qualité structurale de leur sol sont relativement proches.

Malgré quelques variations, les teneurs en protéines de chaque variété sont restées relativement constantes et en moyenne supérieures au seuil de 12 %, en-dessous duquel des pénalités de rétribution peuvent être appli-

Tableau 3 | Stabilité des différentes variétés exprimée par les écovalences et les pentes des régressions linéaires

	Ecovalence variétale (Wij)		Régression linéaire	
	Rendement	Protéine	Rendement	Protéine
Aszita	48.9	2.7	-0.556 (***)a	0.061 (p=0.694)
Molinera	36.6	2.1	0.465 (***)	-0.357 (**)
Pizza	37.2	2.7	0.026 (p=0.874)	0.423 (**)
Titlis	28.6	2.8	-0.007 (p=0.953)	-0.067 (p=0.681)
Wiwa	27.8	2.3	0.153 (p=0.116)	-0.060 (p=0.654)

*significativité de la pente : $p < 0,001$ (***) , $p < 0,01$ (**), $p < 0,05$ (*)

quées. De plus, l'ordre des teneurs de la plus faible à la plus élevée était identique pour chaque variété (i.e. Allens < Suchy < Juriens < Montignez). Autrement dit, la teneur en protéine relative obtenue sur un site donné dépend principalement de la variété cultivée, plutôt que des conditions pédoclimatiques du site. Ces résultats corroborent ceux observés par Herrera *et al.* (2019) qui ont montré que la variance de la concentration en N du grain pouvait être plus largement expliquée par le facteur génotype (incluant ses interactions) que par le facteur environnement. Il apparaît donc essentiel de bien choisir la variété de blé en fonction des conditions pédoclimatiques du site.

Le PMG moyen était de $41,4 \pm 3,6$ g. Avec un PMG moyen de 37,6 g, Aszita a montré un PMG significativement inférieur ($p < 0,001$) à toutes les autres variétés. A l'opposé, le PMG moyen de Titlis (44,2 g) était significativement supérieur ($p > 0,001$) aux autres PMG. Le faible PMG observé avec Aszita reflète donc ses rendements plus faibles par rapport aux autres variétés.

Etude de la variation du rendement des différentes variétés

L'analyse précédente a permis de situer les niveaux moyens de performances des variétés et la variabilité des performances exprimées sous la forme d'écarts-types relevant de la dispersion des résultats sous les effets de l'année, du site ou d'un procédé cultural. Dans ce contexte, les écarts-types les plus élevés concernent généralement les variétés les plus performantes, c'est-à-dire celles qui ont la capacité de répondre le mieux aux effets des modalités, comme Molinera par comparaison avec Aszita. Cette donnée fournit donc une information confuse.

Les régressions entre rendement variétal et rendement moyen des sites permettent de distinguer plusieurs types de réponses (fig. 2). La variété Aszita est la variété

la plus constante ($p < 0,001$), avec des rendements qui varient peu en fonction des conditions pédoclimatiques du site, toutefois à un niveau inférieur sur les sites à haut rendement. Aszita ne valorise donc pas des conditions plus favorables par une augmentation du rendement. Par contre, ses performances sur des sites peu productifs (rendements moyens n'excédant pas 40 dt/ha) comme Allens étaient égales aux autres variétés. Büchi *et al.* (2016) ont étudié la performance de onze variétés de blé d'automne dans différents systèmes de production et ont également pu démontrer qu'une variété telle qu'Aszita n'était pas capable de mettre en valeur les apports élevés en N. Aszita est donc une variété qui se prête bien aux conditions ou conduites de cultures extensives et qui peut mettre en valeur d'autres caractéristiques agronomiques comme des pailles longues (valorisation, concurrence contre les adventices) (FiBL 2020). À l'opposé, la variété Molinera était la variété la moins stable ($p < 0,001$) dans le sens où son rendement a augmenté plus que proportionnellement par rapport aux autres variétés en fonction du potentiel de production des sites. Elle était donc la variété la plus adaptée aux sites productifs comme Juriens, valorisant des sols bien pourvus en éléments nutritifs et principalement en N. En contrepartie, Molinera semblait atteindre ses limites sur certains sites en raison de facteurs biotiques ou abiotiques non identifiés. Les réponses des trois autres variétés étaient semblables: les rendements augmentent de manière constante en fonction de l'amélioration des conditions de croissance. Ces variétés s'adaptent donc bien aux différentes conditions culturales de chaque site et répondent positivement aux environnements plus favorables, ce qui confirme également les observations faites précédemment (FiBL 2020).

Etude de la variation de la teneur en protéines des différentes variétés

La teneur en protéines dans le grain dépend principalement de la variété (tableau 2) mais le site joue également un rôle (fig. 3). Les résultats ont montré que Molinera présentait une teneur en protéines et une stabilité ($p < 0,001$) supérieures à toutes les autres (fig. 3). Bien que les rendements de Molinera aient été élevés sur sites à haute production, les écarts des teneurs en protéines entre les sites sont restés relativement faibles, et surtout supérieures à ceux des autres variétés.

Pizza est la variété la moins constante et a montré une teneur en protéines plus faible sur des sites à bas potentiel de protéines (< 12,5 %). Ses performances étaient en revanche bonnes dans des contextes favorables à de hautes teneurs. Cette variété nécessite donc des condi-

tions bien fournies en éléments nutritifs pour maximiser la teneur en protéines dans le grain, mais peine à maintenir cette qualité en cas de rendements très élevés. Enfin, Aszita, Wiwa et Titlis se sont comportées de façon analogue entre elles.

Ecovalence

Contrairement aux régressions linéaires qui déterminent la stabilité d'un génotype en fonction du site, l'écovalence montre la stabilité d'un génotype au sein d'un assortiment de variétés et sa contribution à la réponse d'ensemble. Un génotype stable réagit parallèlement à la réponse moyenne des génotypes avec lesquels il est testé. Les écovalences fournissent donc une information complémentaire aux régressions linéaires. Le rendement d'Aszita, jugé le plus constant avec les régressions, montre l'écovalence la plus élevée, signifiant la stabilité la plus faible (tabl. 3). En effet, d'un point de vue des écovalences, les réponses d'Aszita aux différents sites sont les plus éloignées du comportement moyen des autres génotypes (fig. 2B). Il en va de même pour Molinera qui arrive en seconde position. Les trois autres variétés montrent des écovalences relativement proches, ce qui est cohérent avec les régressions qui sont très proches les unes des autres.

Les écovalences calculées sur la stabilité des protéines montrent des résultats proches pour toutes les variétés, alors que les régressions discriminent Pizza et Molinera. La différence entre les régressions et l'écovalence est donc démontrée ici avec Molinera qui se distingue des autres en termes de réponses, mais qui dispose d'une grande stabilité exprimée par l'écovalence et par son écart-type, à l'inverse de Pizza dont la réponse distincte est moins stable en termes d'écovalence, comme l'indique par ailleurs les données d'écarts-types. Ces différences montrent la complémentarité dans l'interprétation de la stabilité des performances selon les méthodes utilisées.

Relation entre le rendement et la teneur en protéines

Les essais, qui ont été conduits dans les conditions de la pratique, ont montré que les sites à haut potentiel de rendement ne sont effectivement pas ceux qui produisent les grains les plus riches en protéines. Ils ont aussi montré que les sites extensifs ne garantissent pas davantage une accumulation suffisante en azote pour aboutir à la qualité recherchée. En effet, si la fertilité du sol influence directement le rendement, il n'en va pas de même pour la teneur en protéines du grain, soumise aux stratégies d'accumulation des protéines par les variétés (Büchi *et al.*, 2016).

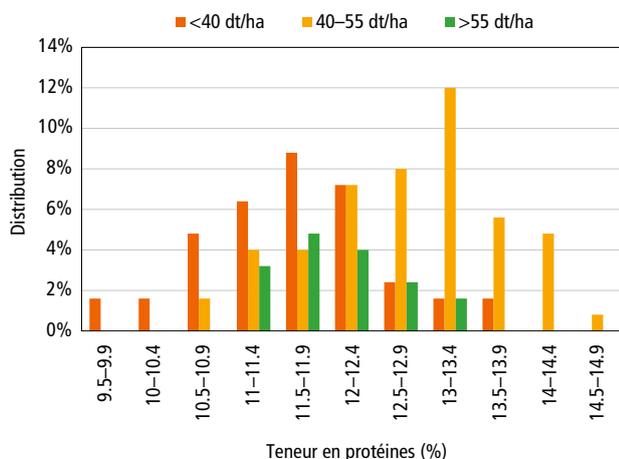


Figure 4 | Distribution de la teneur en protéines en fonction du potentiel de rendement du site: faible potentiel (<40 dt/ha) en orange, potentiel moyen (entre 40 et 55 dt/ha) en jaune et potentiel élevé (supérieur à 55 dt/ha) en vert.

Seule Molinera présentait une régression linéaire significative de la teneur en protéines en fonction du rendement du site (données non montrées). La quantité en protéine du grain de Molinera est restée supérieure aux autres en toutes circonstances et relativement stable autour de 13 % quel que soit le niveau de rendement du site. En revanche, les autres variétés ont montré une teneur en protéine maximale, variable selon les potentiels de rendement des sites

La relation négative entre la teneur en protéine et le rendement est bien connue et est spécifiquement documentée pour les variétés de blé cultivées en Suisse (Häner et Brabant, 2016). Ces études ont aussi montré l'influence des périodes de fertilisation au cours de la croissance des plantes, et notamment des stades critiques pour une accumulation d'azote conduisant à un enrichissement du grain en azote. Une nutrition des plantes particulièrement tributaire de la dynamique de minéralisation de l'azote du sol peut expliquer les très larges variations de teneurs en protéines relevées indépendamment de la productivité du sol dans le contexte de cette étude. Les différences variétales de stratégie d'accumulation de l'azote relevées dans des conditions fertilisées avec des engrais minéraux (Büchi *et al.*, 2016) sont donc ici en partie masquées par la dynamique de l'azote du sol très variable d'un site à l'autre.

En effet, trois situations distinctes peuvent être identifiées entre les sites à partir de la figure 2: un premier groupe de points montre des rendements moyens inférieurs à 40 dt/ha, un second groupe, des rendements entre 40 et 55 dt/ha et un troisième groupe, des rendements supérieurs à 55 dt/ha.

Sur les sites à bas potentiel de rendement (<40 dt/ha), les teneurs en protéines observées étaient faibles et principalement situées aux alentours de 11,5 à 12 % (fig. 4). Dans ces conditions peu fertiles, la plante investit le N dans sa biomasse plutôt que dans le grain. Les grains produits sur les sites à moyen potentiel (40-55 dt/ha) ont obtenu une quantité de protéines nettement supérieure avec des teneurs comprises entre 12 et 14 % de protéines. Enfin, les sites aux rendements les plus élevés, supérieurs à 55 dt/ha, ont affiché des teneurs en protéines certes supérieures aux sites à bas rendement, mais inférieures à celles des sites moyens, avec quelques situations critiques en dessous de 12 %, montrant un déséquilibre nutritionnel des plantes en fin de cycle en particulier. L'adéquation entre la variété et le site est primordial. L'importance d'une nutrition azotée suffisante en fin de cycle est effectivement importante pour garantir la qualité de certaines variétés (Häner et Brabant, 2016).

Etude variétale

Les essais *on-farm* conduits dans cette étude étayent les résultats obtenus on-station dans l'étude de Büchi *et al.* (2016). En revanche, ces deux études soulignent la nécessité de mieux connaître le comportement des variétés dans des contextes de faibles niveaux de rendement. En effet, les réseaux d'études variétales ne valorisent que des essais dont les rendements présentent des différences significatives, généralement sur des parcelles bien pourvues en N. Les autres sites sont invalidés, faisant ainsi perdre des connaissances agronomiques importantes sur des variétés moins productives.

Cette démarche conduit à écarter des variétés intéressantes pour des contextes en agriculture biologique qui valorisent des sites extensifs avec peu d'intrants ainsi que des variétés qui présentent un intérêt par rapport à des critères autres que le rendement et la teneur en protéines, par exemple des qualités agronomiques, rhéologiques ou nutritionnelles. Une étude variétale complémentaire sur des sites extensifs est donc nécessaire.

Conclusions

- L'étude de la stabilité des performances est une autre manière d'interpréter les essais variétaux. Elle permet de situer une variété par rapport à une autre et de suivre son évolution en fonction du potentiel d'un site. Une interprétation des résultats à l'aide de régressions relatives aux potentiels des sites testés et de l'écovale des variétés fournit de précieuses informations sur le comportement des variétés pour une production adaptée selon le site.

- Certaines variétés comme Molinera s'adaptent parfaitement aux sols riches et permettent des rendements optimaux, contrairement à Azsita qui atteint très vite ses limites. Cependant, la différence entre ces deux variétés se gomme sur les sites extensifs. De plus, Molinera reste la plus performante et constante au niveau de la teneur en protéines, ce qui permet d'assurer sa qualité quel que soit le contexte.
- De façon générale, les variétés testées (Titlis, Wiwa) obtiennent de bons résultats en termes de qualité et s'adaptent particulièrement bien aux différentes conditions du site. Des variations importantes de qualité sont toutefois relevées selon les sites sans relation avec le rendement. Pizza montre par contre une plus forte variation dans la teneur en protéines.
- Un optimum entre rendement et teneur en protéines est observé pour les sites à rendement moyen (40–55 dt/ha), offrant un bon compromis entre quantité et qualité du grain.
- Cette étude nécessite une étude variétale complémentaire pour valoriser des conditions extensives et des variétés aux caractéristiques diversifiées. Il s'agit de faire en sorte que pour chaque sol corresponde un choix de variété aux caractéristiques spécifiques. ■

Remerciements

Nous remercions l'OFAG pour le financement du projet CerQual, les paysans du réseau qui ont accueilli et accompagné ces essais sur leur ferme ainsi que les nombreuses personnes ayant contribué aux travaux des champs et de laboratoire.

Bibliographie

- Büchi, L., Charles, R., Schneider, D., Sinaj, S., Maltas, A., Fossati, D., & Mascher, F. (2016). Performance of eleven winter wheat varieties in a long term experiment on mineral nitrogen and organic fertilisation. *Field Crops Research* 191, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.022>
- Ceccarelli, S. (1996). Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica* 92, 203–214. <https://doi.org/10.1007/BF00022846>
- Dawson, J.C., Huggins, D.R., & Jones, S.S. (2008). Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. *Field Crops Research* 107, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.01.001>
- FiBL (2020). Liste variétale céréales 2021.
- Foulkes, M.J., Hawkesford, M.J., Barraclough, P.B., Holdsworth, M.J., Kerr, S., Kightley, S., & Shewry, P.R. (2009). Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research* 114, 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.005>
- Häner, L.L., Brabant, C. (2016). L'art de fractionner l'azote pour optimiser le rendement et la teneur en protéines du blé. *Recherche agronomique suisse* 7, 80–87.
- Herrera, J.M., Levy Häner, L., Mascher, F., Hiltbrunner, J., Fossati, D., Brabant, C., Charles, R., & Pellet, D. (2019). Lessons From 20 Years of Studies of Wheat Genotypes in Multiple Environments and Under Contrasting Production Systems. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01745>
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P.C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- Wricke, G. (1962). Evaluation Method for Recording Ecological Differences in Field Trials. *Z. Pflanzenzücht.* 47, 92–96.