

ECO2MALT - Evaluation et amélioration de la qualité brassicole de l'orge d'hiver pour la sélection de variétés adaptées aux systèmes de cultures à bas niveaux d'intrants

Beillouin D.^{1,2,3}, Perrot C.⁴, Herbommez J.F.⁵, Schwebel S.⁶, Schmitt M.⁶, Jeuffroy M.-H.¹

¹ INRAE, UMR Agronomie INRAE-AgroParisTech-Université Paris-Saclay, F-78850 Thiverval-Grignon

² CIRAD, UPR HORTSYS, F-34398 Montpellier, France

³ HortSys, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

⁴ Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, F-59242 Cappelle-en-Pévèle

⁵ KWS Momont, 7 Rue de Martinval, F-59246 Mons-en-Pévèle

⁶ Institut Français de la Brasserie et Malterie, 7 Rue du Bois de la Champelle, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy

Correspondance : damien.beillouin@cirad.fr

Résumé

La France est l'un des premiers producteurs européens d'orge brassicole et le premier exportateur mondial de malt. Les intrants utilisés sur cette culture participent aux émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole et peuvent indirectement entraîner des effets négatifs sur la santé des consommateurs. Actuellement, la production d'orge brassicole avec un moindre recours aux intrants chimiques est limitée par le manque de variétés et d'itinéraires techniques adaptés permettant de maintenir les volumes et la qualité de la production. Le coût et le temps nécessaires pour réaliser les analyses de qualité des grains (micromaltages) rendent l'identification des variétés adaptées aux itinéraires techniques non-conventionnels délicate. Le travail réalisé dans le projet CasDAR Eco2Malt avait pour objectifs de concevoir et d'évaluer des idéotypes variétaux et des itinéraires techniques adaptés à une production d'orge brassicole en bas niveaux d'intrants, et de proposer des méthodes rapides d'estimation de la qualité brassicole des orges d'hiver 6 rangs pour accélérer la sélection variétale. A travers l'expérimentation, nous montrons que les variétés actuelles cultivées dans un itinéraire technique avec des apports d'azote réduits (-30% -apports aux dates habituelles) et sans pesticide ne permettent pas systématiquement d'atteindre les teneurs en protéines et le rendement calibré demandés pour les orges de brasserie. Par simulation, nous montrons qu'il est indispensable de retarder les apports d'engrais, lorsque les doses sont réduites pour atteindre des performances agronomiques élevées. Nous avons identifié les caractéristiques variétales adaptées à ce mode de conduite technique. Adapter à la fois les génotypes et la stratégie de fertilisation azotée permet à l'itinéraire technique à bas niveau d'intrants d'atteindre des performances agronomiques similaires à celles de la conduite intensive en azote, et d'améliorer les performances environnementales. Certains des idéotypes les plus performants en bas niveaux d'intrants obtiennent également des performances élevées en haut-niveaux d'intrants. Afin de limiter ces coûts d'analyses du potentiel brassicole des variétés lors de la sélection, un indice de sélection a été développé et évalué, permettant de hiérarchiser les caractéristiques des grains et ou du moult pour atteindre la qualité brassicole. L'intérêt de modèles prédisant le potentiel brassicole d'une lignée à partir des analyses rapides sur grain a été testé. Ces résultats ont pour objectif de permettre de caractériser plus de lignées rapidement et ainsi de faciliter le développement de lignées adaptées à différents contextes, dont les bas-intrants.

Mots-clés : Idéotype, Fertilisation azotée, Teneur en protéines, Calibrage, Conduite culturale, Sélection variétale

Abstract: Assessment and improvement of the malting quality of winter barley for breeding varieties adapted to low-input crop management

France is one of Europe's leading producers of malting barley and the world's leading exporter of malt. The inputs used on this crop contribute to greenhouse gas emissions from the agricultural sector and can indirectly lead to negative effects on consumer health. Currently, the production of malting barley with reduced use of chemical inputs is limited by the lack of suitable varieties and technical management practices to maintain production volumes and quality. The cost and time required to carry out grain quality analyses (micromalting) make the identification of varieties adapted to non-conventional technical itineraries difficult. The objectives of the work carried out in the CasDAR Eco2Malt project were to design and evaluate varietal ideotypes and technical management practices adapted to low-input malting barley production, and to propose rapid methods for estimating the malting quality of 6-row winter barley in order to speed up varietal selection. Through experimentation, we showed that current varieties grown in management with reduced nitrogen inputs (-30% - inputs at the usual dates) and without pesticides do not systematically achieve the protein content and calibrated yield required for malting barley. Through simulation, we showed that it is essential to delay fertilizer application when the doses are reduced to achieve high agronomic performance. We have also identified the varietal characteristics adapted to this technical management practices. Adapting both the genotypes and the nitrogen fertilisation strategy ensures the low-input technical management to achieve agronomic performance similar to that of nitrogen-intensive management, and to improve environmental performance. Some of the best performing ideotypes at low input levels also achieve high performance at high input levels. In order to limit these costs of analysing the brewing potential of varieties during selection, a selection index has been developed and evaluated, making it possible to prioritise the characteristics of grains and/or wort to achieve brewing quality. The interest of models predicting the brewing potential of a line based on rapid grain analyses was tested. These results are intended to enable more lines to be characterised rapidly and thus facilitate the development of lines adapted to different contexts, including low inputs management practices.

Keywords: Pea, Oilseed rape, Wheat, Cereals, Crop sequence, Nitrate, Soil mineral nitrogen, Leaching, Environmental impact

Introduction

La France est l'un des principaux producteurs européens d'orge de brasserie (3,6 millions de tonnes en 2015) et exporte 75 % de sa production. Le pays occupe aussi la première place mondiale pour le commerce de malt avec 20 % des échanges mondiaux (Brasseurs de France, 2016). En France, les variétés d'orge d'hiver à 6 rangs occupent une grande proportion des surfaces destinées à la brasserie. Les potentiels de rendement sont en effet plus élevés que ceux de l'orge de printemps et la qualité brassicole des orges d'hiver à 6 rangs progresse rapidement. Cette production est réalisée avec un recours important aux intrants de synthèse : En 2011, 132 kg N ha⁻¹ d'engrais azoté de synthèse ont été utilisés en moyenne sur la sole d'orge pour les surfaces sans apports organiques (Agreste, 2014 -type hiver et printemps confondus). La production d'orge brassicole représente ainsi près de 40 % des impacts environnementaux de l'ensemble de la filière « orge-malt-bière » (Virtanen *et al.*, 2007). Plus particulièrement, la fertilisation azotée de synthèse consomme en moyenne, à elle seule, près d'un tiers de l'énergie nécessaire à la production d'orge brassicole (Khan *et al.*, 2010 ; Sahabi *et al.*, 2013).

Des essais ont montré sur blé tendre que la dose totale d'azote et les quantités de pesticides utilisées peuvent être significativement réduites par rapport aux pratiques conventionnelles sans impacter significativement la marge brute des cultures (Loyce *et al.*, 2012a, 2012b, 2008). Ces résultats ont été confirmés sur blé dur (Debaeke *et al.*, 2000) et tournesol (Debaeke et Nolot, 2000), en France et à

l'international (Hossard *et al.*, 2016). Pour assurer les bonnes performances agronomiques de ces itinéraires techniques, il est indispensable d'adapter les caractéristiques variétales à l'itinéraire technique et aux usages visés (par ex : Loyce *et al.*, 2012a, 2012b, 2008 ; Meynard, 1985 ; Vereijken, 1989).

Les travaux de recherche sur la conception d'itinéraires techniques à bas niveau d'intrants sont nettement moins avancés pour l'orge que pour le blé. Ces espèces, bien que proches, ont des caractéristiques différentes, notamment vis-à-vis du cycle de développement, ou de la valorisation de l'azote (Delogu *et al.*, 1998). De plus, les teneurs en protéines optimales pour la transformation ne sont pas les mêmes : les processus de transformation de l'orge pour la malterie ou la brasserie requièrent des critères de qualité spécifiques, sur la taille des grains et la teneur en protéines. La production d'orge de brasserie à bas niveau d'intrants devra donc répondre aux différents critères définis par la filière pour optimiser les étapes de transformation de l'orge en malt et en bière : richesse en amidon (qui sera transformé en sucres au cours du brassage), potentiel enzymatique (amylases, protéases, peptidases, glucanases, etc), mais aussi ne pas présenter de défaut technologique (problèmes de fermentation ou de filtration). Pouvoir prédire le potentiel brassicole d'une lignée sans réaliser systématiquement de micromaltage mais en réalisant des tests directement sur grain d'orge dès la récolte, serait une grande avancée en termes de sélection. Cela permettrait d'écarter les lignées avec un défaut rédhibitoire pour une utilisation brassicole dès les premières années d'expérimentation où le nombre d'individus testés est important.

Les objectifs de ce travail étaient de i) évaluer la capacité des variétés actuelles à répondre aux cahiers des charges brassicoles dans un itinéraire technique à bas niveau d'intrants, ii) identifier les caractéristiques variétales et d'itinéraires techniques adaptés aux bas niveaux d'intrants pour une production élevée et qualitative dans une diversité d'environnements, et iii) optimiser les méthodes d'évaluation de la qualité brassicole pour les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants.

1. Des performances agronomiques et technologiques réduites pour les variétés actuelles cultivées dans des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants

Douze essais ont été menés pendant deux années culturales (2013-2014 et 2014-2015) sur sept sites dans le nord de la France (Figure 1).

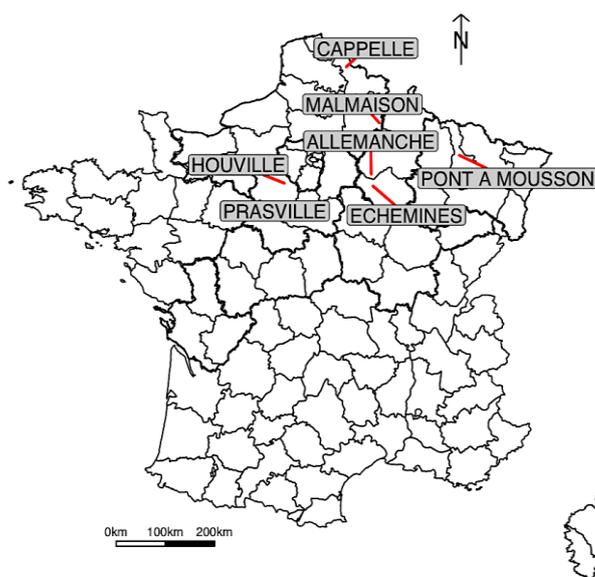


Figure 1 : Localisation géographique des essais analysés

Un itinéraire technique à haut niveau d'intrants (HI) et un système avec apport en azote réduit et absence de pesticides et régulateurs de croissance (LNP) ont été comparés (Tableau 1). Pour chaque itinéraire technique, 20 génotypes (4 cultivars inscrits et 16 lignées en cours de sélection), ont été répartis aléatoirement au sein de 3 blocs. Les génotypes testés, qui étaient dans la dernière ou avant-dernière année avant l'enregistrement, ont été choisis, selon l'expertise des sélectionneurs, sur la base de leur diversité attendue en termes de performances agronomiques dans des conditions de faibles intrants. L'intensité des maladies observée a été très faible au cours des essais : les symptômes ont couvert moins de 20 % de la surface foliaire sur un maximum de 25 % des plantes. Le principal facteur différenciant l'itinéraire technique a donc été la nutrition azotée.

Tableau 1 : Itinéraires techniques comparés dans les 12 sites du réseau expérimental

	Qté d'azote apportée	Fractionnement	Fongicides	Régulateur de croissance
Haut-niveau d'intrant (HI)	Méthode du bilan	Sortie hiver et Epi-1-cm	1 ou 2 traitements	1 traitement
Bas niveau d'intrants (LNP)	Méthode du bilan moins 30%	Sortie hiver, et Epi-1-cm	0 traitement	0 traitement

En moyenne sur l'ensemble des sites-années, le rendement est inférieur de 17% pour le système LNP par rapport au système HI. Le rendement calibré (poids des grains dont la taille est supérieure à 2.5 mm) est inférieur de 22% dans le système LNP. Le rendement moyen observé varie de 6,9 t ha⁻¹ à 8,4 t ha⁻¹ suivant les génotypes, dans les conduites LNP (Figure 2). Le seuil de calibrage (plus de 90% des grains doivent avoir une taille supérieure à 2.5 mm) est atteint, en moyenne, dans quatre essais pour le système LNP contre six (sur 12) pour le système HI. D'importantes améliorations de la capacité des génotypes à satisfaire les exigences de calibrage sont donc nécessaires dans les deux itinéraires techniques. Pour cette variable, la proportion de la variance expliquée par le génotype est 2,2 fois supérieure à celle expliquée par l'itinéraire technique. L'identification des génotypes à gros grains devrait donc être une priorité pour améliorer la capacité des conduites culturales à satisfaire les critères de calibrage exigés par la malterie et la brasserie. Une grande diversité de performances agronomiques est observée parmi les 20 génotypes testés. Par exemple, dans le système LNP, un génotype a atteint le seuil de calibrage dans 10 environnements sur 12, alors que d'autres n'ont jamais respecté ce critère (Figure 2). Ces résultats confirment l'intérêt de travailler sur le levier génétique pour améliorer ces critères de production.

La teneur en protéines a atteint les spécifications de maltage (teneur comprise entre 9.5 et 11.5%) dans deux essais pour le système LNP contre huit pour le système HI. Sur les 20 génotypes et pour l'ensemble des essais, la teneur moyenne en protéines n'a atteint que 9,0 % pour le système LNP contre 9,8 % pour le système HI. Une augmentation de la teneur en protéines des grains spécifiquement dans les systèmes LNP est nécessaire. L'itinéraire technique explique 3,4 fois plus de variabilité de la teneur en protéines que l'effet variété. Il convient donc de chercher à améliorer la capacité des systèmes de LNP à satisfaire le critère teneur en protéines en modifiant les stratégies de fertilisation azotée.

Six génotypes sur les 20 testés atteignent des performances supérieures à la moyenne pour les critères rendement, probabilité de respecter l'intervalle de teneur en protéines et le seuil de calibrage requis par la transformation. Des marges de manœuvre importantes existent donc pour améliorer la production brassicole en bas niveau d'intrants.

Les analyses montrent une diminution significative ($p < 0,001$) de la quantité de protéines totales (8,5%) et solubles (3,6%) dans l'itinéraire à bas niveau d'intrant (LNP) en comparaison à l'itinéraire HI. L'impact sur le pouvoir diastasiq (activité enzymatique amylolytique) reste limité et n'est pas significatif. Pour rappel, les protéines sont des composantes primordiales de la qualité de la bière finie et interviennent dans les étapes de fermentation (activités enzymatiques et nutrition azotée de la levure), la tenue de

mousse et la stabilité colloïdale de la bière. L'itinéraire technique à bas niveau d'intrant entraîne également une légère baisse de l'extrait de malt, c'est-à-dire de la totalité des matières solubilisées dans le moût qui pourront être utilisées lors de la fermentation brassicole. Celle-ci est fortement liée à plus faible teneur en protéines totales et surtout solubles dans les échantillons LNP puisque ces dernières participent à l'extrait. Les malts des échantillons LNP sont mieux désagrégés que ceux provenant de l'itinéraire HI. La friabilité qui indique un état global de modification du grain au cours du maltage est améliorée de 13% ($p < 0,001$). Cela est confirmé par la teneur en beta-glucanes solubles du moût, qui sont diminués de 35% ($p < 0,001$), et la viscosité impactée en conséquence avec une baisse de 8,5% ($p < 0,001$). L'itinéraire technique LNP engendre des orges à teneur en protéines plus faible. Cela donne des orges qui ont une prise d'eau plus rapide et une meilleure désagrégation physique du grain

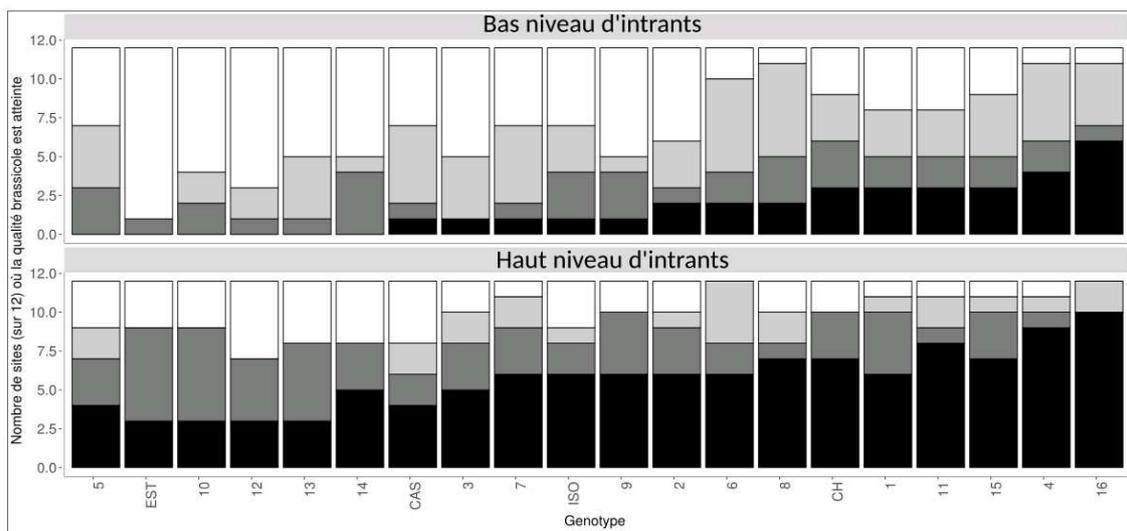


Figure 2 : Qualité brassicole des génotypes dans les systèmes à haut et bas intrants. Les barres noires représentent les situations dans lesquelles les seuils de teneur en protéines du grain et calibrage des grains sont respectés ; les barres blanches : aucun des critères n'est respecté ; les barres gris clair : seul le critère calibrage est respecté ; les barres gris foncé : seul le critère de teneur en protéines des grains est respecté.

L'ensemble des résultats montrent que l'itinéraire de culture impacte la teneur en protéines qui, à son tour, va impacter la qualité technologique du malt. Une adaptation du procédé pour transformer les échantillons cultivés avec une dose d'azote réduite pourrait donc être envisagée. Elle est délicate à maîtriser, mais son objectif serait de travailler le procédé pour arriver à obtenir une même teneur en eau à la fin de trempage et en germination indépendamment de la teneur en protéines de manière à limiter l'impact de ce facteur sur les résultats.

Une autre solution serait d'adapter les variétés et les itinéraires techniques pour améliorer les performances en bas niveaux d'intrants. Cependant, les performances agronomiques sont variables pour les deux itinéraires techniques suivant les environnements, ou entre les génotypes pour les différents environnements. Il apparaît donc important d'adapter les choix techniques (variété et fertilisation azotée) aux caractéristiques des environnements de production pour améliorer les performances agronomiques de l'orge. Une caractérisation précise des environnements est nécessaire.

2. Une diversité des fréquences d'occurrence des facteurs impactant le rendement

Pour permettre aux sélectionneurs et aux agronomes de concevoir et d'adapter le choix des génotypes et itinéraires techniques aux conditions de la zone dans laquelle ils sont destinés, une caractérisation précise des environnements de production de l'orge a été effectuée.

Nous avons estimé l'impact des facteurs climatiques sur le rendement de l'orge d'hiver dans les 35 principaux départements producteurs d'orge brassicole sur 25 ans (Figure 3). Les environnements (Départements X années) avec des combinaisons de stress climatiques semblables ont été regroupés à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique. Ces groupes d'environnements ont été appelés "régimes de stress climatiques" (RSC). La fréquence d'occurrence des RSC dans chaque département a ensuite été analysée.

Sur les 25 années et dans la zone d'étude, quatre RSCs expliquent 27 % de la variabilité totale du rendement observé de l'orge d'hiver (Beillouin *et al.*, 2018a). Les différents RSCs se caractérisent par : des températures élevées lors du remplissage du grain associées soit à des précipitations hivernales importantes (RSC1 : 5 % des milieux - rendement moyen de 5,5 t.ha⁻¹), soit à des températures de vernalisation faibles (RSC2 : 29% des milieux - rendement moyen de 6,2 t.ha⁻¹) ; des niveaux de gel hivernal élevés et des fortes pluies pendant la montaison (RSC3 : 35 % des milieux - rendement moyen de 6,5 t.ha⁻¹), de faibles précipitations hivernales et peu de stress thermique (RSC4 : 35 % des milieux - rendement moyen de 7,2 t.ha⁻¹).

En considérant l'ensemble des années, chaque département est caractérisé par une grande diversité de RSC : deux tiers des départements français ont connu les quatre RSC au cours des années étudiées. La fréquence d'occurrence du RSC4 augmente graduellement vers le nord (Figure 3), alors que la fréquence du RSC3 augmente vers le sud. Le RSC1 n'a été observé que dans les départements du sud de la zone de production.

Ainsi, trois groupes de départements ont pu être créés suivant la fréquence d'occurrence des RSCs (Figure 3). Les zones ainsi caractérisées (ci-après appelées ensembles territoriaux) peuvent servir de base à une réflexion pour une adaptation spécifique des caractéristiques variétales et de l'itinéraire techniques aux stress rencontrés dans la zone de production de l'orge.

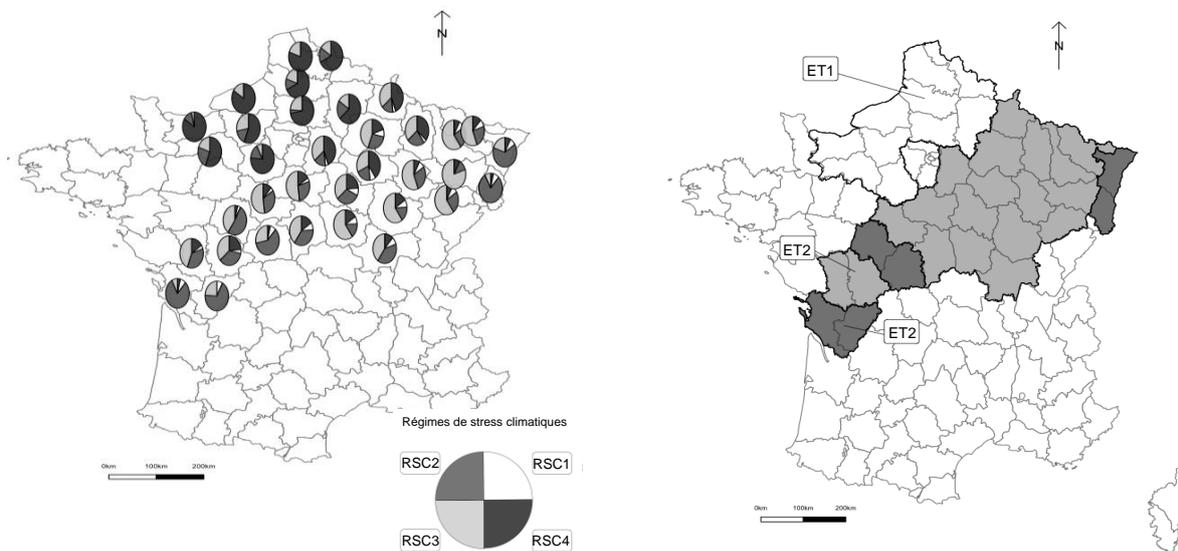


Figure 3 : Structure géographique des régimes de stress climatiques : a) Fréquences des régimes de stress climatiques dans chaque département, b) Ensembles territoriaux (ET) définis sur la base des fréquences des régimes de stress climatiques dans chaque département.

3. Azodyn-Orge : un modèle de culture opérationnel pour prédire la production quantitative et qualitative en orge brassicole

Améliorer la production d'orge brassicole pour le bas niveau d'intrants dans les différents environnements de production nécessite d'identifier de nouvelles stratégies de fertilisation azotée et des caractéristiques variétales favorables à ces milieux de cultures. Les modèles de culture dynamiques peuvent être utilisés à ces fins. En effet, ils permettent de tester rapidement un nombre important de modalités techniques d'apports d'azote ou de traits variétaux – plus rapidement que ce qui pourrait être réalisé dans des réseaux d'essai multi-environnementaux. Ils facilitent également l'accès aux variables difficiles ou coûteuses à mesurer expérimentalement, par exemple la lixiviation d'azote et les pertes gazeuses.

Aucun modèle simple et opérationnel prédisant l'ensemble des variables d'intérêt en orge brassicole n'était disponible. Un modèle de culture dynamique adapté à cette espèce a été développé (AZODYN-Orge - Beillouin *et al.*, 2018b), à partir d'un modèle disponible sur blé (Jeuffroy et Recous, 1999). Les paramètres du modèle ont été identifiés pour l'orge, et un module spécifique pour prédire le calibrage des grains a été développé. Azodyn-Orge a été paramétré à partir des données expérimentales des essais mis en place lors du projet (200 combinaisons génotype X environnement en conduite technique intensive et économe en intrants) et de données expérimentales publiées dans la littérature scientifique. Le modèle a ensuite été évalué sur l'ensemble des autres situations expérimentales non utilisées pour paramétrer le modèle (280 autres génotype X environnement).

Le modèle développé prédit le rendement, la teneur en protéines de grains et le calibrage avec des erreurs inférieures à 15%. Azodyn-Orge identifie dans près de ¾ des combinaisons entre deux génotypes, celui avec le rendement en grains le plus élevé ; et dans 85% celui avec le calibrage le plus élevé. Le modèle discrimine plus difficilement les performances pour la teneur en protéines (Tableau 2). Le modèle est efficace pour discriminer les environnements avec du stress azoté (essais LNP) et les situations avec fort recours aux intrants (essais HI).

Azodyn-orge permet donc de prendre en compte de façon relativement précise l'impact des caractères génotypiques, des pratiques culturales et l'environnement pédoclimatique sur le rendement, la teneur en protéines du grain et la taille des grains de l'orge brassicole. Ces résultats montrent que le modèle pourrait aider à explorer l'impact d'une modification de la gestion de la fertilisation azotée ou des caractéristiques variétales sur la production quantitative et qualitative de l'orge.

Tableau 2 : Proportion des situations (%) pour lesquelles le modèle de culture Azodyn-orge a correctement classé les environnements de production (Site X Année X Itinéraire technique) et les génotypes pour 11 variables simulées.

Variable	Pourcentage de situations bien classées (%)	
	Par environnement de production (tous génotypes confondus)	Par génotype (tous environnements confondus)
Matière sèche à floraison (g m ⁻²)	81	54
INN à floraison	75	68
Azote absorbé à floraison (kg ha ⁻¹)	72	46
Nombre de grains par m ² (grains.m ⁻²)	69	84
Poids de mille grains (g.1000 grains ⁻¹)	72	85
Teneur en protéines (%)	75	55
Rendement (t ha ⁻¹)	78	72
Matière sèche à récolte (g m ⁻²)	55	53
Azoté absorbé à récolte (kg ha ⁻¹)	77	51
Calibrage des grains (%)	78	85
Rendement calibrés (grains >2.5 mm) (t ha ⁻¹)	72	74

4. De nouvelles stratégies de fertilisation azotée adaptées au bas niveau d'intrant

A l'aide d'Azodyn-Orge, nous avons testé l'effet de différentes dates, doses et fractionnements de la fertilisation azotée sur les performances agronomiques et environnementales de la production d'orge. Nous avons analysé ces effets sur les 35 principaux départements brassicoles et considéré 25 années climatiques pour tester la robustesse des stratégies de fertilisation azotée testées.

Les résultats montrent que la stratégie classique de fertilisation azotée (apports à sortie hiver et épi-1cm) conduit à une forte probabilité d'atteindre l'intervalle de protéines souhaité, mais aussi à des pertes élevées d'azote vers l'environnement et à des rendements inférieurs à de nombreuses autres stratégies testées. Un ensemble de nouvelles stratégies de fertilisation azotée offre un meilleur compromis entre les teneurs en protéines, rendement calibré et pertes en azote (Tableau 3). Certaines de ces stratégies sont robustes face à l'ensemble des conditions climatiques et régions considérées. Globalement, ces dernières permettent de largement réduire les pertes d'azote dans l'environnement, mais ne permettent pas de maximiser le rendement calibré dans l'ensemble des groupes de départements définis précédemment. Il est nécessaire d'adapter les stratégies de fertilisations suivant les régions pour maximiser simultanément les trois critères étudiés.

Globalement, les stratégies les plus favorables se caractérisaient par une réduction et un apport plus précoce de l'azote (pour plus de détails voir Beillouin *et al.*, 2018c). Cela suggère que des carences en azote précoces ne sont pas préjudiciables à la production quantitative et qualitative de l'orge, comme déjà suggéré pour le blé (Jeuffroy et Bouchard, 1999 ; Ravier, 2017).

Tableau 3 : Performances moyennes agronomiques et environnementales sur 25 ans pour les meilleures stratégies de fertilisation azotée dans les différents ensembles territoriaux. A= apport à sortie hiver, B= Stade A + 10 jours, C= Début d'élongation de la tige, D= stade C +15 jours, E= Stade C + 25 jours)

Ensembles territoriaux	Stratégies de fertilisation		Performances moyennes sur les 25 années climatiques		
	Dose d'N comparé à dose bilan (%)	Fractionnement	Rendement calibré (t ha ⁻¹)	Probabilité d'atteindre l'intervalle de teneur en protéines (%)	Pertes en azote (kg N ha ⁻¹)
ET1	100	AC	6.1	73	44
	70	BD	5.5	71	23
	80	BD	5.9	71	24
	70	CE	5.8	69	17
	80	BCE	5.7	73	30
	90	BCE	6.2	72	30
	110	BCE	6.7	71	37
ET2	100	AC	5.1	59	48
	70	CE	4.8	57	19
	70	CE	5.2	57	22
	70	BD	4.3	58	28
	80	BD	4.8	59	30
ET3	100	AC	4.8	56	42
	70	CE	4.3	56	19
	70	BD	4.0	58	25
	80	BD	4.5	58	27
	90	BD	4.9	58	29
	100	BD	5.2	56	31
	110	BD	5.5	56	33

5. De nouvelles caractéristiques variétales adaptées aux bas niveaux d'intrants

A l'aide du modèle de culture AZODYN-orge, les caractéristiques variétales permettant de maximiser les performances agronomiques de la culture d'orge ont été identifiées, sur la base d'une des stratégies de fertilisation azotée avec apports réduits (dose totale : 70% dose recommandée et apports à sortie hiver +10 jours et élongation de la tige +15 jours – fractionnement « BD »).

Différents potentiels de rendement, capacités à utiliser et valoriser l'azote, et précocités des variétés ont été testées, en prenant comme valeur de base la moyenne observée sur le réseau d'essai. Ainsi les performances de 500 génotypes virtuels ont été définis et étudiés. Ces derniers ont été analysés sur les 35 départements de la zone de production et 25 années climatiques passées.

Parmi les génotypes virtuels analysés, 6 génotypes particuliers présentent des performances agronomiques particulièrement intéressantes (Beillouin, 2017). En situation de faibles intrants azotés, ces génotypes ont atteint un rendement calibré élevé (134% de la valeur moyenne observée sur les 500 génotypes), une forte probabilité de respecter l'intervalle de teneur en protéines (118% de la valeur moyenne), et de faibles pertes en azote (93% de la valeur moyenne). Ces résultats montrent donc que de nouvelles combinaisons de caractéristiques, différentes de celles actuellement utilisées, semblent intéressantes à produire pour développer les conduites à bas niveau d'intrants.

Ces profils génotypiques se différencient de ceux adaptés en haut niveau d'intrants par une capacité à produire une biomasse élevée en sortie-hiver, leur potentiel de nombre de grains, leur précocité et leur efficacité de conversion du rayonnement photosynthétique en biomasse. Différentes combinaisons de chacune de ces caractéristiques variétales permettent d'arriver à des performances élevées en situation d'azote réduit : par exemple, deux sous-profils étaient possibles (Figure 4) : un potentiel relativement faible (vs. élevé) du nombre de grains associé à une sensibilité plus faible (vs. plus élevée) au stress de l'azote, et une floraison précoce (vs. tardive -Figure 4a).

Les valeurs des caractéristiques variétales observées sur ces génotypes virtuels n'étaient pas très éloignées de celles observées sur des génotypes existants, ce qui permet de penser qu'ils pourraient être créés en sélection. Des travaux complémentaires sont néanmoins nécessaires pour étudier plus précisément la vraisemblance et la possibilité concrète de sélectionner et créer ces génotypes.

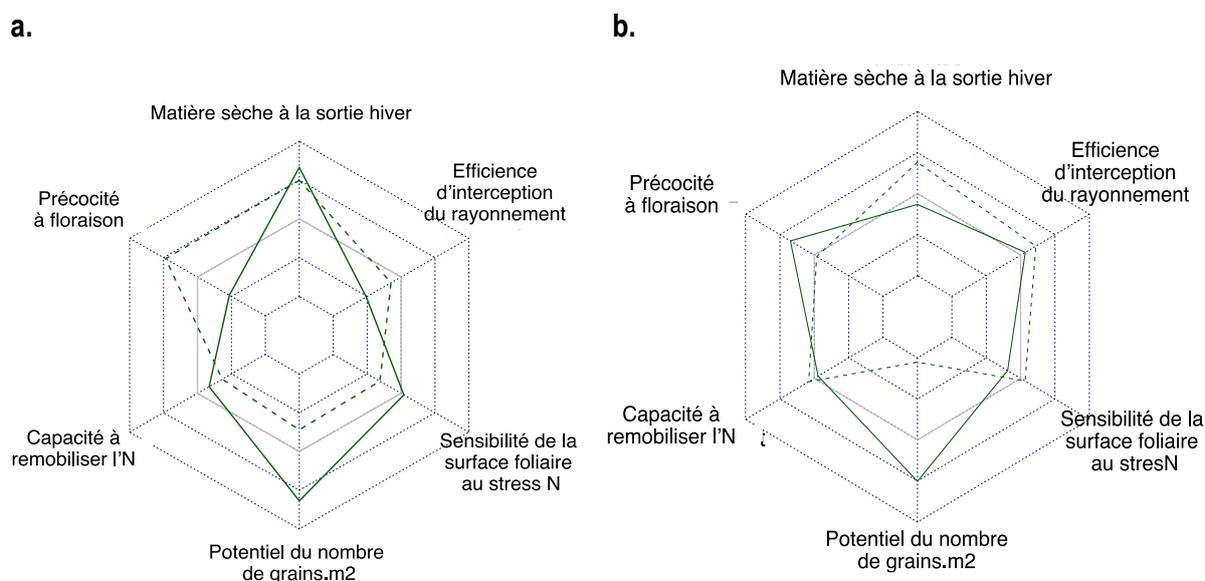


Figure 4 : Profils des génotypes présentant des performances élevées en situation d'azote réduit (a) et en situation intensive en azote (b). Deux profils génotypiques ont été identifiés pour chacune de ces situations (traits pleins ou traits en pointillés). Les valeurs de chaque caractéristique génotypique ont été normalisées.

6. La sélection en haut niveau d'intrants ne permet pas de repérer l'ensemble des géotypes adaptés aux systèmes à bas niveau d'intrants

Grâce à l'analyse des résultats expérimentaux, nous avons aussi montré que la probabilité qu'un géotype satisfasse aux deux critères de maltage (teneur en protéines et calibrage) était corrélée de façon significative entre les deux systèmes (LNP et HI). Toutefois, ces indicateurs n'étaient pas corrélés de façon significative avec le rendement dans le système LNP. Certains géotypes à faible rendement dans le système HI présentaient des rendements élevés dans le système LNP (exemple géotypes 8, 15, 16, 4). Parmi les géotypes avec des performances supérieures à la moyenne en LNP (géotypes 7,10,11,12,14, ISO), un seul présentait aussi des rendements et des qualités de maltage supérieurs à la moyenne aussi dans le système HI. Ainsi, baser la sélection variétale sur du haut niveau d'intrants ne permet pas d'identifier l'ensemble des géotypes performants adaptés aux bas niveaux d'intrants (Figure 5) : les géotypes ayant le meilleur compromis entre rendement calibré, teneur en protéines et pertes en azote dans les systèmes à bas niveau d'intrants sont, en grande majorité, différents de ceux ayant les meilleures performances en haut niveau d'intrants.

Ces analyses expliquent, en partie, les performances médiocres des systèmes à bas niveau d'intrant quand les géotypes cultivés ont été produits et sélectionnés dans et pour des itinéraires techniques intensifs en intrants. Des résultats d'autres études sur d'autres espèces montraient également, par exemple, que la sélection indirecte dans des conditions d'azote élevé pour obtenir des performances dans des conditions d'azote faible devient de plus en plus inefficace avec l'augmentation de la contrainte en azote (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2005).

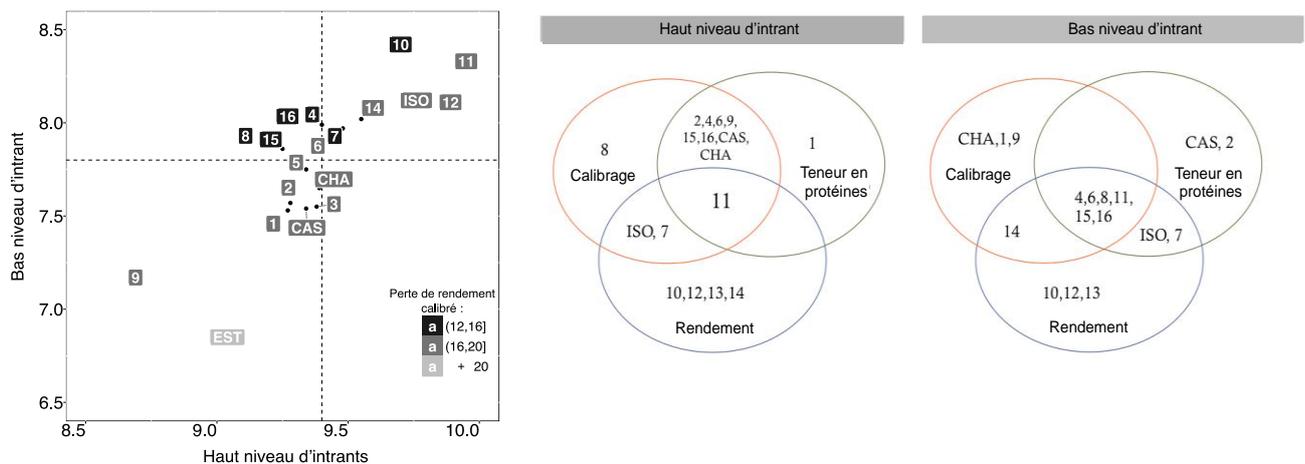


Figure 5 : Comparaisons des teneur en protéines (axes) et des rendements (couleur des points) des 20 géotypes dans les itinéraires techniques intensifs et économes en intrants (à gauche), et identification des géotypes présentant des performances supérieures à la moyenne des 20 géotypes pour 3 critères de production dans les itinéraires techniques à haut et bas niveau d'intrants (à droite). Par exemple, le géotype 8 a un calibrage supérieur à la moyenne; et le 11 est supérieur à la moyenne pour les trois indicateurs.

7. Favoriser l'identification des géotypes adaptés en bas niveau d'intrants en sélection indirecte à l'aide d'indicateurs mesurés en haut niveau d'intrants

Mettre en place des essais spécifiquement pour identifier les géotypes adaptés aux bas niveaux d'intrants peut être considéré par les sélectionneurs et l'organisme d'inscription, comme trop coûteux en temps et en main-d'œuvre. De plus, il pourrait être intéressant de repérer des géotypes ayant des performances agronomiques élevées, aussi bien dans les systèmes à bas niveau d'intrants que dans les systèmes avec une utilisation plus intensive d'intrants.

Les caractéristiques variétales associées à des bonnes performances à la fois en situation de stress azoté et en situation de non-stress azoté ont été repérées. Pour cela les pertes de rendement calibré (PRC) et les pertes de protéines des grains (PTP) entre les deux systèmes ont été analysées. L'objectif est de minimiser les PRC et les PTP. Les caractéristiques variétales étudiées sont la capacité des génotypes à produire de la matière sèche, leur absorption d'azote à différents stades de croissance, la dynamique des plantes N et les composantes de rendement mesurées dans des conditions d'azote élevé.

La PRC est inversement corrélée au poids de mille grains du génotype et à la matière sèche accumulée après l'épiaison, mais augmente avec le nombre de grains par mètre carré (Figure 6a). Les génotypes avec un plus faible nombre de grains par m², par exemple, ont donc tendance à maintenir leur rendement calibré en situation de stress azoté. Une capacité élevée de la plante à absorber l'azote au début du cycle de culture et un indice de récolte élevé de l'azote favorise un faible PTP (Figure 6b). Il n'a pas été observé d'effet important de la remobilisation et de l'assimilation de l'azote après floraison sur la PTP. La présence de corrélations significatives entre caractéristiques variétales et variation des performances entre les deux itinéraires techniques est encourageante pour développer des méthodes de sélection plus efficaces pour le bas niveau d'intrants.

La PRC et la PTP ne sont pas corrélées de façon significative. Il serait donc possible de réduire simultanément pour certains génotypes les pertes de rendement calibré et les pertes en teneur en protéines en situation de stress azoté. Ces résultats demandent cependant à être confirmés et l'opérationnalité de la méthode mérite d'être testée.

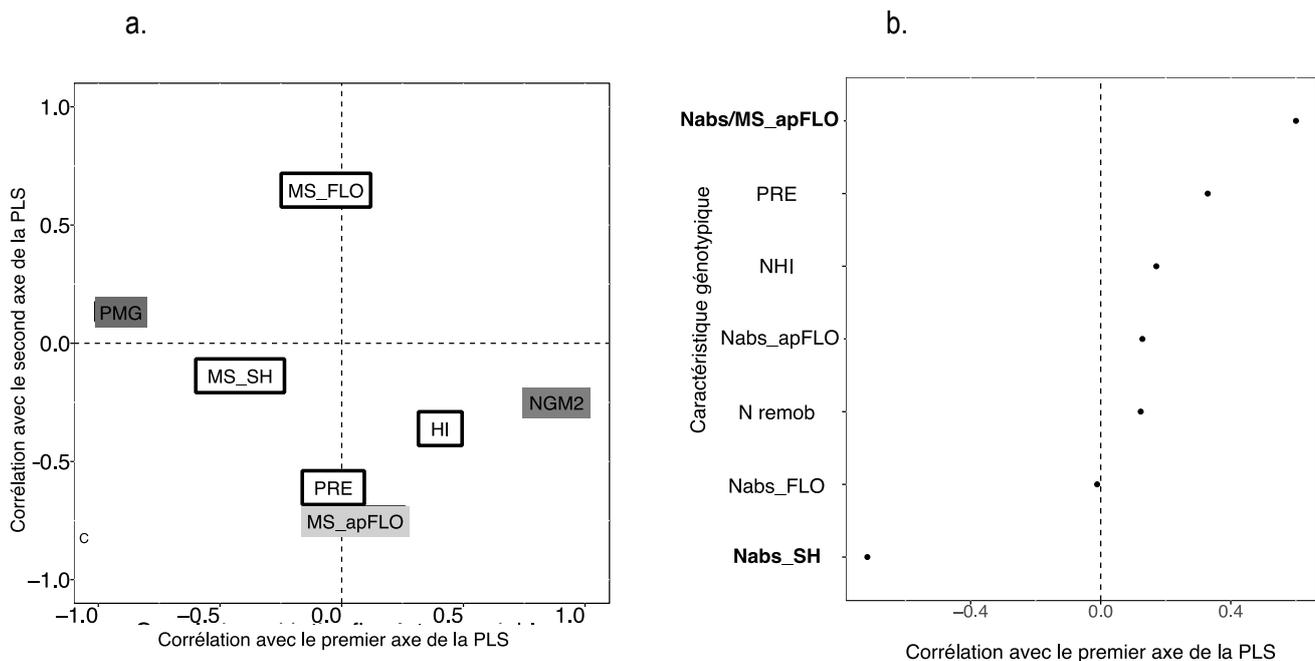


Figure 6 : Caractéristiques variétales corrélées à : (a) la perte de rendement calibré (b) la perte de teneur en protéines. ap_FLO : après floraison, FLO : Floraison, HI : Indice de récolte, MS : Matière sèche, Nabs : Azote absorbé, rempb : remobilisé, NGM2 : Nombre de grains par mètre carrés, PMG : poids de mille grains, PRE : Précocité, SH : Sortie hiver. PLS : partial least square regression. Deux axes de la PLS étaient nécessaires pour caractériser la perte de rendement calibré, un seul était nécessaire pour la perte de teneur en protéines. La PLS est une méthode statistique qui permet de relier les caractéristiques variétales à une variable d'intérêt.

8. Indice de sélection brassicole

L'orge de brasserie doit posséder de nombreuses propriétés techno-fonctionnelles pour répondre aux attentes des transformateurs. Les paramètres pris en compte au cours du processus de sélection afin de déterminer le potentiel brassicole d'une orge sont notamment l'extrait, les protéines totales, le pouvoir diastasique, la viscosité du moût, la friabilité et la teneur en β -glucanes. Parmi ces paramètres analysés, certains semblent avoir une influence plus importante que d'autres. L'objectif était dans ce contexte de déterminer les paramètres les plus pertinents afin d'estimer au mieux la qualité brassicole globale des lignées, tout en maîtrisant les coûts d'analyses.

Une base de données a été créée à partir d'analyses complètes de micromaltages réalisées sur 490 individus six rangs provenant des essais Florimond Desprez et Momont des récoltes 2008 à 2014. Des seuils éliminatoires ont été définis pour chaque paramètre. Une note entre 85 et 115 (le témoin étant à 100) est attribuée pour chaque paramètre analysé suivant des paliers et des pas d'incrémentation. La pondération de chaque caractère a été ensuite réalisée grâce à une régression linéaire multiple. L'indice de sélection brassicole ainsi obtenu (méthodologie présentée en figure 7) permet de classer les lignées en trois groupes par rapport à un témoin et constitue ainsi un outil d'aide à la décision à destination du sélectionneur.

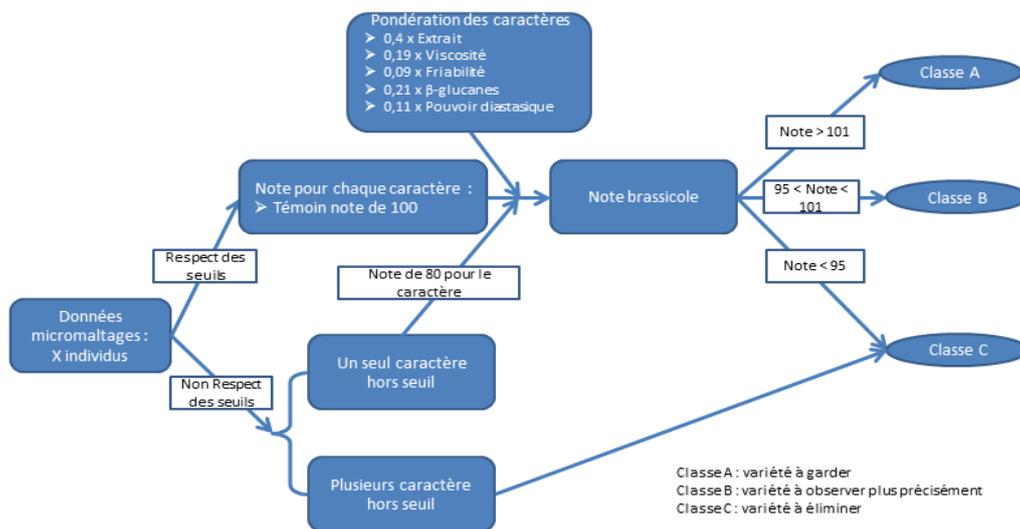


Figure 7 : Indice de sélection brassicole permettant de trier rapidement les lignées en cours de sélection suivant leur potentiel brassicole.

9. Tests prédictifs de la qualité brassicole

Actuellement, le seul moyen de détermination de la qualité brassicole d'une orge reste l'analyse des paramètres mesurés après un micromaltage. Cette méthode destructive nécessite une quantité de grains importante pour les générations précoces de sélection. De plus les coûts et les délais imposent de restreindre la méthode aux lignées avancées. Pouvoir prédire précocement, rapidement et sur un faible échantillon de grain d'orge, la qualité d'une lignée pourrait permettre de mieux prendre en compte le système à bas-niveau d'intrants dans la sélection variétale.

L'analyse statistique par régression linéaire simple réalisée sur la base de données a permis d'obtenir des modèles de prédiction de certains paramètres à partir d'autres :

L'équation obtenue de prédiction des FAN (Free amino Nitrogen- acides aminés libres) à partir des protéines solubles peut être utilisée en sélection (R^2 ajusté de 0.924). L'équation de prédiction des bêta-glucanes en fonction de la friabilité et de la viscosité obtenue (R^2 ajusté de 0.825 et écart-type résiduel de 97) est peu précise mais utilisable en screening en sélection.

L'équation de prédiction de l'extrait de Bishop (à partir du poids de mille grains et des protéines totales mesurées sur orge) a été testé sur 140 individus de la base de données. Le coefficient de corrélation obtenu est très faible ($r=0.29$) et ne permet pas une prédiction de l'extrait à partir des données.

La prédiction de l'extrait a aussi été étudiée en prenant en compte la Pasting Temp, les protéines totales et le pic de viscosité. Ces mesures ont été réalisées à l'aide du RVA (Rapid Visco Analyser) par l'IFBM sur une base de données de micromaltages de 204 individus (à la fois sur des orges de printemps à 2 rangs, des orges d'hiver à 2 rangs et des orges d'hiver à 6 rangs) issus de 2 années et 11 lieux. Le coefficient de détermination (R^2) de 0.44 est trop faible pour permettre une utilisation en sélection.

La prédiction de certains caractères brassicoles a été testée grâce à l'utilisation d'un FT-NIR (Fourier Transformed Near InfraRed) basé sur le principe de mesure du proche infrarouge. L'expérimentation a été réalisée sur un jeu de 218 échantillons sur grains entiers, sur grains séchés et aussi sur farine. Seuls l'extrait et les protéines totales obtiennent des corrélations élevées avec les valeurs observées (Tableau 4) avec néanmoins un RPD (Ratio Prediction Derivation) inférieur à 2.

Tableau 4 : Qualité d'ajustement des modèles prédictifs des caractéristiques individuelles de qualité brassicole à partir de mesures infra-rouges réalisées sur grains, grains séchés ou farine. RPD : Ratio Prediction Derivation.

		Extrait	Prot tot	Prot sol	Kolbach	Viscosité	Friabilité	Beta Glucanes	Pouvoir diastasique
grains	R ²	0,73	0,73	0,41	0,19	0,54	0,27	0,21	0,26
	RPD	1,95	1,91	1,32	1,12	1,48	1,18	1,13	1,17
grains séchés	R ²	0,67	0,59	0,24	0,21	0,64	0,29	0,64	0,25
	RPD	1,88	1,58	1,15	1,14	1,68	1,19	1,68	1,16
Farine	R ²	0,63	0,83	0,20	0,20	0,39	0,45	0,29	0,20
	RPD	1,66	2,41	1,14	1,14	1,29	1,37	1,19	1,14

Données utilisables
 Données proches d'être utilisables
 Données non utilisables

Conclusion

Cette étude a pris en compte l'ensemble de la chaîne de production apportant des pistes concrètes aux agriculteurs sur le comportement et les modalités de gestion des orges d'hiver dans des itinéraires culturaux à bas-intrants, et aux sélectionneurs, malteurs et brasseurs sur les méthodes et les critères de sélection adaptés à ces conduites. Actuellement, le bas niveau d'intrants conduit à obtenir des orges à plus faible teneur en protéines ce qui a un impact direct sur la prise d'eau et par conséquent sur la qualité technologique. Cependant, nos résultats sont prometteurs : nous montrons que, *in silico*, adapter simultanément les caractéristiques variétales et l'itinéraire technique permet d'atteindre des performances comparables aux variétés actuelles dans des itinéraires techniques avec recours intensif aux intrants tout en diminuant l'impact environnemental.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par une subvention du Ministère français de l'Agriculture (CASDAR Eco2malt C-2013-04) Nous remercions l'équipe technique de UMR Agronomie, Florimond-Desprez et KWS-Momont pour leur assistance technique lors des expérimentations.

Références bibliographiques

Agreste, 2014. La fertilisation. Doss. 27–47.

Beillouin D., 2017. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et culturaux en orge d'hiver brassicole pour des conduites culturales à bas niveau d'intrants : approche par expérimentation et modélisation (Doctoral dissertation).

Beillouin D., Jeuffroy M.-H., Gauffreteau A., 2018a. Characterization of spatial and temporal combinations of climatic factors affecting yields: An empirical model applied to the French barley belt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, pp.402-411.

Beillouin D., Leclère M., Barbu C.M., Bénézit M., Trépos R., Gauffreteau A., Jeuffroy M.-H., 2018b. Azodyn-Barley, a winter-barley crop model for predicting and ranking genotypic yield, grain protein and grain size in contrasting pedoclimatic conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, pp.237-248.

Beillouin D., Trépos R., Gauffreteau A., Jeuffroy M.-H., 2018c. Delayed and reduced nitrogen fertilization strategies decrease nitrogen losses while still achieving high yields and high grain quality in malting barley. *European Journal of Agronomy*, 101, pp.174-182.

Brancourt-Hulmel M., Heumez E., Pluchard P., Beghin D., Depatureaux C., Giraud A., Le Gouis J., 2005. Indirect versus direct selection of winter wheat for low-input or high-input levels. *Crop Sci.* 45, 1427–1431. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.0343>

Brasseur de France, 2016. Livre blanc de la brasserie française.

Debaeke P., Nolot J., 2000. Testing crop management systems for sunflower in South-West France, in: *Proc. 15th Int. Sunflower Conf.* pp. 1–6.

Debaeke P., Nolot J., Bataillon P., Raffailac D., 2000. Evaluation d'itinéraires techniques pour le blé dur dans le Sud-Ouest de la France. *Durum Wheat Improv. Mediterr. Reg. New Chall. C Royo MM Nachit N Fonzo JL Araus Eds Options Méditerranéennes Sér. A 40*, 587–590.

Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., De Falcis D., Maggiore T., Stanca A., 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *Eur. J. Agron.* 9, 11–20. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00019-7)

Hossard L., Archer D.W., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Ernfors M., Jeuffroy M.-H., Munier-Jolain N., Nilsson C., Sanford G.R., Snapp S.S., Jensen E.S., Makowski D., 2016. A Meta-Analysis of Maize and Wheat Yields in Low-Input vs. Conventional and Organic Systems. *Agron. J.* 108, 1155. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0512>

Jeuffroy M.-H., Bouchard C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number.

Jeuffroy M.-H., Recous S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *Eur. J. Agron.* 10, 129–144.

Khan S., Khan M.A., Latif N., 2010. Energy requirements and economic analysis of wheat, rice and barley production in Australia. *Soil Environ.* 29, 61–68.

Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M.H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Félix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G., 2012a. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Res.* 125, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.007>

Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M.H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Félix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G., 2012b. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Res.* 125, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.007>

Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M.H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Félix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Prot.* 27, 1131–1142. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.02.001>

Meynard J.-M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du Blé d'hiver. INA/PG, Paris.

Ravier C., 2017. Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée: Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation.

Sahabi H., Feizi H., Amirmoradi S., 2013. Which crop production system is more efficient in energy use: wheat or barley? *Environ. Dev. Sustain.* 15, 711–721. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9402-4>

Vereijken P., 1989. Experimental systems of integrated and organic wheat production. *Agric. Syst.* 30, 187–197. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(89\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0308-521X(89)90046-2)

Virtanen Y., Katajajuuri J.-M., Usva K., et al., 2007. An analysis of the total environmental impact of barley-malt-beer chain, in: 31st EBC Conference, Venice. p. 9.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL).