



**HAL**  
open science

# Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et cultureux en orge d'hiver brassicole pour des conduites culturelles à bas niveau d'intrants : approche par expérimentation et modélisation

Damien Beillouin

► **To cite this version:**

Damien Beillouin. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et cultureux en orge d'hiver brassicole pour des conduites culturelles à bas niveau d'intrants : approche par expérimentation et modélisation. Agronomie. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLA027 . tel-01899536

**HAL Id: tel-01899536**

**<https://theses.hal.science/tel-01899536>**

Submitted on 19 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 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

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à Agroparistech

École doctorale n° 581  
ABIES (Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnement et Santé)  
Spécialité de doctorat : **Sciences Agronomiques**

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 29 Septembre 2017 par

**Damien Beillouin**

## Composition du Jury :

Alexandra JULLIEN Professeur, AgroParisTech, Paris	Présidente du jury
Maryse BRANCOURT Directrice de Recherche, INRA, Estrées-Mons	Rapporteur
Paolo BARBERI Professeur d'Agronomie, SSSA, Pise, Italie	Rapporteur
Pierre CASADEBAIG Chargé de Recherche, INRA, Toulouse	Examineur
Pierre ROUMET Chargé de Recherche INRA, Montpellier	Examineur
Philippe LONNET Directeur sélection céréales Florimond-Desprez, Cappelle	Examineur
Marie-Hélène JEUFFROY	

Directrice de Recherche, INRA, Grignon

Directeur de thèse

## Avant Propos

Nous tenons à remercier les partenaires et financeurs qui ont permis la réalisation de ce travail :

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) entre Florimond-Desprez et l'INRA.

Les travaux de recherche ont également obtenu un financement du Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, dans le cadre du projet CasDar ECO2MALT : « Optimisation de l'évaluation 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'intrant ».





## Remerciements

Ce travail de thèse est le fruit d'un travail collectif où de nombreuses personnes ont été impliquées.

J'adresse en premier lieu, d'immenses remerciements à Marie-Hélène. Tu as été un guide formidable ces 4 dernières années. Tu as eu confiance en moi et ma offert l'opportunité de travailler et d'apprendre à tes côtés. Une qualité d'encadrement que j'ai beaucoup apprécié : ton enthousiasme et ta motivation sans faille m'a poussé à donner le meilleur de moi-même. Tu as toujours su trouver des solutions aux difficultés que je rencontrais, et me pousser à aller de l'avant. Tes conseils et relectures nombreuses ont grandement participé à améliorer ce document. Un grand merci à Arnaud. Tu es impressionnant de pertinence et d'esprit critique, à tel point que je redoutais tes retours de commentaires sur les articles en cours ! J'ai énormément appris à tes côtés, et j'aurais encore beaucoup plus à apprendre. Enfin, merci à Ronan qui a eu un rôle prépondérant dans ce travail de thèse : ta disponibilité, ta patience et tes conseils avisés m'ont beaucoup aidé dans la partie modélisation.

Merci aux membres du comité de pilotage de thèse pour m'avoir guidé dans les premiers pas de ce travail : Jacques le Gouis, Olivier Robert, Phillipe Debaeke, Patrick Boivin et Eric Gozé. Une pensée particulière pour Olivier Robert.

J'ai eu la chance de faire partie d'un projet Casdar où les différents partenaires étaient particulièrement enthousiastes pour travailler ensemble. J'ai beaucoup apprécié l'ambiance et les sessions de travail organisées (et les repas de travail accordés à la thématique du projet !). Cette réussite doit beaucoup à Claire Perrot, qui malgré son emploi du temps chargé a géré de manière remarquable les réunions annuelles. Merci à Jean-François Herbomez, Claire Perrot, Marie-Hélène, Sophie Schwebel, Marc Schmitt et Patrick Boivin.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : Maryse Brancourt, Paolo Barberi, Pierre Casadebaig, Pierre Roumet, Alexandra Julien et Philippe Lonnet.

Les deux premières années de thèse ont été occupées par la partie expérimentale. Cette dernière a fait intervenir de nombreux acteurs. Pour la partie expérimentation au champ, prélèvements et suivi des cultures je voudrais remercier les équipes techniques de Florimond-Desprez et de KWS Momont. Un merci particulier à Jean-François Herbomez, Claire Perrot, Patrick Vandembavière, Vincent Thibaut et Christian Antraygues. Pour la partie dépouillement des échantillons (merci aux quelques 200 000 plantes qui ont été sacrifiées pour les besoins de la science), un grand et sincère merci à toute l'équipe technique de l'UMR agronomie. Un merci particulier à Damien Marchand pour son aide précieuse, ses

encouragements et ses conseils sur toute la partie expérimentale. J'ai beaucoup apprécié travailler à tes côtés. Merci à Gilles pour tes conseils avisés. Un merci particulier à Jean-Marc Teulé qui a beaucoup participé à la démarche de qualité (et m'a fait gagner beaucoup de temps) de la partie expérimentale en développant des outils informatiques de suivi d'échantillons.

Malgré toute cette aide, je ne m'en serais jamais sorti sans l'aide des CDD et stagiaires : Chloé Colas pour l'été 2014, Pierre-Mael Lhotte et Margot Leclère pour l'été 2015 et Pierre-Mael (encore lui !) pour l'été 2016. Vous m'avez impressionné par la quantité de travail que vous avez effectué !

Pour la partie modélisation, je remercie à nouveau Ronan Trépos. Tu as vraiment eu une large contribution à cette partie (merci pour les dizaines de milliers de simulations effectuées, et re-effectuées et ... re-effectuées parce que trouver le bon plan de simulation dès le premier coup, ce n'est pas simple...). Merci également à Bernard Nicolardot pour le partage de son expérience lors de l'intégration d'un nouveau module de minéralisation à Azodyn. Enfin, merci Maud Bénézit (l'Azoteam), pour les heures passées à décortiquer le modèle ou voyager dans les soutes à bagages.

Pour vos relectures ou conseils ou échanges tout simplement sur la thèse, merci à David Makoswki, Tamara Ben-Ari et Corentin Barbu. Merci également à Céline, Margot, Maude et Amandine pour l'aide pour la finalisation du manuscrit. Un merci tout particulier pour Margot et Florence pour votre aide précieuse qui m'a permis de faire avancer la réflexion de thèse.

Un très grand merci aux précaires de l'unité, qui ont animé le quotidien du laboratoire. Merci à Cynthia, J-B, Joel, Margot, Amandine, Charles, Céline, Maud, Maude, Valentin, Mathilde pour les parties de Tarot, les récoltes de tilleul/méligèthes, les soirées précaires, les discussions et tout le reste. Vous avez largement contribué à rendre ces trois années (voire un peu plus) passées au laboratoire agréables ! Un merci particulier à Charles et Mathilde avec qui il a été agréable de partager le bureau.

Un merci également au Grignonais qui ont fait en sorte que le temps passé hors du laboratoire a également été fort agréable : Merci à Julie, Ophélie, Gaspard, Clémence, Laure et Arthur pour les soirées inter-pavillons, les barbecues, l'escalade, et tout le reste. Merci aux membres du 3b, avec qui j'ai beaucoup apprécié partager mon temps : Mathilde, Charles, Louis, Florence et Anabelle.

Merci également aux sportifs de l'UCPA : Matthieu, Gilles et Tim pour le ski, la mer, le parapente (conseil aux novice : faites attention aux voitures...), tous les autres sports et les futures randos. Vous avez représenté des bouffées d'oxygène au long de ces deux dernières années ! Merci aussi aux copains de l'ESA et autres, de métropole et d'au delà pour... plein de choses ! Enfin, pas des moindres, un grand merci à ma famille, mes parents, Laure et Céline pour m'avoir toujours encouragé, pour être là et pour tout le reste.

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>I. Etat de l'art</b> .....	<b>17</b>
1. Contexte de la production d'orge brassicole.....	17
2. Variabilité des performances en fonction des sites et des années.....	23
3. Concevoir des itinéraires techniques adaptés au BNI.....	27
4. Quelle démarche utiliser pour concevoir des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants ?..	40
<b>II. Démarche et questions de recherche</b> .....	<b>47</b>
1. Définition des objectifs, contraintes et cahier des charges de la production d'orge brassicole .	48
2. Evaluation de la diversité des performances agronomiques des géotypes actuels, cultivés dans des conduites économes en intrants .....	48
3. Identification des caractéristiques variétales adaptées aux conduites économes en intrants .....	49
4. Développement d'un modèle pour simuler l'impact des caractéristiques variétales et de la conduite azotée dans une large gamme d'environnements .....	50
5. Structuration des environnements de production de l'orge en fonction des facteurs climatiques impactant la production.....	51
6. Identification des caractéristiques des conduites azotées économes dans la diversité des environnements de production .....	52
7. Identifier les combinaisons de caractéristiques variétales et des conduites azotées économes les plus favorables à une production d'orge d'hiver 6 rangs brassicole dans la diversité des environnements de production .....	53
8. Discussion générale .....	54
<b>III. Matériel et méthodes</b> .....	<b>54</b>
1. Un réseau d'expérimentation multi-local .....	55
2. Base de données des rendements moyens départementaux des orges d'hiver entre 1989 et 2013	58
3. Base de données sur les principales variables climatiques (moyennes départementales) entre 1989 et 2013.....	58
4. Base de données sur les principales caractéristiques des sols (moyenne départementale) entre 1989 et 2013.....	59
5. Modèle de culture utilisé .....	59
<b>Chapitre 1. Evaluation de la production d'orge dans des conduites économes en intrants</b> .....	<b>61</b>
1. Introduction .....	55
2. Material and methods .....	58
3. Results .....	61
3. Discussion.....	68
Conclusion .....	72
<b>Chapitre 2. Caractéristiques variétales adaptées au stress azoté</b> .....	<b>76</b>
1. Introduction .....	81
2. Material and methods .....	83
3. Results .....	89
4. Discussion.....	95
<b>Chapitre 3. Modèle de culture en orge brassicole</b> .....	<b>108</b>
1. Introduction .....	115
2. Material and methods .....	117
3. Results .....	125
4. Discussion.....	135
Conclusion .....	138
<b>Chapitre 4. Caractérisation des environnements de production</b> .....	<b>145</b>
1. Introduction .....	149



2. Material and methods .....	151
3. Results .....	153
4. Discussion.....	159
Conclusion .....	163
<b>Chapitre 5. Stratégies de fertilisation azotée pour l'orge brassicole .....</b>	<b>171</b>
1. Introduction .....	174
2. Material and methods .....	177
3. Results .....	180
4. Discussion.....	186
Conclusion .....	190
<b>Chapitre 6. Caractéristiques variétales adaptées au bas niveau d'azote .....</b>	<b>195</b>
1. Introduction .....	201
2. Material and methods .....	203
3. Results .....	206
4. Discussion.....	214
5. Conclusion.....	221
<b>Chapitre 7. Discussion Générale .....</b>	<b>227</b>
1. Quelles caractéristiques des itinéraires techniques avec intrants réduits en orge brassicole ?	229
2. Perspectives et futures recherches pour le développement des itinéraires avec recours réduits aux intrants.....	243
3. Démarche mobilisée pour la conception d'idéotypes .....	247
4. Suite de la démarche d'idéotypage en orge brassicole .....	261
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>264</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>265</b>
<b>List of Figures .....</b>	<b>283</b>
<b>List of Tables.....</b>	<b>285</b>
<b>List of Publications.....</b>	<b>287</b>

## Liste des acronymes

- CIMMYT** : International maize and wheat improvement center /Centre international d'amélioration du maïs et du blé
- FAO** : Food agricultural organization / Organisation des nations unies pour l'agriculture et l'alimentation
- HI** : High-input
- IGE** : Interaction Génotype X Environnement
- IGC** : Interaction Génotype X Conduite culturale
- IGEC** : Interaction Génotype X Environnement X Conduite culturale
- IFT** : Indice de fréquence de traitement
- INN/NNI** : Indice de nutrition azotée (sans unité)/ nitrogen nutrition index (unitless)
- INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique
- IRRI** : Institut international de recherche sur le riz
- LNP** : Low-Nitrogen and Pesticides (conduit culturale avec réduction de la fertilization N et des pesticides)
- N** : Azote/Nitrogen
- PLS** : Partial Least Square regression/ régression des moindres carrés partiels
- TP/GPC** : teneur en protéines/grain protein content
- TPE** : Target Population Environnement
- NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : ion nitrate
- NH<sub>3</sub>** : ammoniac
- SAU** : Surface Agricole Utile
- SSP** : Service de la Statistique et Prospective du ministère de l'agriculture

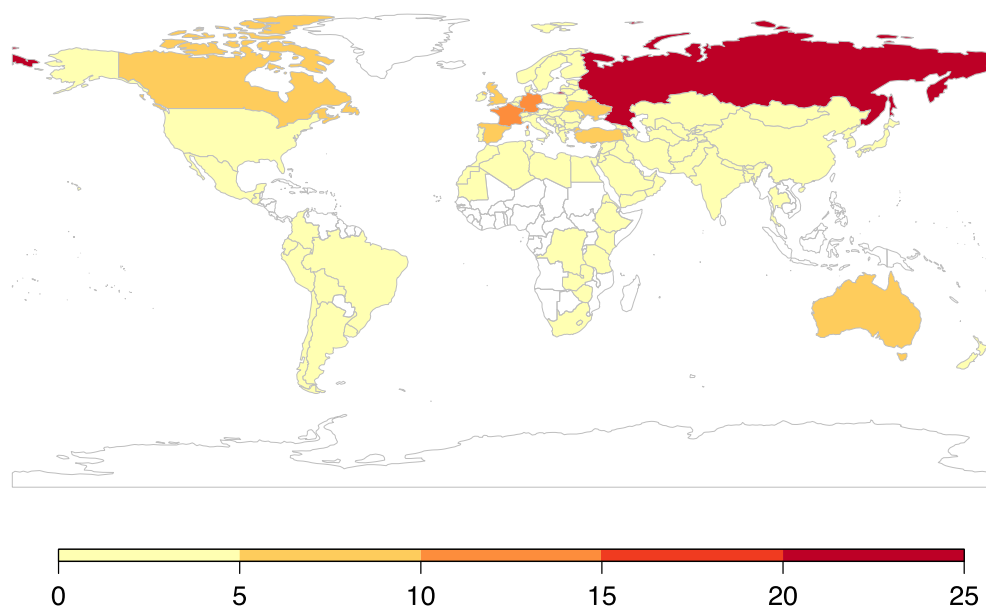


## INTRODUCTION

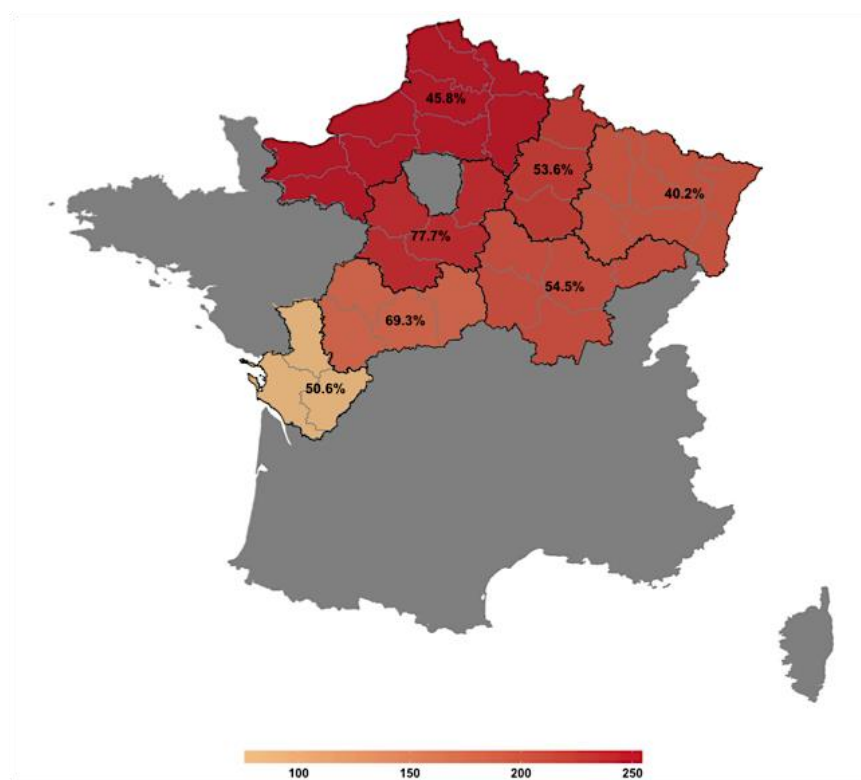
L'orge (*Hordeum vulgare L.*) est l'une des plus anciennes plantes domestiquées (Nevo & Shewry, 1992), et aujourd'hui la quatrième céréale la plus cultivée au monde après le maïs, le riz et le blé (Newton et al., 2011). Son aire de culture s'étend des climats subarctiques à subtropicaux (Gupta et al., 2010- Figure 1). Emblavée sur près de 50 millions d'hectares à l'échelle mondiale (moyenne 2010- 2014 - FAO, 2017), environ deux tiers de la production d'orge est utilisée pour l'alimentation animale, un tiers pour la production de malt et 2% directement pour l'alimentation humaine (Baik and Ullrich, 2008). Sur les 22 millions de tonnes de malt produites mondialement chaque année, 94% sont destinées à la production de bière, 4% à la distillation et 2% à d'autres usages alimentaires (Ullrich, 2011). Le marché du malt est soutenu par une légère augmentation des volumes de production de bière (+ 1% par an au niveau mondial - Canadean Wisdom, 2014 – +3.1% en 2015 en France –Brasseurs de France, 2017). En Europe comme aux Etats-Unis dans les années 1980-1990 (Carroll and Swaminathan, 2000), le secteur brassicole connaît un fort développement des brasseries artisanales. La France comptait, par exemple en 2015, plus de 800 brasseries artisanales, le double par rapport à 2010 (Brasseurs de France, 2017).

En France, 1.7 million d'hectares d'orge (hiver et printemps) ont été cultivés en 2015, soit 18.3 % de la sole céréalière (Agreste, 2015). Les (anciennes) régions Centre, Bourgogne, Champagne-Ardenne, Picardie, Nord-Pas-de-Calais, et Poitou-Charente représentaient 75 % de la surface nationale cultivée en orge (Figure 2). En 2015, près de 11.3 millions de tonnes de grains ont été produites, dont 3.6 millions de tonnes en orge de brasserie. La France est ainsi l'un des principaux producteurs européens d'orge de brasserie et exporte 75 % de sa production (2.6 millions de tonnes). De plus, de nombreux sites industriels de malterie sont implantés sur le territoire et permettent de produire chaque année 1.4 millions de tonnes de malt, dont 80 % sont destinées aux marchés extérieurs. La France occupe ainsi la première place mondiale pour l'exportation de malt, gérant 20 % des échanges mondiaux (Brasseurs de France, 2016).

Plusieurs types d'orge existent : printemps (semées au début du printemps) ou hiver (semées à l'automne) ; épis à 2 ou 6 rangs (Figure 3). Depuis 2012, les surfaces emblavées en orge d'hiver augmentent par rapport à l'orge de printemps (Figure 4). Une des particularités de la production d'orge brassicole française est l'utilisation de variétés d'hiver à 6 rangs d'hiver (Doucet, 2004), qui représentent plus de la moitié des surfaces cultivées en orge brassicole (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2014).



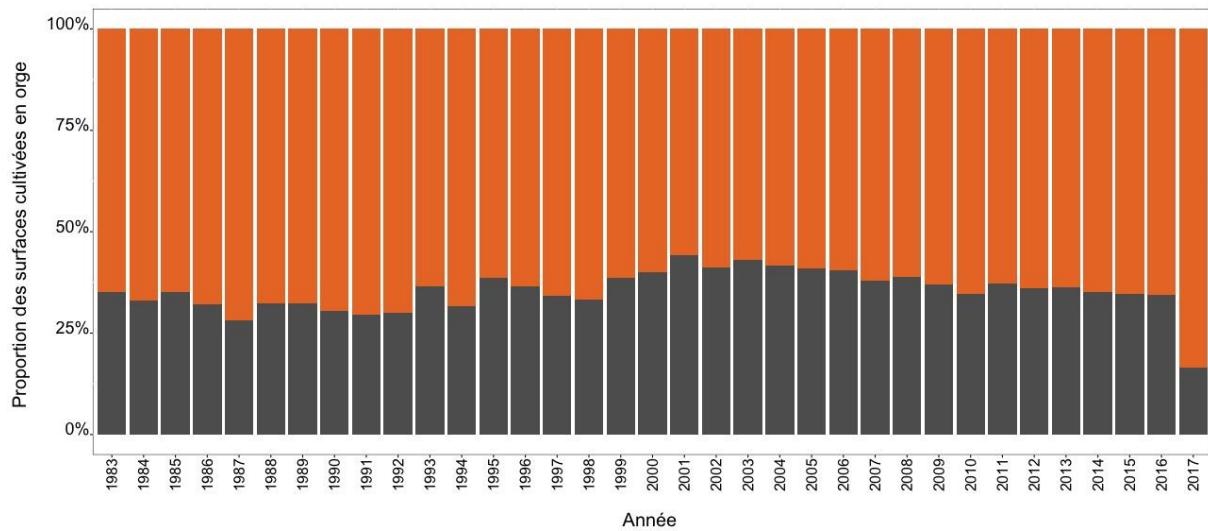
**Figure 1.** Production totale ( $\times 10^3$  tonnes) d'orge (*Hordeum vulgare L.*) par pays en 2014 (FAO, 2017)



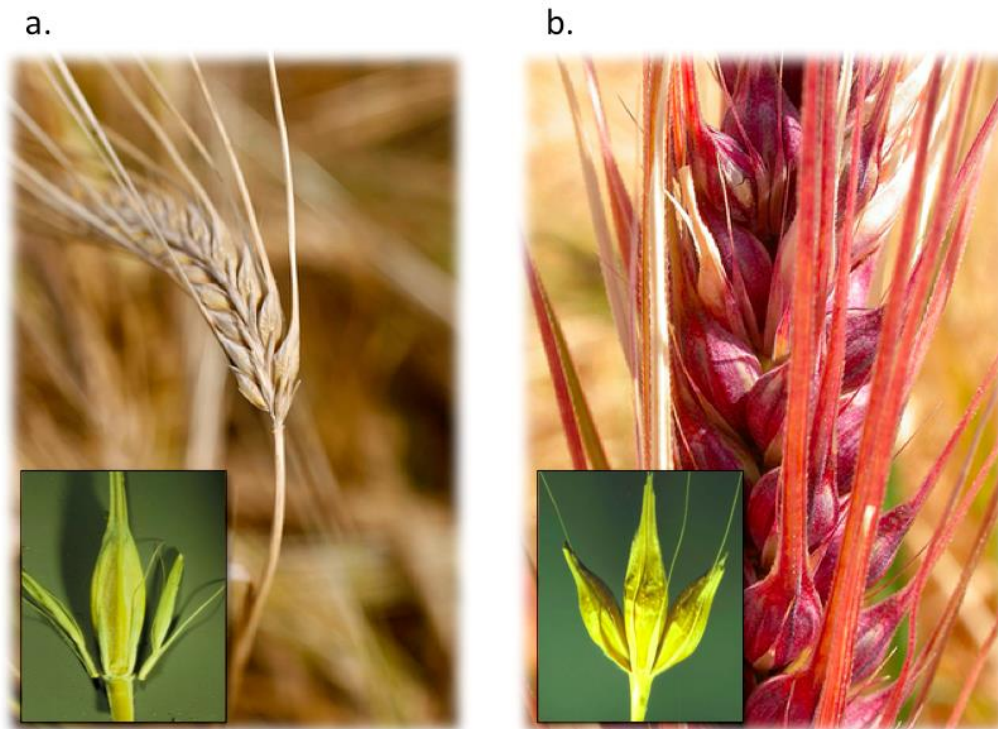
**Figure 2.** Surface totale ( $\times 10^3$  ha) d'orge brassicole (*Hordeum vulgare L.*) emblavée pour les principales zone de production (couleur) et répartition des surfaces entre orge d'hiver et orge de printemps (en pourcentage). (Données issues de Agreste, 2013)

Actuellement, l'orge française est produite avec une utilisation importante d'intrants. En 2011, l'enquête « Pratiques Culturelles » du Ministère de l'Agriculture révèle que, sur l'ensemble de la sole d'orge (hiver et printemps confondus), 132 kg ha<sup>-1</sup> d'engrais azoté de synthèse sont utilisés en moyenne pour les surfaces sans apport organique, et 109 kg ha<sup>-1</sup> sur les surfaces avec apport organique (Agreste, 2014). Au total, plus de 200 000 tonnes d'engrais azotés de synthèse sont utilisées pour la sole d'orge française. En France, toutes espèces confondues, les activités agricoles génèrent en moyenne 32 kg de surplus d'azote par hectare de surface agricole (SAU) et par an, soit environ le quart de la fertilisation azotée moyenne apportée (Commisariat général au développement durable, 2013). De plus, l'indice de fréquence de traitement (IFT) moyen en France sur orge, tous produits phytosanitaires confondus, est de 3.1 et dépasse 3.6 dans certaines régions de grandes cultures (Agreste, 2013). La céréaliculture française n'a pas beaucoup évolué vers une agriculture plus durable et reste encore très dépendante d'une utilisation importante d'intrants de synthèse (Aubertot et al. 2005). Comme les autres grandes cultures conduites de manière intensive, la production d'orge de brasserie contribue aux impacts environnementaux négatifs des filières de production et de l'agriculture française. A partir d'une analyse de cycle de vie, différentes études ont montré que la production d'orge brassicole représente près de 40 % des impacts environnementaux de la filière « orge-malt-bière » (Virtanen et al. (2007) en Finlande, Hospido et al., (2005) en Espagne; Williams et al., (2014) au Royaume-Uni). 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). Vela et al. (2007) ont également montré que les pesticides utilisés sur orge brassicole peuvent persister lors des étapes de fabrication de la bière et présenter des risques pour la santé humaine.

Dès 1980, le rapport du professeur Hénin, intitulé Activités agricoles et qualité des eaux, déclenche une première prise de conscience collective des enjeux environnementaux liés à l'activité agricole en France (Hénin., 1980). Depuis, de nombreuses études ont démontré les effets néfastes de l'utilisation importante des intrants en grandes cultures sur l'environnement (MEA, 2005 ; Pretty et al., 2000 ; Tilman, 1999). Ces constats ont permis de mettre les problématiques environnementales et de santé publique au cœur des enjeux politiques agricoles (ANSES, 2016; Glenk et al., 2012; INSERM, 2013; Perraud, 2012). De nombreuses législations européennes ont ainsi été produites et traduites dans le droit français pour orienter les systèmes agricoles vers plus de durabilité. Par exemple, la directive 91/676/CEE, dite « directive nitrates », entrée en vigueur en décembre 1991, vise à réduire la pollution des eaux provoquée par les nitrates. La directive 2009/128/CE, d'octobre 2009, recommande une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable et, suite au Grenelle de l'environnement, a initié le plan Ecophyto en France.



**Figure 3.** Pourcentage de la sole d'orge cultivée avec des variétés d'hiver (orange) et de printemps (gris). Le détail de la répartition entre les orges d'hiver 2 rangs et 6 rangs n'est pas présenté. Les données ont été fournies par le GEVES.



**Figure 4.** Inflorescence d'orge 2-rangs (a) et d'orge 6-rangs (b). L'encart présente le détail d'un épillet. Les images sont sous licence Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic et proviennent de Matt Lavin, Montana, É.-U.

Outre ces cadres réglementaires, des études sociologiques portant sur les choix des consommateurs pour la consommation de bières artisanales démontrent que ces derniers accordent une grande importance à la façon dont est produite la matière première (Aquilani *et al.*, 2015) et aux risques pour la santé (Sohrabvandi *et al.*, 2012). Désormais, la filière orge-malt-bière s'oriente délibérément vers une production moins consommatrice des intrants de synthèse. Les industriels de la filière brassicole s'engagent en effet de plus en plus vers une amélioration de leur procédés pour accroître la durabilité de leur production d'orge de brasserie : le livre blanc de la brasserie, par exemple, formule explicitement des objectifs de durabilité de la production agricole (Brasseurs de France, 2014). Cependant, leurs efforts se concentrent majoritairement sur les étapes de maltage et de brassage du malt, et peu d'avancées concrètes sont perceptibles au niveau de la production agricole en Europe<sup>1</sup>.

Depuis plusieurs décennies, cependant, des méthodes de production réduisant l'impact des activités agricoles sur l'environnement et la santé humaine émergent (Tilman and Clark, 2015). Par exemple, en France, dans la lignée des travaux sur la production intégrée en blé tendre (Meynard, 1985), des études ont mis au point des conduites culturales qui visent à réduire l'usage des intrants de synthèse tout en maintenant des performances quantitatives et qualitatives acceptables. Des démonstrations expérimentales (Loyce *et al.* 2002, 2008) ont prouvé que la dose totale d'azote et les quantités de pesticides utilisés peuvent être significativement réduites en blé avec ces itinéraires techniques, comparés aux itinéraires conventionnels. Ces résultats ont également été démontrés sur d'autres espèces comme le blé dur (Debaeke *et al.*, 2000) ou le tournesol (Debaeke et Nolot, 2000), en France et à l'international (Hossard *et al.*, 2016). Pour minimiser les pertes de production et maintenir une rentabilité économique satisfaisante pour une gamme de prix assez large, les caractéristiques variétales (tolérance aux maladies, aux stress azotés) doivent être adaptées à l'itinéraire technique (réduction engrais, pesticides) et aux usages visés (blé biscuitier, blé améliorant, blé fourrager) (par ex : Loyce *et al.*, 2012, 2008 ; Meynard, 1985 ; Vereijken, 1989). La complémentarité entre les caractéristiques variétales et les modalités de l'itinéraire technique sont indispensables pour permettre le développement de ce type de production (Loyce *et al.*, 2012). Les performances variétales sont, cependant, très largement dépendantes des conditions pédoclimatiques dans lesquelles elles sont cultivées. De même, l'effet de l'itinéraire technique sur les stress biotiques et abiotiques pouvant potentiellement impacter la production sont également variables suivant les conditions pédoclimatiques. Il est donc important d'adapter le choix des variétés et les modalités techniques suivant les conditions de sol et de climat de la zone de production. En blé, de nombreuses références techniques et scientifiques ont été produites localement pour le développement de ces itinéraires techniques (Rolland *et al.*, 2003; Limaux *et al.*, 1999, en Lorraine ; Saulas et Meynard, 1998, en Île-

---

<sup>1</sup> Certaines actions sont menées dans des pays en voie de développement notamment pour limiter l'utilisation des ressources en eau pour la production d'orge brassicole (AB-Inbev, 2014; Wales, 2014)



de-France ; *Loyce et al., 2008*, en Champagne ; *Viaux, 1999* en Normandie et Picardie ; *Nolot, 2002* en Midi toulousain).

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. Par exemple, le nombre d'articles scientifiques traitant du bas niveau d'intrants en orge est ainsi près de 3 fois inférieur à celui traitant du blé<sup>2</sup>. De façon similaire, en France, des expérimentations pour la mise au point d'itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en blé ont débuté dans les années 1990 et ont permis la production de nombreuses références techniques à partir des années 2000 (*Felix et al., 2012; Felix, 2015*). Un réseau expérimental (Arvalis, INRA, chambre d'agriculture) en orge développé pour les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants existe, mais n'a été mis en place qu'en 2006. De plus, ce réseau comporte chaque année beaucoup moins de sites expérimentaux. Les recherches menées sur le blé sont difficilement transposables à l'orge de brasserie. Ces espèces, bien que proches, peuvent en effet avoir des caractéristiques différentes, notamment vis-à-vis du cycle de développement, ou de la valorisation de l'azote (par exemple, efficacité d'utilisation de l'azote, remobilisation de l'azote vers les grains-*Delogu et al., 1998*), entraînant une nécessaire adaptation des conduites techniques entre le blé et l'orge. De plus, les teneurs en protéines optimales pour la transformation ne sont pas les mêmes, et 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 de ces derniers.

La France est un producteur important d'orge brassicole et de malt dans le monde. La production actuelle d'orge brassicole est encore très dépendante des intrants de synthèse et entraîne comme d'autres grandes cultures des impacts négatifs sur l'environnement et la santé des consommateurs. Les industriels, la société civile et les politiques encouragent désormais une production plus respectueuse de l'environnement. Peu de connaissances existent actuellement pour produire de l'orge brassicole avec moins d'intrants de synthèse tout en maintenant la production quantitative et en respectant les cahiers des charges pour la qualité des grains imposés par la filière.

**L'objectif global de ce travail est de concevoir et d'évaluer les caractéristiques variétales et de l'itinéraire technique favorables à la production d'orge d'hiver 6 rangs brassicole pour des conduites culturales économes en intrants.**

---

<sup>2</sup> Requête sur web-of-knowledge incluant les termes « *low-input* », « *yield* » et « *wheat* » ou « *barley* ». <https://apps.webofknowledge.com>

## ETAT DE L'ART

### 1. Contexte de la production d'orge brassicole

#### 1.1. Des critères de qualité spécifiques à la filière brassicole

En plus des rendements élevés recherchés par les agriculteurs, d'autres critères découlant directement des procédés de transformation de l'orge en malt<sup>3</sup> puis en brassin sont fixés par la filière. Le non-respect de ces spécifications entraîne pour l'agriculteur, un déclassement partiel ou total de la production en orge fourragère, destinée à l'alimentation animale. Les paragraphes ci-dessous présentent les principales étapes de transformation de l'orge en bière et les caractéristiques des grains attendues pour optimiser les procédés de transformation.

Les grains sont soumis à une étape de maltage, puis de brassage pour que l'orge puisse aboutir à une production de malt puis de bière. La germination en conditions contrôlées des grains pour rendre « accessibles » les réserves amylacées de ces derniers est appelée maltage. L'étape de fabrication de la bière en mélangeant à chaud du malt et de l'eau est appelée brassage.

Lors du maltage, les grains subissent une phase de trempage, de germination puis de touraillage (Figure 5a). La trempage permet de laver les grains, de les hydrater (l'humidité initiale des grains de 15% s'accroît à 45%) et d'initier la germination. La germination permet la libération d'hormones (notamment des gibbérélines) par l'embryon et ainsi la production de différentes enzymes nécessaires à l'hydrolyse de l'amidon, des protéines et des parois cellulaires pour fournir les nutriments nécessaires au développement de ce dernier. Le malteur a pour objectif de peu dégrader les réserves amylacées, mais de fortement dégrader la matrice protéique qui entoure les granules d'amidon (Figure 6). Le touraillage permet l'arrêt de la germination et le séchage des grains (humidité des grains est alors de l'ordre de 5%) pour permettre leur conservation. C'est également à cette étape que sont en partie définies les caractéristiques de couleur et d'arômes des malts. Une fois le maltage terminé, les radicules, qui donnent une saveur amère à la bière, sont éliminées. Les grains ainsi obtenus forment le malt tel qu'il est stocké pour son utilisation en brasserie.

Pour optimiser les procédés industriels, la germination des grains doit être rapide et homogène. L'imbibition et la diffusion de l'eau dans le grain sont largement dépendantes de la teneur en protéines de ce dernier. Un excès de protéines ralentit et limite la prise d'eau (Molina-Cano et al. 2002), oblige le malteur à allonger la durée de la phase de trempage et à utiliser plus d'eau (Hariri, 2003). Une trop faible teneur en protéines, au contraire, entraîne une prise d'eau rapide et des risques de sur-désagrégation du malt (et notamment une dégradation importante des réserves amylacées) par les activités enzymatiques, ce qui impactera négativement les étapes de brassage. Un manque de protéines

---

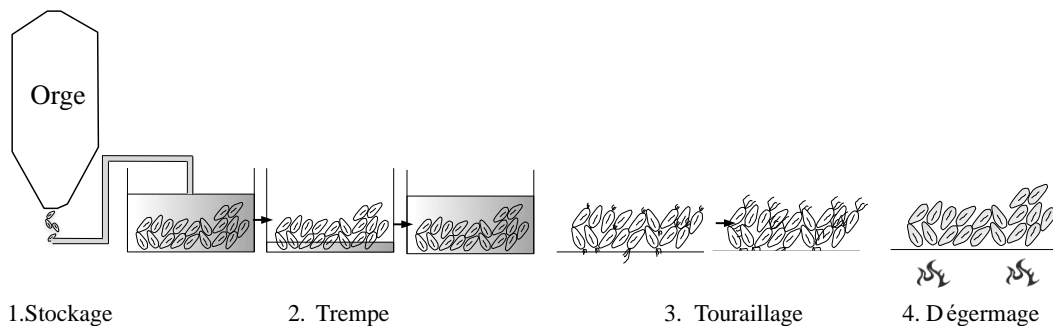
<sup>3</sup> Orge germée artificiellement, puis séchée, utilisée par les brasseurs pour la fabrication de la bière

est également souvent associé à un faible potentiel enzymatique des grains, et donc à un mauvais potentiel de dégradation de l'amidon dans les étapes de brassage.

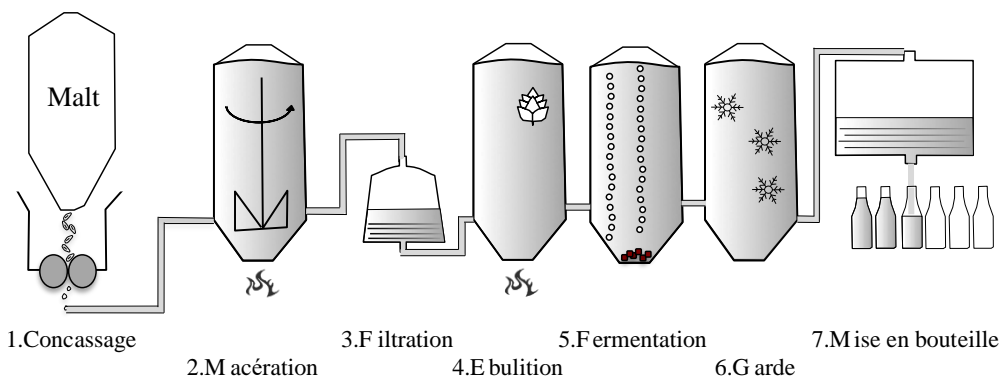
La taille des grains est positivement corrélée à la teneur en amidon et négativement à la teneur en protéines (Emebiri et Moody, 2004; Fox, 2009). Des lots de grains avec des tailles élevées favorisent ainsi des valeurs élevées d'extrait<sup>4</sup>, c'est-à-dire la proportion d'amidon disponible dans le grain qui sera transformée en sucres dans les étapes de brassage (Burger et LaBerge, 1985 ; Fox, 2009). Les malteurs vont donc rechercher des lots de grains avec une taille élevée. Une régularité de taille des grains permet également une germination homogène, une maximisation de l'extrait, et ainsi une meilleure qualité du malt (IFBM, comm. pers.).

D'autres critères de qualité interviennent lors du maltage, comme l'humidité des grains à la réception des lots par les malteurs (qui ne doit pas être trop élevée pour éviter le développement de champignons lors du stockage des grains), la capacité germinative (qui doit être la plus élevée possible pour permettre la pleine expression du potentiel enzymatique des lots de grains lors de la germination), la pureté variétale (pour assurer l'homogénéité des caractéristiques des grains) ou l'absence d'impuretés (Fox et al., 2003).

#### a. Maltage ☐



#### b. Brassage ☐



**Figure 5.** Représentation schématique des étapes de maltage (a.) et de brassage (b.)

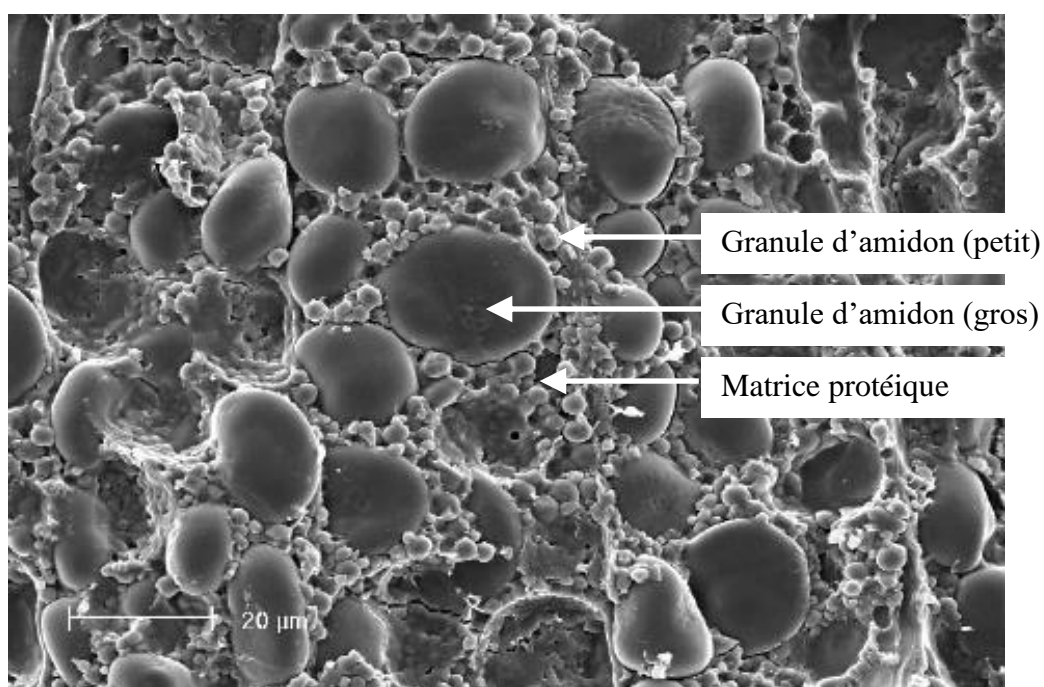
<sup>4</sup> L'extrait de malt est une bouillie formée de farine maltée mélangée avec de l'eau et ayant subi un processus d'hydrolyse enzymatique. Le rendement « d'extraction » est le rapport entre le sucre solubilisé dans le moût et la quantité totale de sucre potentielle issue de l'amidon.

Le brassage comprend 7 principales étapes : la mouture du malt, la macération/brassage, la filtration de la maïsche, l'ébullition du moût, la fermentation, la maturation et la filtration (Figure 5b). La première étape consiste à concasser l'endosperme des grains (malt et/ou grains crus) pour faciliter la dissolution des sucres, ce qui favorisera l'action des enzymes et des valeurs élevées d'extrait dans les étapes suivantes. Durant la phase de macération/brassage, les enzymes produites lors de la germination vont être re-activées pour permettre la fabrication du moût, riche en sucres et en matières azotées assimilables par les levures. La filtration permet de débarrasser le jus, riche en sucres et matières azotées, des écorces (glumelles) et des parties d'amande des grains non solubilisées. Les brasseurs cherchent donc à préserver les enveloppes jusqu'à cette étape pour former une couche filtrante. Après cette filtration, le moût est porté à ébullition et du houblon y est ajouté. Le moût refroidi estensemencé par la levure (du genre *Saccharomyces*). Cette dernière va permettre de transformer les sucres simples, obtenus lors du brassage, en alcool et gaz carbonique. Après la fermentation, la garde permet d'obtenir les propriétés organoleptiques finales de la bière grâce à une maturation des composés. La bière est finalement filtrée avant d'être conditionnée.

Le paramètre essentiel pour les brasseurs, lors de l'achat de lots de malt, est l'extrait soluble, c'est-à-dire la quantité de matière soluble extractible du malt (*Bamforth et al., 1993 ; Fox et al., 2008 ; Friedt et al., 2000*). Ce critère est particulièrement important pour la production d'orges européennes, où la bière est exclusivement ou principalement produite à partir de malt (avec peu ou sans ajout d'amidon issu d'autres céréales non maltées). Avec des grains à forte teneur en protéines, l'accessibilité et la désagrégation de l'amidon par les enzymes sont réduites, le malt risque d'être sous-désagrégé (car mauvaise friabilité de ce dernier lors de l'étape de concassage), la mouture reste grossière et le rendement en salle à brasser diminue (le taux d'extraction est réduit - *Schmitt, 2014*). L'excès de protéines dans le grain entraîne également une étape de filtration plus lente (et donc une perte de productivité et de rendement des brasseurs), et des risques de trouble dans la bière. L'excès de protéines solubles, fortement corrélée à la teneur en protéines initiale des grains, entraîne un excès de couleur et un risque accru de goûts indésirables dans la bière. Au contraire, le manque de protéines dans le grain entraîne généralement un manque de protéines solubles dans la bière, des problèmes de fermentation (*Steiner et Back, 2009*) et de stabilité de mousse. Les attentes des brasseurs en terme de qualité du grain dépendent cependant du type de brassage qu'ils souhaitent effectuer (Brassage « pur malt » ou Brassage avec grains crus). Généralement les brasseurs attendent des teneurs en azote, des teneurs en acides aminés solubles et un pouvoir enzymatique des malts plus élevés si ces derniers sont mélangés à des grains crus pour la fabrication de la bière comparativement à l'utilisation de malt uniquement (*Schmitt, 2014*).

Ainsi, les malteurs doivent répondre aux critères de qualité très stricts imposés par les procédés de brassage ; de même la production d'orge doit répondre au cahier des charges des malteurs (*Brisson &*

*Oustrain, 1997*). Pour la vente des orges de brasserie en France, le Syndicat de Paris<sup>5</sup>, par exemple, précise les critères qualitatifs à atteindre en l'absence de spécification contractuelle : la teneur en eau de référence des grains doit être de 14.5 %, le taux de germination de 95 %, 90 % des grains doivent avoir une taille supérieure à 2.5mm et 3 % au-dessous de 2.2 mm, la teneur en protéines des grains doit être comprise entre 9.5 et 11.5 % (*Incograin, 2014*). Ces critères de qualité doivent être respectés sur l'ensemble des lots provenant de la zone de production et destinés à la brasserie.



**Figure 6.** Coupe d'endosperme d'orge (microscopie électronique). Photographie issue de John L Black- <http://www.regional.org.au/au/abts/2001/m3/black.htm>

### 1.2. Une création variétale historiquement basée sur des itinéraires intensifs en intrants

Depuis le milieu des années 1970, la production française de céréales s'est largement intensifiée grâce à la disponibilité des intrants de synthèse (*Meynard et Savini, 2003*) et une sélection variétale orientée pour ce type de systèmes (*Bonneuil et Hochereau, 2008*). En effet, comme dans la plupart des pays industrialisés, les génotypes sont sélectionnés et évalués majoritairement dans des conduites à haut niveau d'intrants (*Ceccarelli, 1994; Dawson et al., 2008; Desclaux, 2006; Wortman et al., 2013*). En parallèle, les agronomes ont principalement travaillé pour améliorer des itinéraires techniques pour les variétés « élites » développées par les sélectionneurs (*Hammer et al., 2014*). Ainsi, sélection des plantes et agronomie ont historiquement évolué pour contribuer ensemble à l'amélioration des performances des cultures dans des systèmes de production intensifs en intrants (*Fischer, 2010*).

<sup>5</sup> A pour objet l'harmonisation des règles commerciales en vigueur dans les professions se rattachant au commerce des céréales

Depuis quelques décennies, des études menées dans différentes régions du monde mettent en évidence de fortes améliorations de la qualité du malt (*Passarella et al., 2003; Psota et al., 2009; Zhang et Li, 2009*) et augmentations des rendements de l'orge brassicole (*Friedt et al., 2000; Madre, 2004*). En France, *Drillaud-Marteau (2014)* estime l'évolution de rendement à 0.41 q ha<sup>-1</sup> par an pour l'orge d'hiver 6 rangs brassicole, entre 1987 et 2014.

Le progrès génétique serait responsable d'environ un tiers à la moitié des augmentations de rendement en orge d'hiver (environ 30% liés à la génétique pour *Abeledo et al., 2003* en Argentine pour des variétés mises sur le marché entre 1959 et 2003; environ 50% liés à la génétique pour *Ahlemeyer et Friedt, 2011* en Allemagne pour des génotypes mis sur le marché entre 1966 et 2007; environ 40% pour *Laidig et al., 2014* en Allemagne de 1980 à 2012, mais pour des génotypes 2 rangs d'hiver). La part des améliorations de rendement, liées au progrès génétique, varie assez fortement suivant les périodes considérées. Par exemple, *Lillemo et al. (2010)* estiment ce dernier à 29, 43 et 78 % du total des gains de rendement pour les périodes 1946 à 1960, 1960 à 1980 et 1980 à 2008 respectivement pour de l'orge 2 rangs de printemps en Norvège.

La seconde partie des augmentations de rendement constatées en production conventionnelle est liée à l'amélioration des conduites culturales et à l'interaction entre conduite culturale et génotype (*Cassman, 1999; Ceccarelli, 1996; Gallais, 2011*). En particulier, la meilleure gestion de la fertilisation azotée (*Austin, 1999; Bell et al., 1995*) et l'utilisation de produits phytosanitaires, notamment les fongicides (*Oerke., 2000*), ont contribué à cette augmentation. Par exemple, actuellement, les quantités d'azote minéral apportées sur l'orge en France s'élèvent à 132 kg ha<sup>-1</sup> (pour les surfaces sans apport organique-*Agreste, 2014*). Cependant, depuis les années 2000, la consommation totale des engrais d'azote de synthèse a tendance à légèrement baisser en France (*Eurostat, 2017*).

### **1.3. Production d'orge brassicole en France : évaluation des rendements, de la qualité et impacts environnementaux**

Les rendements de l'orge d'hiver en France atteignaient 6.0, 6.9, 6.5 et 6.8 t ha<sup>-1</sup> respectivement pour les années 2011, 2012, 2013 et 2014 (*Agreste, 2014*). De plus, la qualité de la production d'orge française est reconnue internationalement car basée sur un système d'évaluation des variétés strict. En France, seule une partie des variétés inscrites au catalogue officiel sont recommandées pour la production à destination brassicole. Une liste restreinte de « variétés préférées des malteurs et des brasseurs » correspondant parfaitement aux besoins de la filière est mis-à-jour chaque année. En effet, une fois une variété inscrite au catalogue officiel, le Comité « Bière Malt Orge » sélectionne 5-6 lignées pour effectuer une évaluation technologique avec des productions pilotes de malt (en conditions semi-industrielles). Généralement 3 à 5 variétés sont acceptées chaque année par le CBMO et entrent dans une phase d'évaluation commerciale de deux années, qui comprend des productions de malt et brassage industriels. Seules les variétés qui correspondent parfaitement aux critères des industriels seront recensées dans la liste des « variétés préférées » des malteurs et brasseurs de France.

Par exemple, en 2016, 5 variétés d'orge d'hiver 6 rangs ont été inscrites à la liste des variétés préférées des malteurs de France et des brasseurs de France (cv. Casino, Etincel, Isocel, Passerel et Esterel). Ces variétés sont celles qui maximisent la probabilité que la teneur en protéines et le calibrage soient dans les seuils brassicoles (Table 1).

De nombreux indicateurs ont été proposés pour évaluer la durabilité des systèmes de production et des itinéraires techniques, notamment vis-à-vis de l'azote (*Huggin et Pan, 2003*). La quantité d'azote dans le sol à la récolte a régulièrement été utilisée (*Agriculture and Agri-Food Canada, 2016; Machet et al., 1997*). Ces derniers auteurs, par exemple, mesuraient des reliquats dans le sol en début de période de drainage de 73 kg N<sub>03</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> pour l'orge d'hiver contre 125 kg N<sub>03</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> pour le pois et 48 kg N<sub>03</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> pour le blé. Cependant, cet indicateur ne révèle pas directement des potentiels impacts environnementaux : des estimations de perte d'azote par lixiviations sont généralement réalisées à partir des reliquats d'azote. *Machet et al., (1997)* mesuraient des pertes d'azote de 46, 72 et 36 kg ha<sup>-1</sup> pour les trois cultures. Un autre indicateur de gestion de l'azote est la balance azotée, utilisée notamment par Eurostat (*Eurostat, 2016*). Cet indicateur est calculée comme la différence entre l'ensemble des entrées d'azote (fertilisation et amendements,...) et des sorties (exportation par la culture, ...). Cet indicateur, par contre, ne renseigne pas sur l'efficacité d'utilisation des engrais minéraux apportés à la culture. Celle-ci peut être caractérisée via l'efficacité d'utilisation de l'azote (*N use efficiency*), calculée comme le ratio entre la quantité d'azote absorbée par la culture et la quantité totale d'azote appliquée. Certains auteurs se basent sur cet indicateur pour évaluer des stratégies de fertilisation azotées (*Ravier, 2017*). Dans une étude comparant le blé et l'orge, *Delogu et al., (1998)* concluaient que cette dernière nécessite moins d'azote pour maximiser le rendement, permettant à cette culture d'atteindre de bonnes performances en conditions d'intrants réduits. Les stratégies de fertilisation azotée sont différentes en blé et en orge : des apports précoces sont recommandés en orge pour éviter de dépasser une teneur en protéines de 11.5%. Des apports précoces sont, cependant, généralement associés à de fortes pertes d'azote environnementales (*Limaux et al., 1999*). Peu d'études récentes quantifient précisément les pertes d'azote associées à la production d'orge brassicole.

**Table 1.** Calibrages (grains > 2.5mm) et teneur en protéines (%) moyens des principales variétés d'orge d'hiver 6 rangs cultivées en France. Données issues de malteur de France, 2014, 2015, 2016.

Variété	Calibrage >2.5 mm (%)			Teneur en protéines (%)		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Azurel	90.2	-	-	10.4	NA	-
Casino	91.0	89.2	55.50	10.4	9.8	11.70
Etincel	90.7	90.3	64.20	10.1	9.9	11.45
Esterel	83.1	-	-	10.1	-	-
Isocel	91.0	90.4	63.42	10.1	9.9	11.78
Passerel	88.3	89.1	36.20	9.9	9.4	11.90

## 2. Variabilité des performances en fonction des sites et des années

### 2.1. Les performances variétales sont variables suivant les conditions pédoclimatiques

D'une manière générale, les productions agricoles sont largement influencées par les conditions pédoclimatiques dans lesquelles elles sont insérées, entraînant de larges variations des performances de production entre années, entre sites pour une année donnée, et entre sites et années (*Chenu et al., 2013a; Ray et al., 2015*). Par exemple, la moyenne de la teneur en protéines ou du calibrage pour les variétés préférées des malteurs de France et des Brasseur de France montre de large variation suivant les années (Table 1, *Le Bail et Meynard, 2003*).

Dans le cas de l'orge brassicole française, le bassin de production s'étend sur plus de 30 départements du nord de la France et recouvre des conditions pédoclimatiques diverses (*GIS Sol, 2017*) : les types de sols varient et couvrent des sols d'altération peu différenciés (ex : Brunisols), des sols des roches calcaires (ex : Calcosols) ou des sols de formations limoneuses (ex : Luvisols). Parallèlement, le climat varie du type océanique, océanique altéré à semi-continental (*MeteoFrance, 2017*). Les variations inter-sites et interannuelles doivent donc être prises en compte par les sélectionneurs et les agriculteurs pour garantir une stabilité de la production (*Cooper et Byth, 1996*).

Le choix variétal est un levier important pour faire face à ces variations de conditions environnementales au sein de la zone de production et maintenir une production quantitative et qualitative élevée (*Murphy et al., 2007*). Sur blé, il a par exemple été montré que l'utilisation de variétés tolérantes aux stress biotiques et abiotiques permet de fortement réduire les dommages causés, par exemple, par des pressions maladies ou des stress azotés (*Lammerts van Bueren et al., 2011; Loyce et al., 2008*). Certains génotypes<sup>6</sup> sont donc plus performants que d'autres, pour un type d'environnement donné. Des inversions de classement, des diminutions ou des augmentations des écarts entre génotypes peuvent en effet se produire suivant les environnements de culture (**Figure 7**). Ces interactions entre le génotype et l'environnement<sup>7</sup> (IGE) représentent généralement, chez les céréales, de 10 à 25 % de la variance totale du rendement, du même ordre de grandeur que la variance expliquée par l'effet génotypique (*Jeuffroy et al., 2014 ; Voltas et al., 2002*).

L'analyse des performances des génotypes au sein de différents environnements (exemple des essais variétaux avec répétitions) peut s'exprimer par le modèle statistique suivant :

$$y_{ijk} = \mu + G_i + E_j + GE_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Avec  $y_{ijk}$  le phénotype de la répétition k du génotype i dans l'environnement j,  $\mu + G_i$  la performance moyenne du génotype i,  $E_j$  la réponse moyenne des génotypes à l'environnement j,  $GE_{ij}$  l'interaction entre le génotype i et l'environnement j (mesure l'écart entre les réponses moyennes des génotypes à

<sup>6</sup> Le génotype peut correspondre à du matériel végétal commercialisé, c'est-à-dire une variété ou cultivar, ou bien à du matériel végétal en cours de sélection.

<sup>7</sup> L'environnement est ici considéré comme pedoclimat. Au sens large, le terme inclut toutes les composantes du milieu dans lequel est inséré le génotype : sol, climat et itinéraire technique. L'IGE peut être détaillé en fonction du pédoclimat et de l'itinéraire technique. Dans le dernier cas on parle d'IGC, interaction génotype-conduite.



l'environnement  $j$  et la réponse particulière du génotype  $j$  à ce même environnement),  $\varepsilon_{ijk}$  les résidus supposés indépendants, identiquement distribués et suivant une loi normale  $N(0, \sigma^2)$ .

## **2.2. Prise en compte des interactions génotype X environnement pour sélectionner et choisir les variétés**

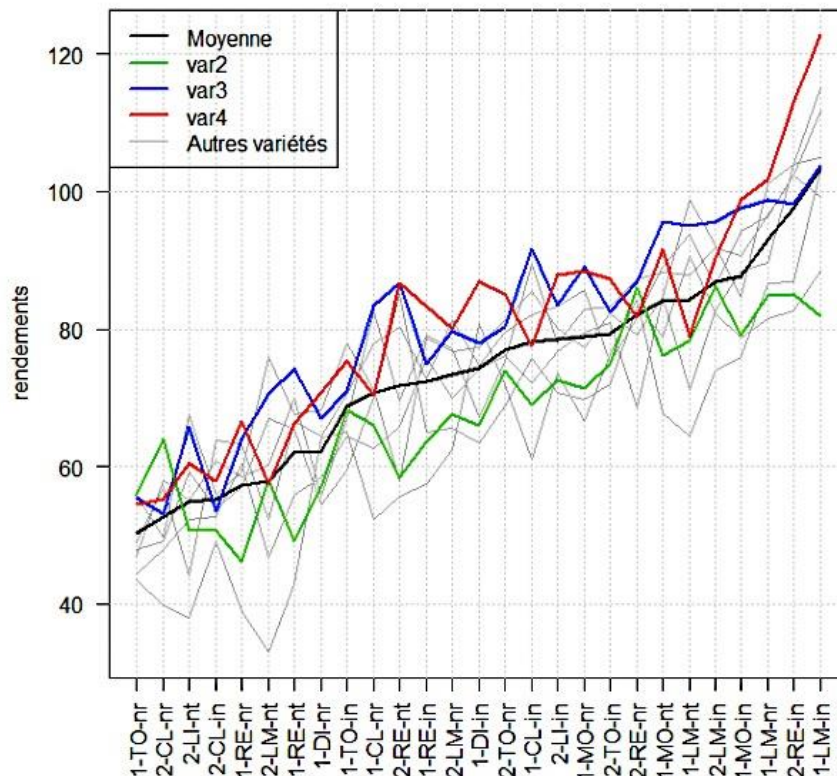
Afin de répondre aux exigences de la filière, la qualité de la production (teneur en protéines et taille des grains) est plutôt évaluée avec une notion de stabilité dans l'absolu (et non une stabilité relative, en comparaison avec d'autres génotypes). Par exemple, les malteurs et les brasseurs veulent, le plus régulièrement possible, avoir des lots de grains avec une teneur en protéines située dans l'intervalle 9.5%-11.5%. Cette notion de stabilité est appelée stabilité statique par *Becker et Léon (1988)*, ou stabilité de type I selon *Lin et al. (1986)*.

Au contraire, pour le rendement, les agriculteurs vont chercher des variétés fortement productives dans une diversité de conditions climatiques, pour une localisation géographique donnée. En effet, la production de l'agriculteur étant payée au volume livré, celui-ci augmentera (et stabilisera) son chiffre d'affaire avec une production élevée (et stable) suivant les années. Les sélectionneurs développent généralement des génotypes caractérisés par une adaptation à une large gamme de pédoclimats (*Braun et al., 1996*), afin de commercialiser des génotypes présentant le meilleur rendement moyen pour une diversité d'environnements. Produire des variétés qui pourront être cultivées sur de larges surfaces permet en effet d'amortir plus efficacement le coût de développement des variétés. De plus, pour être inscrite au catalogue officiel, un génotype doit présenter un rendement moyen supérieur à celui des témoins dans un réseau d'évaluation variétal (*CTPS, 2010*). Les obtenteurs privilégient donc les variétés généralistes à la fois performantes ( $G_i$  élevé) et peu interactives ( $GE_{ij}$  faible). Par exemple, dans la **Figure 7**, parmi les variétés 3 (bleu) et 4 (rouge) avec un fort rendement moyen, la variété 3 est moins interactive que la variété 4, qui présente de fortes chutes de rendement sur certains environnements (et en particulier 1-LM-nt). L'évaluation des performances des génotypes, relativement aux autres génotypes, est appelée stabilité dynamique par *Becker et Léon (1988)*.

Avec ce mode de sélection, les variétés retenues sont celles qui présentent une adaptation large aux conditions pédoclimatiques. Rares sont les sélectionneurs qui analysent les IGE dans le but précis d'identifier des génotypes adaptés à certains milieux spécifiques. Certaines études scientifiques, cependant, notamment à partir de simulations, concluent sur l'intérêt d'adapter les caractéristiques des génotypes aux principales contraintes de l'environnement plutôt que de cultiver des génotypes généralistes adaptés globalement en moyenne sur l'ensemble des environnements (*Casadebaig et al., 2016* pour le tournesol; *Hammer et al., 2014* pour le sorgho). Par exemple, *Hammer et al. (2014)* concluaient, à partir de simulations, que les génotypes de sorgho tardifs et à forte capacité de tallage présentaient des rendements significativement plus élevés que des génotypes « moyens » dans les environnements australiens caractérisés par un faible déficit hydrique jusqu'à floraison du blé. Au contraire, des génotypes précoces, avec une faible capacité de tallage, obtenaient de meilleurs

rendements que les génotypes « moyens » dans les environnements caractérisés par un stress hydrique dans la première partie de cycle.

Cette absence d'adaptation locale des variétés peut en partie être expliquée par le fait que les IGE ont, historiquement, été considérées comme un obstacle au progrès génétique (Lefort *et al.*, 1979). En effet, les IGE rendent plus difficile l'interprétation des résultats des réseaux expérimentaux (Cooper *et Hammer*, 1996; Dreccer *et al.*, 2009; Löffler *et al.*, 2005). L'interaction perturbe le lien que l'on peut faire entre valeur phénotypique et valeur génotypique d'un caractère (Kempton *et al.*, 2012). Une majorité des sélectionneurs déclare cependant les prendre en compte en réalisant une évaluation des performances variétales dans une diversité de milieux (Cooper *et Hammer*, 1996), mais peu réalisent des analyses de variance des essais expérimentaux et interprètent la variabilité des performances des variétés en fonction des stress du milieu (Lecomte, 2005). Décrire avec une précision suffisante les contraintes biotiques et abiotiques du milieu est en effet indispensable pour comprendre les facteurs ayant potentiellement impacté le comportement des génotypes (Lecomte, 2005).



**Figure 7.** Exemple de rendements observés sur 9 génotypes et 27 environnements (Gauffreteau *et al.* 2014).

### 2.3. La caractérisation des environnements cibles permet d'adapter la sélection et le choix des génotypes aux contraintes du milieu

L'ensemble des sites et des années dans lesquels les variétés sont cultivées et qui vont focaliser l'attention des sélectionneurs est appelé « Environnements cibles » (ou Target Population of Environments -TPE- Comstock, 1977). Différents auteurs ont montré que la caractérisation des TPE

permet d'améliorer l'efficacité de sélection et de faciliter le choix variétal, aussi bien pour une adaptation large des génotypes aux TPE ou une adaptation pour certains sous-ensembles particuliers de TPE (Chenu *et al.*, 2013; Hammer *et al.*, 2014). Dans le cas de la recherche d'une adaptation large des génotypes aux TPE, la caractérisation précise des stress environnementaux permet de pondérer les performances des génotypes en fonction de la représentativité des sites ou de l'année expérimentale aux TPE (Chenu *et al.*, 2011). Ces auteurs stipulent, en effet, que les réseaux d'évaluation variétale, généralement menés sur deux campagnes différentes, peuvent n'être que faiblement représentatifs de la diversité des combinaisons de facteurs limitants dans les TPE. La caractérisation des TPE permet également d'augmenter le progrès génétique dans certains environnements particuliers (Bänziger *et al.*, 2006; Campos *et al.*, 2004; Cooper *et al.*, 1995). En effet, une caractérisation précise du type de stress caractérisant l'environnement permet de plus facilement associer les génotypes (ou caractéristiques génotypiques) ayant de bonnes performances agronomiques dans certains types d'environnements particuliers (caractérisés par certains types de stress). La caractérisation précise des environnements cibles peut également aider les sélectionneurs à définir l'emplacement des sites expérimentaux de leur réseau d'évaluation variétale et se focaliser sur les types d'environnements d'intérêt (Chenu *et al.*, 2011). Finalement, une caractérisation précise des principaux types de stress et de leur fréquence au sein des TPE permet aussi de faciliter le choix des agriculteurs pour l'adaptation des génotypes aux conditions pédoclimatiques de leurs parcelles (Casadebaig *et al.*, 2016).

La caractérisation des TPE consiste généralement en l'identification de groupes d'environnements relativement homogènes (dont le nom varie suivant les auteurs : « mega-environnements », « macro-environnements », « environnement types »), dans lesquels les génotypes atteignent des performances comparables. Les groupes d'environnements sont la plupart du temps structurés sur une base géographique. Par exemple, les travaux du centre international d'Amélioration du maïs et du blé (CIMMYT) (Braun *et al.*, 1996) définissent les « mega-environnements » comme de larges zones géographiques, souvent transcontinentales. Cependant, ces groupes peuvent inclure de larges gammes de stress, par exemple climatiques, et une variabilité interannuelle importante. Les groupes d'environnements peuvent également être structurés sur la base de combinaisons Site X Année X Génotype, plutôt qu'uniquement sur une base géographique. Avec cette structuration, certaines des sites distants peuvent être regroupés au sein d'un même groupe pour certaines années. Cette structuration permet de regrouper les environnements selon la nature des stress impactant la production et permet ainsi de réduire la variabilité interannuelle au sein des groupes (Chenu *et al.*, 2013). Une caractérisation des TPE uniquement basée sur une combinaison Site X Année X Génotype permet cependant plus difficilement aux agriculteurs et sélectionneurs d'identifier des génotypes adaptés à un site donné, à moins qu'une analyse de la fréquence des types de stress par zone géographique ne soit réalisée en complément (Chapman *et al.*, 2000; Chenu *et al.*, 2013). A notre connaissance, la seule caractérisation des environnements de production de l'orge d'hiver, disponible dans la littérature et couvrant la zone de production française, a été effectuée par Hernandez-Segundo

*et al.* (2009). Cette caractérisation à très large échelle (75 pays) ne permet pas de détailler suffisamment la variabilité et les types de contraintes pour la production d'orge française.

Le regroupement de sites (ou Site X Années) au sein de classes de TPE peut être réalisé à partir d'un diagnostic agronomique basé sur des résultats expérimentaux (*Brancourt-Hulmel, 1999; Cooper et al., 1996*). Le diagnostic agronomique permet d'analyser les différences entre les rendements observés des génotypes testés, et le rendement maximum de ces génotypes en situation optimale (*Brancourt-Hulmel et al., 1999; Cooper et Fox, 1996*). Par exemple, *Lecomte (2005)* a regroupé 29 combinaisons Sites X Années en 6 groupes de milieux, sur la base des pertes de rendement en blé estimées pour chaque facteur limitant, à l'aide de modèles statistiques, puis caractérise les principaux facteurs limitants des groupes ainsi formés. Les 6 groupes de milieux formés expliquent 73% de l'effet principal du milieu (estimé par une analyse de variance) et 28% de l'interaction en considérant l'ensemble des génotypes. La description des facteurs environnementaux impactant le rendement peut également être réalisée à travers l'utilisation d'un pool d'indicateurs environnementaux (*Voltas et al., 2005*). Par exemple, certains auteurs ont caractérisé les TPE à partir de données géographiques de climat et de caractéristiques de sols (p. ex. *Hodson et White, 2007* dans le cas du blé ; *Löffler et al., 2005* pour le maïs). Plus récemment, des études se sont basées sur des indicateurs de stress, calculés avec un modèle de culture, permettant ainsi de prendre en compte les interactions entre plantes, sol et climat dans l'indicateur (*Chenu et al., 2013*). Ces auteurs ont regroupé les stress hydriques des TPE du blé en Australie (considérant 124 années et 22 principales régions de production) en 4 principaux profils d'évolution de ce stress au long du cycle cultural, à l'aide de simulations. Contrairement à l'étude de *Chenu et al. (2013)*, les TPE pour l'orge en France sont caractérisés par de multiples facteurs impactant le rendement. La diversité des facteurs climatiques, par exemple, réduisant le rendement de cette espèce est donc importante à prendre en compte.

### **3. Concevoir des itinéraires techniques adaptés au bas niveau d'intrant**

#### **3.1. Reconcevoir les itinéraires techniques en céréales**

Transformer les pratiques agricoles de manière cohérente, pour répondre à de nouveaux enjeux, nécessite une activité de conception, c'est-à-dire un processus visant à produire quelque chose de nouveau, par opposition à la production de connaissances qui vise à comprendre quelque chose qui existe (*Simon, 1969*). La conception est un processus actif, intentionnel, qui vise à générer simultanément des concepts et des connaissances qui déboucheront éventuellement sur de nouveaux produits, de nouvelles technologies ou de nouvelles méthodes de production (*Meynard et al., 2006*). Ainsi, viser une production d'orge économiquement intéressante, respectueuse de l'environnement et respectant le cahier des charges brassicole, nécessite de repenser la manière dont est actuellement produite l'orge brassicole. De plus, les innovations (variété, modalité de conduite culturale...) ne

peuvent pas être évaluées sans considérer leurs interactions avec les autres éléments du système de culture ou de l'itinéraire technique<sup>8</sup> (*Jeuffroy, 2014*).

Des marges de manœuvre importantes existent pour améliorer la durabilité des productions agricoles françaises. Par exemple, un rapport d'étude sur la contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre estime que le potentiel de réduction de la fertilisation minérale sans affecter les rendements est important. La plupart des voies de réduction de la fertilisation envisagées s'accompagnent d'une baisse des coûts pour l'agriculteur (*Pellerin et al., 2013*). La conception de méthodes de production d'orge d'hiver 6 rangs, moins dépendantes des intrants de synthèse, peut s'appuyer sur l'exemple le plus documenté en France de reconception des itinéraires techniques en céréales : les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants développés pour le blé. Ces travaux montrent l'importance de la cohérence des différents éléments de l'itinéraire technique pour permettre une bonne performance économique et environnementale de ce type de production. Dans ces itinéraires, une réduction de la densité de semis, combinée à une diminution de la fertilisation azotée, favorise une diminution des pressions de maladies foliaires, et ainsi une diminution de l'utilisation de produits phytosanitaires. De même, la diminution de la densité de semis entraîne une diminution des besoins en azote au tallage. Elle autorise à décaler le premier apport d'azote, favorisant une meilleure valorisation de ce dernier, et à diminuer la dose totale d'engrais minéraux apportés. Ces itinéraires montrent ainsi une amélioration de l'efficacité de l'utilisation des intrants (*Loyce et al., 2012*). En plus des avantages environnementaux cités en introduction, plusieurs indicateurs convergent pour montrer que les couples 'variétés rustiques<sup>9</sup>-itinéraires à bas niveau d'intrants présentent pour les agriculteurs moins de risques que les couples 'variétés classiques-itinéraires raisonnés' : un écart type et un coefficient de variation plus faibles du rendement et de la marge entre années, une moindre sensibilité de la marge aux fluctuations du prix du blé et de l'énergie et des pertes moindres en cas d'échec de la culture (*Bouchard et al., 2008*).

### **3.2. Leviers mobilisables pour atteindre une production économe en intrants**

Dans les itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants, l'utilisation réduite des engrais azotés peut entraîner des carences temporaires. De même, l'utilisation réduite de produits phytosanitaires ne permet pas une maîtrise optimale des maladies, des ravageurs et des adventices.

Ces facteurs de stress biotiques et abiotiques peuvent être atténués, en condition d'intrants réduits, par les caractéristiques des variétés. Loyce et al. (2008) montrent que l'intensité de septoriose est similaire entre une combinaison variété peu résistante à la septoriose (note résistance de 2) et un itinéraire technique très intensif, et une variété plus résistante (note résistance 7) et un itinéraire

---

<sup>8</sup> L'itinéraire technique est considéré comme une combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle agricole en vue d'en obtenir une production (*Sebillotte, 1974, 1978*). La cohérence et les interactions entre éléments de l'itinéraire technique font donc référence explicite à un objectif de production considéré.

<sup>9</sup> Une variété est considérée comme « rustique » sur son efficacité à atteindre un haut niveau de performance pour trois critères : résistance aux maladies du feuillage et à la verse, capacité à maintenir un rendement élevé en situation de stress, et stabilité du rendement et de la teneur en protéines (*Rolland et al., 2003*)

technique peu intensif. À l'instar des itinéraires techniques intensifs en intrants, la caractérisation des variétés et des modalités techniques adaptées à des conduites économes en intrant devrait se faire suivant les caractéristiques des environnements, de manière à adapter le triptyque Génotype X Environnement X Conduite culturale. Le développement de génotypes ayant la capacité d'atteindre des rendements élevés en conditions d'intrant réduit et dans des situations climatiques fluctuantes est nécessaire (Heinemann *et al.*, 2014)

Les itinéraires techniques peuvent, en effet, être adaptés pour modérer les impacts négatifs des intrants sur la production. En blé, par exemple, des stratégies variées de fertilisation azotée ont été développées pour diminuer le recours aux engrais de synthèse sans impacter le rendement ou la marge brute de la production. Ainsi, Ravier, 2017, se basant sur des travaux de Jeuffroy et Bouchard (1999), ont caractérisé les carences azotées temporaires non préjudiciables pour le rendement de la culture (INN<sup>10</sup> supérieur à 0.4, 0.7, 0.7 et 0.8 pour les stades Zadok 30, Zadok 32, Zadok 39 et Zadok 60 respectivement). Grâce à une nouvelle méthode de gestion de la fertilisation azotée ne faisant pas appel à une dose d'azote calculée en début de cycle, ces auteurs suggèrent qu'il est possible de fortement diminuer les quantités d'azote apportées sans pénaliser le rendement. En se basant sur la méthode du bilan (Remy et Hebert, 1977), Loyce *et al.* (2012) montrent qu'il est possible de réduire les besoins en azote de la culture et donc le recours aux engrais chimiques, en jouant sur la conduite culturale (notamment densité de semis et date du premier apport d'azote - voir paragraphe A). Dans le cas de l'orge brassicole, peu d'études ont analysé les marges de manœuvre disponibles pour diminuer le recours aux engrais de synthèse sans impacter le rendement. Actuellement, la stratégie de fertilisation recommandée consiste à calculer la dose totale d'azote suivant la méthode du bilan, et de fractionner cette dernière en deux apports en évitant les apports tardifs pour maintenir le taux de protéines des grains en-deçà de 11.5%.

Le choix variétal est également primordial pour diminuer l'impact des facteurs limitant le rendement dans les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants. Ainsi, lorsque les variétés ne sont pas multi-résistantes aux stress biotiques et abiotiques, la fréquence d'occurrence des facteurs limitant le rendement est plus importante dans ces itinéraires techniques que dans ceux gérés avec recours intensif en intrants chimiques (Dawson *et al.*, 2008 ; Loyce *et al.*, 2008 -**Figure 8**). Loyce *et al.* (2008) montrent que pour une même note de résistance variétale à la septoriose en blé (par exemple 2, voir **Figure 8**), les intensités de maladies notées par les symptômes observés sur la plante varient du simple au double entre l'itinéraire technique à fort recours aux intrants (*Crop management 1- CM1*) et l'itinéraire économe en intrants (*Crop management 4-CM4*). De plus, les variétés se comportent, en effet, de façon différente suivant les caractéristiques des itinéraires techniques (et des stress biotiques

---

<sup>10</sup> L'INN est le ratio entre la teneur en azote dans les parties aériennes de la plante et la teneur en azote critique. Cette dernière correspond à la concentration minimale permettant la production de biomasse aérienne maximale (Lemaire *et al.*, 1997). L'INN indique donc si le niveau d'azote contenu dans la plante est supérieur ou inférieur au niveau permettant la biomasse maximale (Lemaire & Gastal, 1997). Il permet de décrire les carences azotées et de caractériser leur effet sur la formation des grains (Justes *et al.*, 1997 ; Jeuffroy & Bouchard, 1999).

et abiotiques générés) dans lesquels elles sont insérées (*Fargue et al., 2005 ; Kirkegaard et Hunt, 2010 ; Voltas et al., 1999a, 1999b ; Zhao et Xu, 2012*). En particulier, les performances des variétés varient suivant les niveaux d'azote disponible (*Edney et al., 2012*) et la présence de maladies (*Warzecha et al., 2011*). Les variations de performances entre génotypes qui résultent des stress biotiques et abiotiques causés par une modification de l'itinéraire technique sont appelées interactions Génotype-Conduite culturale (IGC). Ces constats ont amené certains auteurs à justifier la nécessité d'adapter les variétés et leur méthode de sélection aux itinéraires techniques pour lesquels ils sont destinés (*Atlin et Frey, 1990; Austin, 1988; Brancourt-Hulmel et al., 2005; Le Champion et al., 2014*). Par exemple, *Rolland et al. (2012)* stipulent que seule la mobilisation de nouvelles variétés, autres que celles sélectionnées pour les systèmes de culture intensifs permettent d'atteindre une production quantitative et qualitative satisfaisante pour des itinéraires techniques menés sans intrants chimiques.

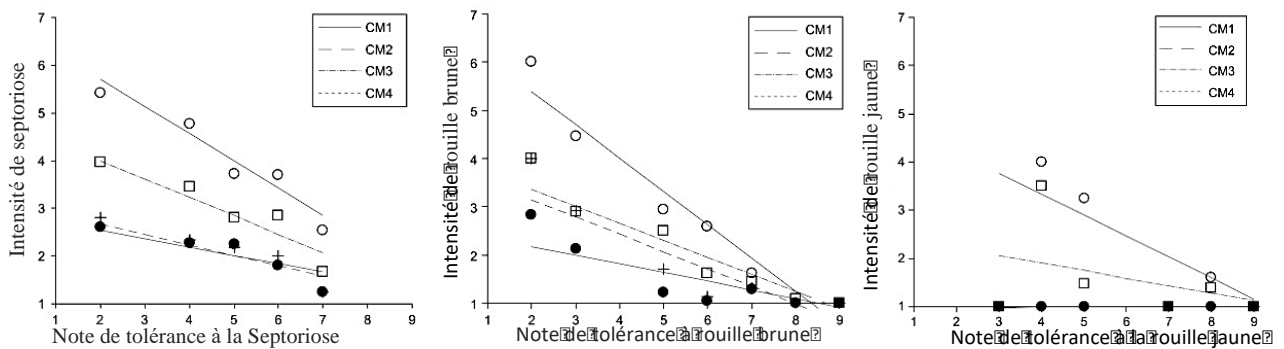
### **3.3. Comment repérer les génotypes adaptés au bas niveau d'intrants ?**

De nombreux auteurs ont démontré que le pool de meilleurs génotypes pour un itinéraire technique étaient d'autant plus différents de ceux d'un autre système au fur et à mesure que les différences de stress entre les systèmes augmentent (*Bänziger et al., 1997* pour stress azoté et rendement de maïs, *Cooper et al., 1997* pour stress hydrique et rendement de blé). En effet, les classements variétaux peuvent changer entre itinéraires techniques, en fonction du niveau de stress, et suivant les variables de production analysées. Pour certains auteurs, les génotypes adaptés aux stress sévères ont une plus faible probabilité d'être sélectionnés en itinéraires techniques avec utilisation intensive d'intrants (*Ceccarelli et al., 1996*). Ainsi, les variétés avec de forts rendements en itinéraires techniques avec forte utilisation d'intrants ne sont pas toujours ceux ayant des rendements élevés en bas niveaux d'intrants ou en agriculture biologique (*Murphy et al., 2007; Reid et al., 2011*). D'un point de vue pratique, pour s'assurer de garder les meilleurs génotypes pour un itinéraire technique donné, le sélectionneur doit conserver une proportion élevée de génotypes quand les essais sont menés au sein d'un autre itinéraire technique (*Brancourt-Hulmel et al., 2005; Le Champion et al., 2014*).

D'autres auteurs montrent, au contraire, que l'augmentation du potentiel de rendement permis par une sélection opérée en conduite à haut niveau d'intrant se traduit aussi par une augmentation des rendements en conditions sub-optimales (*Araus et al., 2008; Fischer et Edmeades, 2010; Richards, 2000; Slafer et al., 2005*). Les génotypes les plus productifs seraient en effet plus performants pour utiliser les ressources du milieu (*Calderini et Slafer, 1999; Van Wart et al., 2013*). D'autres études montrent qu'une sélection basée sur la stabilité des rendements en conduite à haut niveau d'intrant permet de sélectionner les génotypes plus tolérants aux stress environnementaux (*Lee and Tollenaar, 2007; Tollenaar et Lee, 2002*) et par conséquent une augmentation de leur rendement également en condition de stress. Certains travaux (*Lu et al., 2000; Ogushi et al., 2002*) suggèrent ainsi qu'il est possible d'identifier les meilleurs génotypes pour la qualité brassicole avec des données provenant d'environnements très différents. La possibilité d'effectuer une sélection pour une variable de

production dans un environnement, basée sur un autre environnement, dépend du degré auquel l'environnement impacte le phénotype (et par conséquent la part de phénotype expliqué par le génotype).

La sélection opérée en haut niveau d'intrant devra permettre aux génotypes de répondre aux différents critères de qualité simultanément en plus d'atteindre un fort rendement. La majorité des études citées ci-dessus se concentrent sur le rendement. Peu de connaissances sont actuellement disponibles en orge brassicole pour savoir si les itinéraires techniques intensifs en intrant fournissent un milieu favorable à l'identification des génotypes adaptés au bas niveau d'intrants.



**Figure 8.** Effet de la résistance variétale (notée de 1 à 9) et de l'itinéraire technique (CM : crop management) sur les pressions maladies observées (Septoriose, rouille brune et rouille jaune). Le niveau d'intrant est décroissant de CM1 to CM4. Graphique adapté de Loyce et al., (2008).

### 3.4. Quelle diversité génétique mobiliser pour répondre aux nouveaux enjeux de production ?

L'adaptation des caractéristiques génotypiques à l'itinéraire technique (et aux stress qu'il génère) et aux environnements de production entraîne une nécessaire analyse de la diversité génétique disponible pour optimiser le triptyque Génotype X Environnement X Conduite culturale. La sélection et le développement de génotypes adaptés à certains environnements (et/ou certains itinéraires techniques) requiert l'existence d'une diversité génétique suffisante, et une analyse précise de cette dernière (Donald, 1968; Mohammadi et Prasanna, 2003) susceptible d'orienter la sélection. La diversité génétique permet, en effet, l'adaptation des variétés aux contraintes locales, de sols ou climatiques et de maintenir le progrès génétique (Brown-Guedira et al., 2000; Gepts, 2006).

Des ressources génétiques domestiquées peuvent être mobilisées (par exemple issues des collections, des ressources des sélectionneurs ou catalogues officiels d'inscription des variétés). L'échange de ressources génétiques entre programmes de sélection de différentes entreprises est, par exemple, un moyen efficace pour maintenir ou augmenter le progrès génétique (Gutierrez et al., 2009). Au XX<sup>e</sup> siècle, cependant, une importante érosion de la diversité génétique cultivée a été observée pour les céréales (Bonnin et al., 2014; Shah et al., 2017), réduisant potentiellement les voies d'adaptation des



variétés à de nouvelles contraintes biotiques ou abiotiques. Une première phase d'érosion correspond au remplacement des variétés de pays<sup>11</sup> par des variétés de lignées pures (*Goffaux et al., 2011*). Les génotypes sélectionnés par les sélectionneurs ont en effet été obtenus à partir d'un nombre relativement restreint de géniteurs de variétés de pays, et seules les lignées homogènes ont été enregistrées et diffusées auprès des agriculteurs (*Bonneuil et Thomas, 2009*). Une seconde phase d'érosion a été entraînée par la diffusion à large échelle de gènes clés pour l'adaptation des variétés aux pratiques agricoles intensives, comme par exemple la diffusion d'un petit nombre de variétés avec fort potentiel de rendement et avec des caractéristiques de nanisme (*van de Wouw et al., 2010*). Cette deuxième phase a débuté à partir des années 1965 et 1970, due à la diffusion à large échelle d'un faible nombre de génotypes sur de très larges surfaces (*Perronne et al., 2017*). À partir d'une analyse de 20 traits morphologiques sur 353 génotypes d'orge provenant de 23 entreprises de sélection privées et publiques de différents pays, *Gutierrez et al. (2009)* concluent que pour 7 des traits, la diversité génétique est réduite au sein des pools génétiques des entreprises. Depuis les années 1970, on a observé une diminution du nombre d'entreprises effectuant de la sélection variétale et une concentration de la production des variétés au sein de grandes multinationales, concentrant également le germoplasme des sélectionneurs (*Bonneuil et Thomas, 2009; Gallais, 2013*).

Pour pallier à cette restriction des ressources génétiques cultivées, des ressources sauvages peuvent être utilisées pour introgresser des gènes d'intérêt dans les génotypes cultivés (*Gentzbittel et al., 2015; Lopes et al., 2015; Tanksley, 1997*). Par exemple, des gènes de résistances aux maladies ou de tolérance ont été trouvés chez une orge sauvage (*Hordeum bulbosum*) originaire du bassin méditerranéen (*Pickering et Johnston, 2005*). *Tanksley et McCouch, (1997), McCouch (1997) et Tanksley (2011) cités par Gallais (2013)*, considèrent que, globalement, moins de 15% des ressources génétiques sauvages ont été utilisées pour développer les génotypes actuels. Les programmes actuels n'ont, cependant, que peu recours à ce type de matériel mais plutôt à des croisements entre matériel élite d'origines différentes pour éviter de perdre fortement en production quantitative et qualitative (*Gallais, 2013*).

### **3.5. Quels outils pour analyser la diversité génétique disponible ?**

Différentes méthodes permettent l'analyse de la diversité génétique : analyses généalogiques, morphologiques ou agronomiques (*Mohammadi et Prasanna, 2003*). L'expérimentation reste cependant le moyen le plus utilisé et indispensable, aussi bien pendant la phase de sélection que celle de post-inscription, pour évaluer et caractériser les génotypes (*Lecomte, 2005; Sabaghnia et al., 2006; Voltas et al., 2002*). L'analyse des performances des variétés testées dans des réseaux d'essais multilocaux et pluri-annuels permet de comparer leurs performances les unes par rapport aux autres et par rapport à des témoins définis en fonction du marché. Ces réseaux permettent également de trier les

---

<sup>11</sup> Correspond à un ensemble de populations ou de clones d'une espèce végétale adaptées aux conditions environnementales de leurs régions.

génotypes, de « garantir que les variétés inscrites ne présentent pas de défaut majeur » et ainsi d'éliminer tout ce qui n'est pas conforme aux critères du Comité Technique Permanent de la Sélection<sup>12</sup> (Lecomte, 2005).

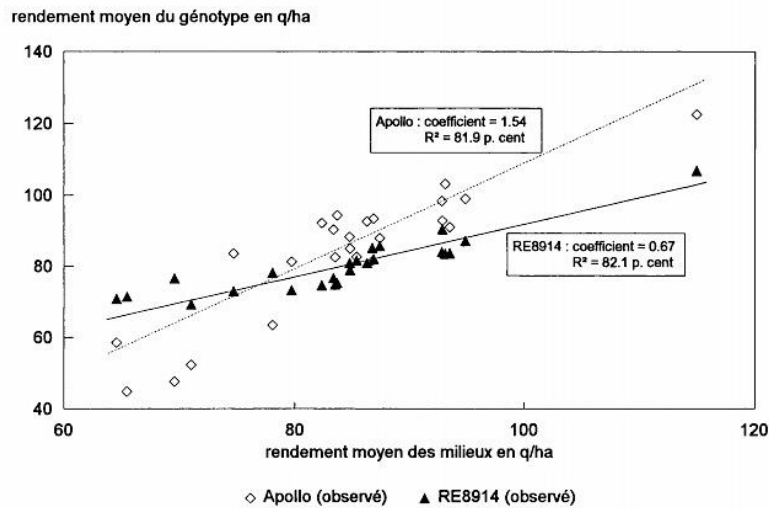
De nombreuses méthodes statistiques ont été développées pour analyser à partir des données de réseaux d'essais plus précisément la diversité des comportements variétaux en fonction du milieu dans lequel ils sont cultivés (Brancourt-Hulmel et al., 1997 ; Van Eeuwijk, 1995, Van Eeuwijk, 1996). Ces méthodes sont basées sur une décomposition de l'IGE et sont utiles pour i) Evaluer la capacité des variétés à maintenir leur rang dans différents environnements plus ou moins stressant, ii) Caractériser les variétés vis-à-vis de leur tolérance aux stress environnementaux et leur capacité à valoriser les ressources, iii) Expliquer les réponse différentielles des variétés en introduisant dans les modèles des covariables environnementales et iv) Prédire les IGE et préconiser des variétés pour des conditions non expérimentées.

Pour positionner les variétés par rapport aux environnements expérimentés et caractériser ces dernières vis-à-vis de leur tolérance aux stress environnementaux et leur capacité à valoriser les ressources, différentes méthodes (par ex. régression conjoint ou modèles AMMI - Additive Main effects and Multiplicative Interaction) sont disponibles.

Développés depuis les années 1920 (Mooers 1921, Stringfield et Salter 1934 et Yates et Cochran 1938, Finlay et Wilkinson 1963), les modèles de régression conjointe expriment l'IGE pour chaque génotype par un produit entre la performance moyenne (par exemple le rendement- appelé index environnemental) de l'ensemble des génotypes pour un environnement donné et un coefficient représentant une sensibilité du génotype à cet index environnemental. Ce modèle suppose donc une réponse linéaire des génotypes au potentiel de chaque environnement. Les génotypes peuvent ensuite être comparés entre eux sur leurs sensibilités spécifiques vis-à-vis de l'index environnemental (Eberhart et Russel, 1966) : les génotypes valorisant bien les milieux favorables, les génotypes bien adaptés aux milieux défavorables et les génotypes plus ou moins bien adaptés à l'ensemble des milieux (Finlay et Wilkinson, 1963). Ce type de modèle permet aussi d'identifier des génotypes stables dans le sens de Römer (1917), c'est-à-dire ayant une performance constante dans les différents environnements. Dans l'exemple de Brancourt-Hulmel et al. (1994) et repris **Figure 9**, le génotype Apollo présente une plus forte réponse à la fertilité du milieu (coefficient de 1,54) que le génotype RE8914 (coefficient de 0.67).

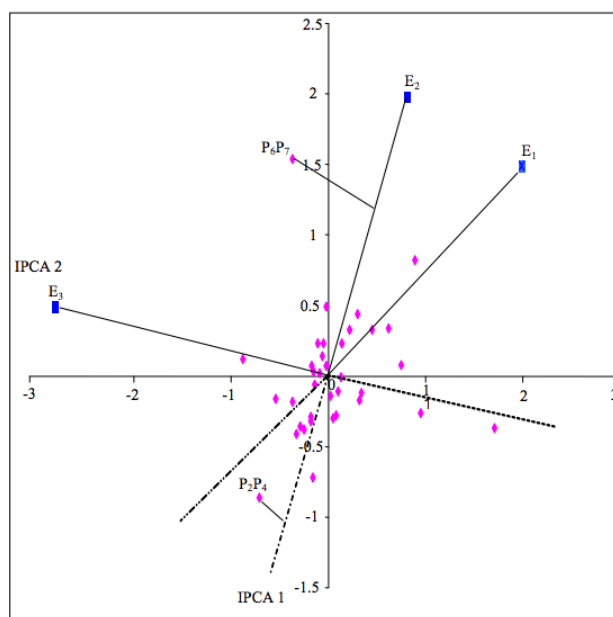
---

<sup>12</sup> Organisme sous l'égide du ministère français de l'agriculture qui Élabore les règlements d'inscription des variétés de semences au catalogue officiel des espèces et variétés, propose l'inscription de nouvelles variétés au ministre et participe aux définitions des règles techniques concernant la production des semences.



**Figure 9.** Illustration de résultat d'un modèle de régression conjointe : Courbe de réponse de deux génotypes de blé tendre aux rendements moyens des milieux. Les pentes de courbes représentent les sensibilités des génotypes à l'index environnemental (ici rendement moyen des milieux). Graphique issu de Brancourt-Hulmel et al., (1994)

Le modèle AMMI également développé depuis les années 1920 (*Fisher et Mackenzie 1923, Williams, 1952; Gollob, 1968; Mandel, 1969; Perkins et Perkins, 1972; Gabriel, 1978; Kempton, 1984*) est appliqué à la sélection variétale depuis *Gauch et Zobel (1988)*. Dans ce modèle, l'IGE est résumée par une Analyse en Composantes Principales (ACP) pour éliminer le bruit résiduel de l'IGE. Les IGE sont alors interprétées par les premières composantes principales de l'ACP. Les génotypes et les environnements peuvent être projetés sur les axes principaux de l'ACP, cette représentation visuelle en « biplot » a été développée par *Gabriel (1978)*. Cette représentation permet d'identifier les génotypes les plus performants et les plus adaptés à certains environnements particuliers (*Malosetti et al., 2013*). Par exemple, *Muthuramu et al. (2011)* - **Figure 10** analysent que le génotype P2P4 situé dans le quadrant opposé à l'environnement E2, a des performances qui chutent plus fortement que les autres génotypes pour cet environnement. Au contraire, le génotype P6P7 semble plus adapté que les autres génotypes à cet environnement.



**Figure 10.** Illustration de résultat de modèle AMMI (Additive Main effect, Multiplicative Interaction) : Réponse de 36 génotypes de riz (point rose) à 3 environnements de production (carré bleu). Graphique issu de Muthuramu et al. (2011).

Les méthodes d'analyse de l'IGE peuvent être de type explicative et prédictives quand elles permettent d'interpréter et d'analyser l'origine de l'IGE et de prédire les performances des génotypes dans d'autres milieux (par ex. régression factorielle (Denis 1980), ou régression par des moindres carrés partiels -Partial least square regression -PLS- Vargas et al., 1999).

La régression factorielle décompose l'IGE en une structure additive. L'IGE est modélisée en fonction de co-variables environnementales et/ou génétiques. Les covariables relatives au milieu sont choisies pour représenter les facteurs responsables des différences de performances variétales ou d'adaptation particulière des génotypes (par exemple les facteurs impactant le rendement). Dans ce cas, les génotypes sont caractérisés par des coefficients de régression, sur un ensemble d'index environnementaux (Denis, 1980; Denis et Vincourt, 1982). Comme pour la régression conjointe, le signe des coefficients renseigne sur l'adaptation des génotypes, par comparaison au génotype « moyen ». Les génotypes bien adaptés à un index environnemental ont des coefficients positifs, les génotypes mal adaptés ont des coefficients négatifs (Denis, 1980; Denis et Vincourt, 1982). Par son hypothèse de linéarité entre les environnements, le modèle de régression factorielle présente l'avantage de pouvoir prédire des performances génétiques d'individus, préalablement évalués, dans de nouveaux environnements (Smith et al., 2005). Dans une étude sur la vigueur au printemps du ray-grass, Balfourier et al. (1997) expliquent plus de 70% des IGE pour cette variable par la température minimale du mois le plus froid du cycle cultural et une caractéristique variétale (la fréquence allélique du gène PGI2-20). Selon les auteurs, ces résultats permettent aux sélectionneurs d'identifier des génotypes de ray-grass ayant une forte vigueur au printemps.

L'analyse des IGE par PLS permet également de modéliser cette dernière en fonction de co-variables environnementales et/ou génotypiques. Cependant, les coefficients de régression sont calculés sur des axes composites (issus d'une combinaison linéaire de l'ensemble des variables génotypiques/environnementales incluses dans l'analyse), ce qui permet d'éviter des problèmes de colinéarité entre les variables explicatives. Cependant, avec méthode, il est plus difficile d'intégrer simultanément dans l'analyse des co-variables génétiques et environnementales (Vargas *et al.*, 1999). L'évaluation expérimentale présente, cependant, certains inconvénients, notamment liés au nombre limité de milieux ou de géotypes testés et aux coûts des dispositifs expérimentaux (Lecomte, 2005). Des approches par modélisation ont été développées pour pallier cette limite.

### 3.6. Analyse de la diversité des réponses génotypiques par modèle (*in silico*)

L'évaluation des performances variétales dans des conditions pédoclimatiques contrastées nécessite généralement plusieurs années pour pouvoir couvrir des conditions climatiques variées, et peut donc être onéreuse. Ainsi, la gamme des caractéristiques variétales et des conditions environnementales testées reste restreinte, limitant l'extrapolation des résultats à des situations non expérimentées mais potentiellement intéressantes (Asseng *et al.*, 2002 ; Hammer *et al.*, 1989 ; Jeuffroy *et al.*, 2006 ; Smith *et Gooding*, 1999). Les modèles de culture, au contraire, permettent l'évaluation rapide d'un grand nombre de systèmes virtuels, et donc de nouvelles combinaisons de caractères variétaux non testés expérimentalement (Rossing *et al.*, 1997). L'utilisation des modèles de culture pour l'identification de caractéristiques variétales (et/ou de l'itinéraire technique) d'intérêt a été proposée depuis les années 1980 mais s'est largement développée depuis 25 ans (Jeuffroy *et al.*, 2014; Shorter *et al.*, 1991). Ils ont, par exemple, été utilisés pour identifier les caractéristiques variétales adaptées à des contextes de production en tournesol (Casadebaig *et al.*, 2011), pois (Jeuffroy *et al.*, 2012), arachide (Suriharn *et al.*, 2011). Les modèles peuvent, en effet, jouer un rôle clé pour analyser l'impact de l'amélioration des tolérances variétales aux facteurs du milieu sur les variables de production (Ramirez-Villegas *et al.*, 2015). Ils permettent d'analyser et d'interpréter les IGE, ainsi que d'identifier le rôle de certains caractères variétaux dans l'adaptation des géotypes à des environnements variés (Barbottin *et al.*, 2006; Boote *et al.*, 1996; Casadebaig, 2008; Fargue, 2003). Par exemple, nombre de travaux récents se concentrent sur l'identification de caractéristiques génotypiques adaptées au changement climatique (Rötter *et al.*, 2015; Semenov *et al.*, 2014; Tao *et al.*, 2017).

De nombreux modèles de culture ont été développés pour étudier l'impact des caractéristiques génotypiques et des facteurs du milieu impactant la production des plantes. Jusqu'à récemment, le développement et l'utilisation des modèles de culture étaient le plus souvent menés par les équipes de recherche ou laboratoire dans lesquels les modèles ont été développés. Par exemple, les travaux qui ont initié la caractérisation de géotype de riz super-productif (Dingkuhn *et al.*, 1991) ont été basés sur

la mise en place d'un modèle de culture du riz (L3QT) développé par l'IRRI<sup>13</sup> prédisant le rendement en fonction des stress azotés (*Graf et al., 1991; Vries, 1989*). La plateforme de simulation APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) a été développée par l'unité de recherche APSRU (Agricultural Production Systems Research Unit – un groupe collaboratif composé de membres du CSIRO et des agences gouvernementales de l'état du Queensland en Australie). Le modèle a été utilisé pour optimiser l'efficacité d'utilisation des cultures en eau en Australie (*Hochman et al., 2009*), et en azote (*Hochman et al., 2013*). Le modèle a également été utilisé pour analyser les IGE. Par exemple, pour le sorgho, *Hammer et al. (2010)* ont montré que les géotypes les plus hauts montraient aussi une efficacité d'utilisation lumineuse plus élevée. Ils ont aussi étudié l'impact des caractéristiques génotypiques sur la dynamique de l'azote dans la plante et leur capacité à maintenir le feuillage vert après floraison. Enfin, dernier exemple, le modèle Azodyn (*Jeuffroy et Recous, 1999*) a été développé en France pour évaluer différentes options de fertilisation sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre. Il est basé sur des travaux en blé qui ont permis de comprendre les effets des carences azotées temporaires sur la production quantitative et qualitative (*Jeuffroy et al., 2000; Jeuffroy et Bouchard, 1999*). Il a été utilisé pour mettre au point des stratégies de fertilisation azotée permettant conjointement de limiter les pertes en rendement, de maximiser les chances d'obtention d'une teneur en protéines élevée, et de réduire les pertes vers l'environnement pour différentes conditions pédoclimatiques en France (*Jeuffroy et al., 2013; Meynard et al., 2002*). Ce modèle a ensuite été adapté pour rendre compte de la variabilité des réponses des géotypes de blé à une nutrition azotée sub-optimale, permettant ainsi de choisir, sur la base de leurs caractéristiques phénotypiques, les variétés les plus tolérantes au stress azoté (*Barbottin et al., 2006*).

Pour identifier les caractéristiques des géotypes et des itinéraires techniques les plus favorables à un contexte de production et pédoclimatique donné, les modèles de culture doivent répondre à plusieurs caractéristiques :

- (a) Ils doivent intégrer des paramètres variétaux (*Barbottin, 2004; Martre et al., 2015a*). Le nombre de paramètres variétaux varie énormément entre les différents modèles de culture : Azodyn compte 5 paramètres variétaux (sur 80 paramètres), STICS une dizaine (pour plus de 130 paramètres - *Ruget et al., 2002*), APSIM plusieurs dizaines (sur environ 500 paramètres - *Casadebaig et al., 2016b*).
- (b) Les modèles doivent également prendre en compte l'effet des caractéristiques du milieu impactant la production quantitative et qualitative des cultures.
- (c) La qualité prédictive et/ou de classement entre les géotypes pour les principales variables d'intérêt doit être suffisante.

Pour identifier les caractéristiques variétales les plus favorables à un contexte de production donné, les modélisateurs font varier un ou plusieurs paramètres simultanément en fonction de la variabilité

---

<sup>13</sup> Institut International de recherche sur le riz

génétique connue (*Semenov et Halford, 2009; Hammer et al., 2010*) ou en utilisant des algorithmes d'optimisation et analysent les sorties du modèle. Par exemple, *Semenov et al. (2014)* font varier 9 paramètres (décrivant la photosynthèse et surface foliaire, la phénologie, la tolérance à la sécheresse et la capacité d'absorption en eau des racines) du modèle de culture Sirius (*Jamieson et al., 1998*) pour étudier l'adaptation des géotypes au changement climatique. Dans cette étude, la gamme de variation des paramètres est basée sur des résultats antérieurs de calibration du modèle pour différents cultivars (*He et al., 2012; Semenov et al., 2009*). Les 9 paramètres ont, selon les auteurs, été choisis comme ceux potentiellement les plus prometteurs pour maintenir ou augmenter le rendement dans un contexte de changement climatique. Les auteurs ont utilisé un algorithme évolutif avec auto-adaptation (evolutionary algorithm with self-adaptation- EA-SA, voir par ex. *Stratonovitch et Semenov, 2010*) pour identifier les valeurs de paramètres les plus favorables dans 10 sites à travers l'Europe et pour une projection climatique à moyen terme. Des analyses de sensibilité peuvent également être mobilisées pour identifier les paramètres du modèle impactant les sorties de ce dernier avant d'identifier les valeurs des paramètres favorables à des contextes de production donnés (p. ex., *Aggarwall et al., 1997; Quilot-Turion et al., 2012; Paleari et al., 2017*).

Une des limites majeures pour identifier des caractéristiques géotypes favorables à des contextes donnés par modèles de culture est l'absence de signification biologique concrète des paramètres (*Boote et al., 2001 ; Hammer et al., 2010 ; Ramirez-Villegas et al., 2015*). En effet, dans le cas d'une calibration sur un ensemble de paramètres, des compensations entre ces derniers peuvent se produire. Ceci entrave les possibilités de mise en application concrète (*in vivo*) des idéotypes définis *in silico* (*Boote et al., 2001*). Pour remédier à cette difficulté, certains auteurs proposent de calibrer les paramètres variétaux des modèles de culture directement et individuellement à partir de mesures réalisées sur les plantes dans des réseaux expérimentaux (*Dingkuhn et al., 2005; Farnsworth et Niklas, 1995*). Par exemple, dans le modèle de culture Azodyn (*David et al., 2004; Jeuffroy et Bouchard, 1999*), deux paramètres géotypiques (le rendement maximum et le poids de mille grains maximum) sont issus de mesures directement réalisées sur des essais expérimentaux. Une estimation directe et individuelle des paramètres géotypiques assure la cohérence entre les paramètres et les traits variétaux (*Jeuffroy et al., 2006*). Ainsi, pour qu'un paramètre d'un modèle de culture soit considéré comme géotypique, *Jeuffroy et al. (2006)* précisent que ce dernier doit évidemment varier suivant le géotype, mais pas l'environnement, être facilement mesurable sur le terrain et être interprétable en terme de fonctionnement physiologique de la culture.

Une autre limite importante pour l'identification par modélisation des caractéristiques géotypiques adaptées à un contexte donné est le nombre des facteurs impactant la production et les processus physiologiques de fonctionnement de la plante modélisés. En effet, dans les modèles de culture, des facteurs impactant la production tels que la pression maladie, la compaction du sol, les facteurs climatiques entraînant une stérilité du pollen sont rarement pris en compte (*Chenu et al., 2017; Jeuffroy et al., 2014*). Parallèlement, seule une partie des processus de fonctionnement de la plante

sont intégrés aux modèles de culture (*Paleari et al., 2017*). Peu de modèles de culture intègrent le comportement différentiel des génotypes face à une pression maladie ou une pression adventice. L'importance des caractéristiques génotypiques favorables à des contextes de production donnés seront donc à relativiser en fonction du nombre de facteurs impactant le rendement et des processus physiologiques intégrés au modèle de culture.

Certaines études récentes stipulent que les résultats, pour l'identification de caractéristiques variétales adaptées à des contextes de production, et notamment au changement climatique, sont plus fiables quand ces derniers se basent sur des simulations issues d'un ensemble de modèles de culture plutôt que sur un seul modèle de culture (*Bassu et al., 2014; Rötter, 2014; Tao et al., 2017*). Les biais et erreurs de simulations sont minimisés en utilisant un ensemble de modèles de culture, qui sont généralement calibrés et validés sur un plus grand nombre de données expérimentales et qui modélisent les mécanismes physiologiques par différents formalismes (*Martre et al., 2015b; Wallach et al., 2016*). Ainsi, pour l'orge fourragère, *Tao et al. (2017)* ont identifié 8 modèles de la littérature permettant d'étudier l'adaptation des caractéristiques des génotypes de cette espèce pour faire face au changement climatique (Table 2).

Malgré le nombre élevé de modèles de culture développés, la modélisation des variables relatives à la qualité des récoltes reste relativement peu fréquente dans la littérature, et concerne au mieux la teneur en protéines pour les céréales (*Barbottin, 2004; Martre et al., 2006; Nuttall et al., 2017*). Des exceptions existent cependant, comme le modèle *SiriusQuality* (*Martre et al., 2006*) qui simule la teneur en protéines et détaille les types de protéines présentes dans le grain ou *APSIM-Nwheat* qui modélise la teneur en protéines et la taille des grains (*Asseng et al., 2008*).

**Table 2.** Modèles de culture en orge utilisés dans la synthèse produite par *Tao et al., (2017)*

Modèle de	Référence	Nombre de paramètres génotypiques
APSIM	<i>Keating et al., (2003)</i>	8
CropSyst	<i>Stöckle et al., (2003)</i>	8
HERMES	<i>Kersebaum, (2007)</i>	7
MCWLA 2.0	<i>Tao and Zhang, (2013)</i>	7
MONICA	<i>Nendel et al., (2011)</i>	9
SIMPLACE	<i>Addiscott and Whitmore, (1991)</i>	8
<i>SiriusQuality</i>	<i>Martre et al., (2006)</i>	9
WOFOST	<i>Boogaard et al., (1998)</i>	8

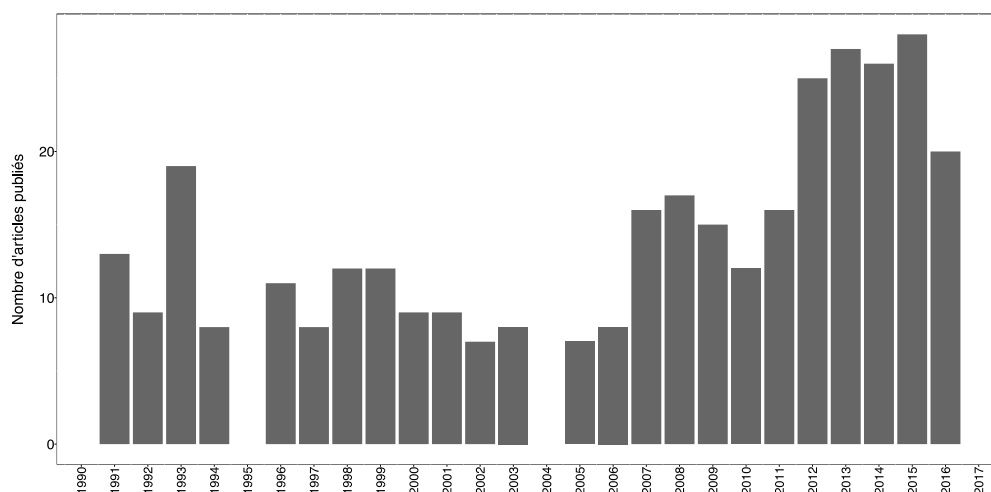
L'identification de caractéristiques du génotype et de l'itinéraire technique favorables aux conduites culturales économes en intrants peut mobiliser des travaux expérimentaux, différentes méthodes statistiques et des travaux de modélisation.



#### 4. Quelle démarche utiliser pour concevoir des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants ?

##### 4.1. Définition des idéotypes variétaux et cultureux

La conception de géotypes adaptés à des contextes de production donnés peut s'appuyer sur la notion d'idéotype. Le concept d'idéotype, a été initialement proposé par *Donald (1968)* comme « *un modèle de plante, un modèle biologique dont on attend qu'il se comporte d'une manière prédictible dans un environnement défini* ». Plus récemment, dans le cadre d'une école-chercheurs, un idéotype variétal a été défini comme « *une combinaison optimale de caractères morphologiques et physiologiques ou de leurs déterminants génétiques conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un environnement, un mode de production et une utilisation donnés* » (*Debaeke et Quilot-Turion, 2014*). Depuis l'article fondateur de *Donald (1968)*, le nombre de publications se référant à la notion d'idéotype a régulièrement augmenté (*Desclaux et al., 2013, Figure 11*), même si un effectif de 30 articles par an, incluant cette notion dans le titre ou les mots-clefs, n'atteste pas d'un emploi massif et explicite du concept dans les activités de recherche. La notion d'idéotype est donc majoritairement utilisée par les acteurs de l'amélioration variétale pour décrire la plante « idéale » dont les caractéristiques permettraient de répondre à des attentes ou objectifs spécifiés. La plupart des articles scientifiques mentionnant la notion d'idéotype se focalisent sur l'amélioration du potentiel de rendement (*Dencic, 1994; Peng et al., 2008*), l'utilisation des ressources du milieu (*Lynch, 2013; Wiesler et al., 2001*) ou plus récemment sur l'adaptation au changement climatique (*Rötter et al., 2015, Semenov et al., 2014; Tao et al., 2017*).

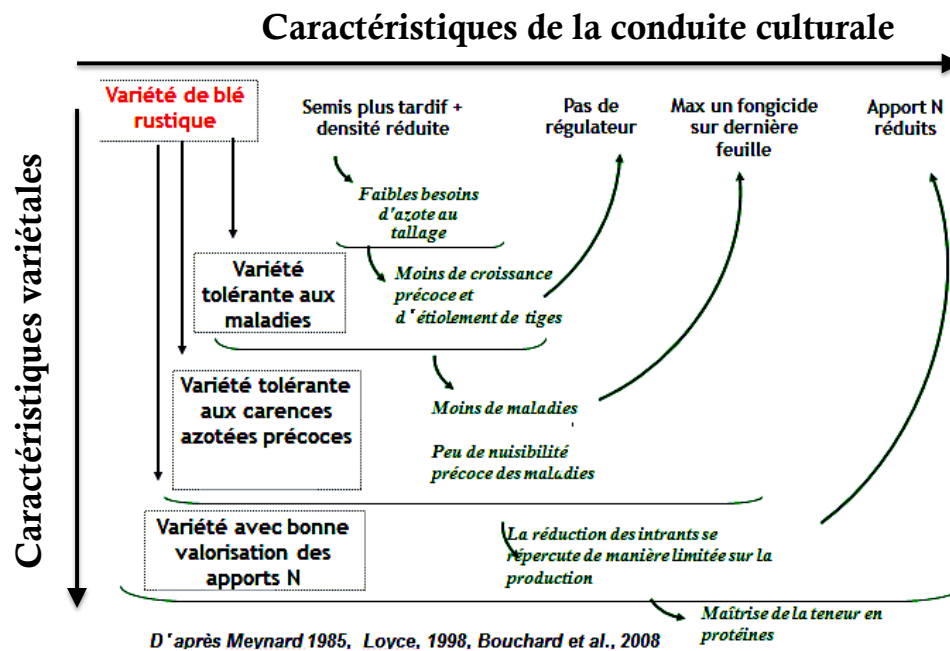


**Figure 11.** Fréquence d'utilisation de la notion d'idéotype dans les publications scientifiques par année (utilisant la base de publication web of science : <https://wcs.webofknowledge.com/RA/analyze.do>)

L'itinéraire technique, comme mentionné dans les parties précédentes, influence également les traits phénotypiques en utilisant la plasticité des plantes. A l'issue de travaux de l'école-chercheurs, l'idéotype culturel a été défini, indépendamment de l'idéotype variétal, comme « *des combinaisons techniques (culturales et de transformation) impactant certains caractères phénotypiques élémentaires qui définissent les idéotypes de plantes choisis* » (Debaeke et Quilot-Turion, 2014). Dans une majorité d'études, l'adaptation de l'itinéraire technique n'est pas étudiée lorsque des idéotypes variétaux sont définis : l'itinéraire technique est considéré comme fixe et faisant partie du contexte dans lequel il va s'insérer. Or, pour faire varier certaines caractéristiques du couvert végétal, il est parfois plus facile de mobiliser des éléments de l'itinéraire technique que des caractéristiques variétales. Pour le blé, par exemple, il a été démontré que la densité de semis, combinée à la date d'application du premier apport d'engrais azoté, a un fort effet sur la sensibilité des plantes à la verse (Loyce et al., 2008).

En s'appuyant sur la caractérisation de facteurs individuels favorables à un contexte de production donné, basée sur les outils d'analyse de la diversité génétique présentée dans les parties précédentes, différentes méthodes peuvent être employées pour définir des idéotypes variétaux et culturaux.

A partir des résultats des essais expérimentaux, des analyses fonctionnelles des performances des variétés au sein d'itinéraires techniques peuvent être mobilisées pour concevoir des idéotypes variétaux et culturaux. Les analyses de la diversité des réponses génotypiques aux facteurs du milieu, par exemple, fournissent des pistes de réflexion pour optimiser la combinaison Génotype X Conduite culturale. Les différents travaux pour la mise en place de conduites culturales en bas niveau d'intrants en blé en France (Loyce et al., 2008; Meynard, 1985) ont permis d'identifier les principales combinaisons des caractéristiques génotypiques et de l'itinéraire technique nécessaires pour diminuer le recours aux intrants chimiques (**Figure 12**). Ainsi, les conduites à bas niveau d'intrants définies par ces auteurs ont une densité de semis réduite, permettant de diminuer les besoins et les apports d'azote au tallage (renforcé par l'utilisation de variétés tolérantes les stress azotés) mais également la biomasse au début de cycle et les risques de développement de maladies. Grâce à l'existence de variétés multi-résistantes aux maladies (**Figure 8**), le recours aux produits phyto-pharmaceutiques peut être réduit. De même, pour la production d'idéotype de riz super-productif, Tsunoda (1962) a comparé le potentiel de rendement et la réponse du rendement à la fertilisation azotée en fonction des caractéristiques génotypiques. Cet auteur montre que les variétés avec des tiges courtes, robustes, des feuilles érigées et petites avaient des potentiels de rendement plus élevés et une plus forte augmentation de rendement quand l'azote disponible augmentait que les autres variétés. L'étroite relation entre certains traits morphologiques et le potentiel de rendement ou la réponse à l'azote, ont conduit au concept de « *plant type concept* » qui a été utilisé pour sélectionner des variétés (Yoshida, 1972) et définir des idéotypes (Peng et al., 2008; Peng et Khushg, 2003).



**Figure 12.** Caractéristiques génotypiques et des modalités de la conduite culturale favorables aux itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en blé.

Les modèles de culture, outre l'étude de la diversité génétique *in silico* peuvent être mobilisés pour définir des idéotypes. Par exemple, dans le cas de l'idéotype de riz développé par l'IRRI, *Dingkuhn et al. (1991)* ont prédit une augmentation de 25% du rendement, si les caractéristiques variétales des génotypes de l'époque étaient modifiées pour, entre autres, diminuer la capacité de tallage, réduire la croissance des feuilles et augmenter la concentration en azote des feuilles dans les phases plus tardives de croissance de la plante. Cependant, comme le remarquent *Makowski et al. (2006)*, une difficulté et limite importante de l'utilisation des modèles de culture pour l'idéotypage est l'hypothèse d'indépendance entre paramètres génotypiques, généralement posée lors des simulations effectuées par modèle lorsque plusieurs paramètres génotypiques sont étudiés simultanément. En effet, des corrélations existent entre les différentes caractéristiques génotypiques qui peuvent entraver la définition cohérente d'un idéotype (*Yin et al. 2003, Yin et al., 2016*). La mesure précise des corrélations génétiques peut être délicate à réaliser à partir d'essais expérimentaux, car les IGE viennent perturber l'association entre traits génétiques et leur expression (*Jahn et al., 2011*). Globalement, même si la prise en compte de ces corrélations est indispensable pour la définition d'idéotypes réalistes (*Yin et al., 2016*), peu d'études les prennent explicitement en compte (*Paleari et al., 2017*).

Une autre possibilité, pour définir des idéotypes variétaux et culturaux, est la mobilisation de connaissances qualitatives et laissant une large place au raisonnement subjectif, parfois peu formalisé : « l'expertise », les « observations » et l'« intuition » (*Lauri, 2014*). Ces connaissances des acteurs (expérimentateurs, conseillers, agriculteurs) ont été régulièrement mobilisés pour concevoir des

systèmes de culture innovants (Reau et al., 2012), mais plus rarement pour concevoir des idéotypes variétaux et culturels. Par exemple, Fleury (1970) cité par Vocanson, 2006) se base sur des connaissances expertes pour améliorer les rendements des variétés de maïs dans le nord-ouest de la Mayenne.

#### **4.2. Quelle démarche adopter pour concevoir et évaluer des idéotypes variétaux et culturels ?**

La conception de variétés adaptées à des contextes de production donnés peut s'appuyer sur la démarche de conception d'idéotype. Une formalisation a récemment été proposée (Debaeke et Quilot-Turion, 2014; Martre et al., 2015a) et comporte trois grandes étapes (**Figure 13**).

La première étape consiste à définir, à partir d'un contexte agronomique, économique, environnemental et quelquefois sociologique et politique, un cahier des charges qui réponde aux contraintes et motivations des différents acteurs impliqués dans la démarche.

La deuxième étape vise à identifier un ensemble de caractéristiques qui permettent à la plante de répondre aux différents objectifs du cahier des charges. Deux grands types de leviers sont envisagés: i) les leviers techniques caractérisant la conduite culturale (itinéraire technique) ou le processus de transformation, ii) les leviers génétiques (caractères phénologiques, morphologiques, tolérances variétales). L'idéotype ainsi défini repose sur une optimisation des combinaisons Génotype X Environnement X Conduite, et la valorisation des interactions entre les différentes composantes du système.

La troisième étape est l'évaluation de la capacité des idéotypes nouvellement définis à correctement répondre aux objectifs spécifiés dans le cahier des charges. L'évaluation des idéotypes est une étape importante pour s'assurer que ces derniers présentent bien les caractéristiques attendues, avant de lancer leur production réelle. Cette dernière peut se réaliser soit *in vivo*, soit *in silico*. Rares sont, cependant, les évaluations d'idéotypes qui choisissent l'évaluation des idéotypes *in vivo*, due aux contraintes matérielles et de temps associés aux expérimentations terrain. La plupart des évaluations d'idéotypes sont réalisées *in silico*, à l'aide de modèles de culture.

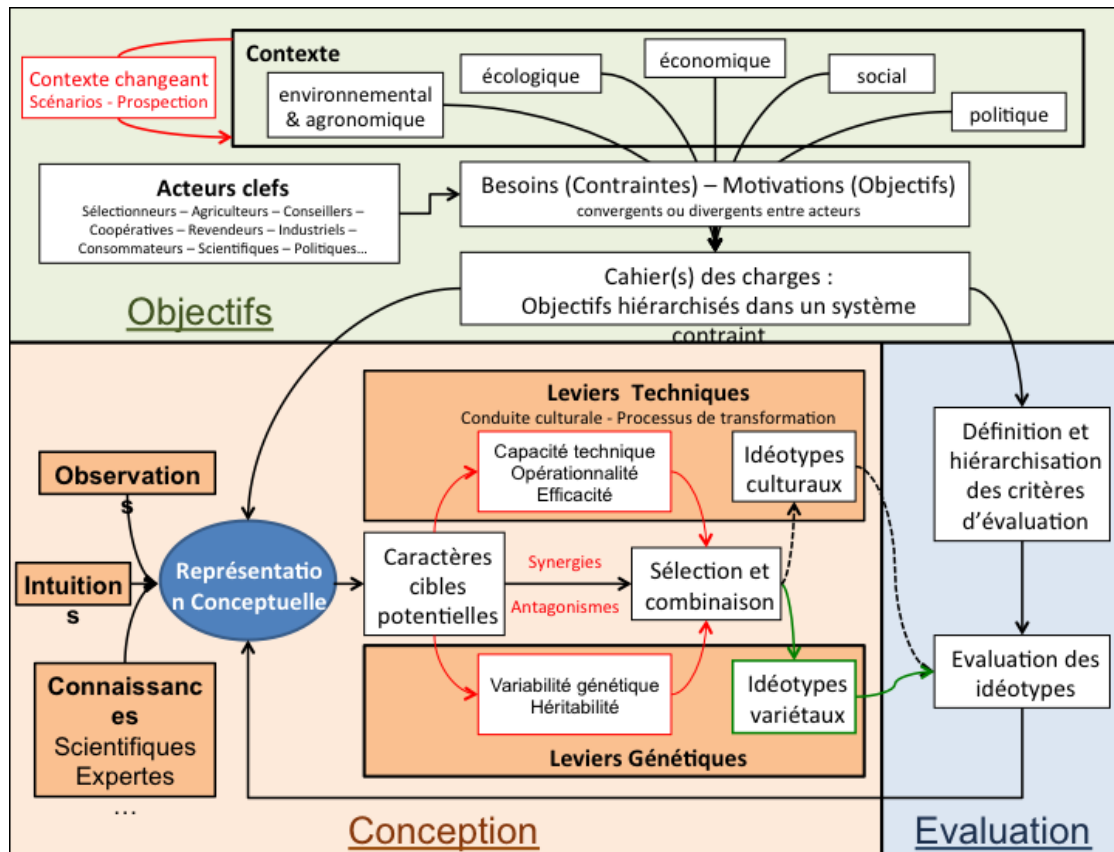


Figure 13. Démarche de conception d'idéotype formalisée par Debaeke and Quilot-Turion, (2014)

Les étapes de conception et d'évaluation des idéotypes ne sont souvent pas clairement distinctes. En effet, des méthodes similaires peuvent être employées pour l'une et l'autre, et parce que le processus de conception d'idéotype n'est pas linéaire. L'alternance d'étapes de conception et d'évaluation donne lieu à des boucles de progrès : les caractéristiques des idéotypes peuvent en effet évoluer suivant les résultats de leur évaluation (Debaeke et al., 2014). Par exemple, des riz issus d'une sélection basée sur un idéotype défini par l'IRRI pour augmenter le rendement et caractérisé par de larges épis, peu de talles improductives et une résistance à la verse, ont été mis en culture dans le début des années 1990. Peng et Khushg (2003) relatent que les performances agronomiques de ces plantes ont été décevantes : faible rendement, faible production de biomasse, sénescence précoce et sensibilité aux maladies. Ces résultats ont permis de préciser les caractéristiques variétales adaptées à la définition d'idéotypes avec de forts rendements (Peng et Khushg, 2003) et de mettre en essais au début des années 2000 des génotypes issus des nouveaux idéotypes. Bien que la seconde génération d'idéotypes ne dépasse pas des rendements de  $10 \text{ t ha}^{-1}$ , ils produisent significativement plus de grains que l'idéotype de première génération. Les phases de conception et d'évaluation des idéotypes par modèle sont donc entremêlées et généralement non clairement délimitées.

Le Masson et al. (2006) ont proposé de distinguer deux grands régimes de conception, la conception réglée et la conception innovante. La conception innovante désigne un processus d'exploration visant à satisfaire des attentes complètement nouvelles (Agogué et al., 2014). Elle fait intervenir des

processus de coévolution simultanée du concept à développer et des connaissances à mobiliser (*Elmqvist et Segrestin, 2009*). Ainsi, les objectifs visés, les champs de savoirs et les collaborations mobilisés évoluent au cours du processus de conception, au fur et à mesure que le concept de l'innovation se précise (*Le Masson et al., 2006*). Dans notre cas, l'identification de caractéristiques variétales (et des modalités de l'itinéraire technique) pour de nouveaux contextes de production pourrait révéler des contraintes et opportunités qui n'étaient pas présentes et identifiées dans les systèmes actuels. De même des nouveaux besoins de connaissances ou d'outils méthodologiques pourrait émerger au cours de ce processus. La conception réglée, au contraire, vise à améliorer des produits ou technologies existantes sans changer les objectifs de conception, ni l'identité des objets conçus (*Elmqvist et Segrestin, 2009*). Les critères que doit respecter l'objet conçu ne changent pas au cours du processus et peuvent donc être clairement définis à l'avance (*Agogué et al., 2013*). Il est alors possible dans ce cas de spécifier *a priori* les compétences à mobiliser et les méthodes de validation. Par exemple, l'identification de caractéristiques variétales (de l'itinéraire technique) pour de nouveaux contextes de production par modélisation, comme couramment pratiquée, relève d'une conception réglée, car les hypothèses et caractéristiques génotypiques identifiés se cantonnent au cadre d'analyse et processus pris en compte par le modèle. Les travaux de conception en agronomie font généralement intervenir séquentiellement plusieurs régimes de conceptions.

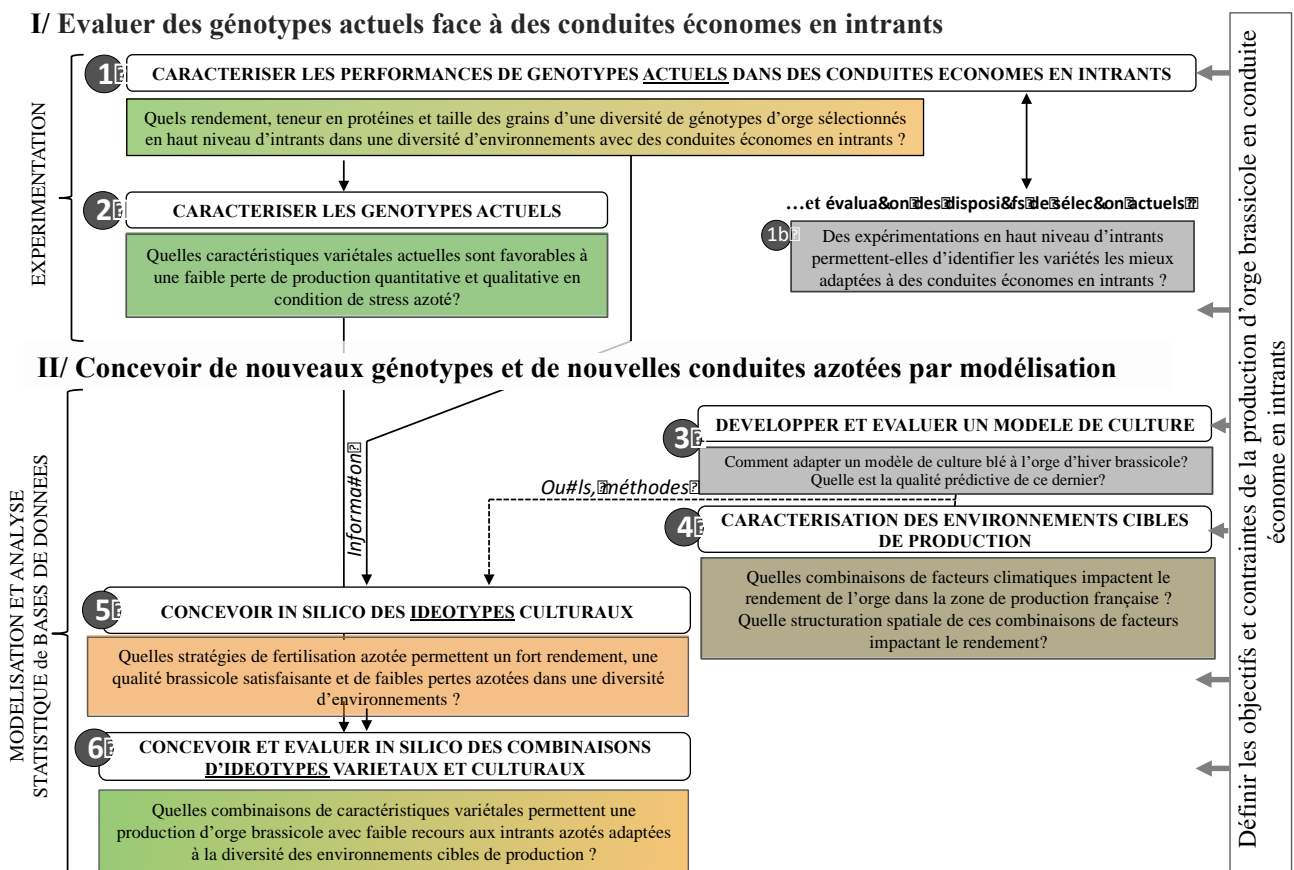


**DEMARCHE ET QUESTIONS DE RECHERCHE**

Pour répondre à la demande sociétale et politique, les productions agricoles doivent s’orienter vers des systèmes de production caractérisés par un moindre usage et une meilleure efficacité d’utilisation des intrants. Des travaux, associant différents acteurs de la R&D, ont été menés sur blé pour répondre à ces objectifs, mais sont encore très peu avancés sur l’orge. **L’objectif de ce travail est de concevoir et d’évaluer des idéotypes variétaux et culturaux favorables à la production d’orge d’hiver 6 rangs brassicole pour des conduites économes en intrants.**

La démarche de recherche mobilisée pendant ce travail s’est inspiré de la méthode de conception d’idéotype, formalisée par *Debaeke et al. (2014)* (Figure 13).

**Produire de l’orge d’hiver brassicole en conduite culturale économe en intrants**



**Figure 14.** Démarche générale utilisée pendant la thèse. Les carrés verts, orange et marron concernent le travail sur les idéotypes variétaux, culturaux et la caractérisation des environnements de production respectivement. Les carrés gris présentent des étapes méthodologiques. Les numéros font référence aux chapitres de thèse.



## **1. Définition des objectifs, contraintes et cahier des charges de la production d'orge brassicole**

La définition des objectifs et des contraintes des acteurs a été réalisée à travers la bibliographie, les réunions du projet, auxquelles participaient des chercheurs, des sélectionneurs et l'institut technique de la brasserie et malterie (IFBM), et l'interrogation d'experts (coopératives ou chambres d'agriculture par exemple). Ce travail a été réalisé tout au long de la thèse, et enrichi au fur et à mesure de la production de résultats issus des analyses effectuées au cours du projet. Cette partie n'a pas fait l'objet d'une formalisation en tant que telle dans cette thèse.

Le travail de thèse s'est concentré sur les 35 principaux départements producteurs d'orge d'hiver brassicole en France (Figure 2). Sur la base des sources décrites précédemment, nous avons focalisé notre analyse sur cinq critères : le rendement en grains, la teneur en protéines des grains, le calibrage des grains et les pertes azotées vers l'environnement (considérées globalement). Ces caractéristiques, primordiales pour les agriculteurs et les acteurs de la filière brassicole, ont été choisies pour plusieurs raisons: i) elles sont facilement mesurables et/ou modélisables dans une grande diversité de situations, ii) elles dépendent fortement du fonctionnement agronomique de la culture, iii) elles sont potentiellement impactées par une réduction de l'utilisation d'intrants.

## **2. Evaluation de la diversité des performances agronomiques des génotypes actuels, cultivés dans des conduites économes en intrants**

En France, les génotypes d'orge sont actuellement sélectionnés en conduites « intensives » en intrants. Maintenir une production quantitative et qualitative dans des conduites économes en intrants suppose une double adaptation des caractéristiques variétales et de l'itinéraire technique. En effet, si ces deux leviers ne sont pas ajustés l'un à l'autre, simultanément, les stress environnementaux rencontrés dans des itinéraires techniques économes en intrants sont généralement plus importants que ceux des conduites culturales intensives.

Pour la production quantitative, notamment en blé et maïs, de nombreux auteurs se sont intéressés à l'identification des meilleurs génotypes pour des itinéraires techniques à intrants réduits, à partir d'essais menés en haut niveau d'intrants. Comme pour d'autres céréales, la production d'orge brassicole est soumise à des exigences de qualité, liées aux procédés de transformation de l'orge en malt puis bière. Parmi eux, l'un est spécifique et peu étudié : le calibrage. Peu de références techniques et scientifiques sont disponibles en orge brassicole pour analyser :

- (i) la possibilité de remplir simultanément les multiples critères de production en situation d'intrants réduits,
- (ii) la possibilité d'identifier les meilleurs génotypes sur plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs à partir d'essais menés en haut niveau d'intrants.

Cette identification des meilleurs géotypes en situation d'intrants réduits suppose de disposer parmi une gamme de géotypes existants, par exemple ceux prêts à être inscrits au catalogue officiel, une variabilité génotypique dans la réponse à la baisse d'intrants.

Pour réaliser cette évaluation, nous avons analysé les performances agronomiques de l'orge au sein d'un réseau d'essais multi-local, en comparant (i) des itinéraires techniques intensifs en intrants, et ii) des itinéraires techniques avec un recours très bas en intrants. Les géotypes testés au cours de cette expérimentation proviennent d'une sélection effectuée en haut niveau d'intrants, car il n'y avait des de géotypes sélectionnés pour les conduites à bas niveau d'intrant parmi les sélectionneurs membre du projet. Les essais ont été menés sur plusieurs sites couvrant au mieux la zone de production brassicole, et pendant plusieurs années pour tenir compte de la variabilité climatique inter-annuelle.

Nous avons focalisé cette analyse sur trois questions :

- Certaines variétés, actuellement sélectionnées dans des conduites « intensives », permettent-elles une production d'orge respectant le cahier des charges brassicole en situation de stress azoté et de maladie ?
- Quelles synergies ou antagonismes entre critères quantitatif et qualitatif de la production pour des conduites économes en intrants ?
- Les essais menés en itinéraire technique conventionnel permettent-ils de repérer les meilleurs géotypes adaptés à des conduites culturales en bas niveau d'intrants ?

Ce travail fait l'objet du CHAPITRE 1 de la thèse et correspond à une publication prête pour soumission dans le journal *European journal agronomy (EJA)*. Cette publication est intitulée: « *Assessment of the yield and quality of malting barley genotypes in a low-input system in France* ».

### **3. Identification des caractéristiques variétales adaptées aux conduites économes en intrants**

Dans le réseau d'essais multi-local mis en place dans ce travail de thèse, les pressions maladies observées ont été très réduites : sur l'ensemble des environnements, moins de 5% des 3 dernières feuilles étaient atteintes par des maladies. Une analyse des notes de tolérances des variétés inscrites au catalogue officiel (données fournies par le GEVES) montre de plus que la diversité génotypique est relativement restreinte. Enfin, une étude (non présentée dans ce travail de thèse) a montré qu'il était difficile de directement prédire l'impact des tolérances variétales sur les pertes de rendement. Le travail de thèse s'est donc par la suite focalisé sur les problématiques de gestion de la fertilisation azotée plutôt que sur les questions de pression et tolérance aux maladies.

L'azote est un élément majeur affectant la production quantitative et qualitative de l'orge et les possibles pertes environnementales. Dans les conduites avec intrants réduits, la réduction de la quantité d'azote apportée à la culture doit être raisonnée de manière à réduire les impacts

environnementaux (réduction de la consommation d'énergie fossile utilisée pour produire l'engrais, et réduction des pertes gazeuses), en affectant le moins possible le rendement et les critères de qualité exigés. Comme l'ont montré *Loyce et al. (2008)*, entre autres, il est alors nécessaire de disposer de géotypes moins sensibles aux stress abiotiques pour maintenir une production quantitative et qualitative satisfaisante. Afin de permettre aux agriculteurs et aux sélectionneurs d'identifier les géotypes les moins sensibles aux stress azotés, il est important de les caractériser.

Cette identification des caractéristiques géotypiques favorables à une faible perte de production en situation de stress azoté peut d'abord être réalisée sur la variabilité génétique actuellement disponible. Les méthodes d'analyse des différences de performances des variétés vis-à-vis du milieu (IGE) se basant explicitement sur des caractéristiques géotypiques et une description du milieu par des index environnementaux ont régulièrement été utilisées dans la littérature pour identifier ce type de caractéristiques variétales. Nous avons basé cette partie sur les résultats du réseau expérimental multi-local.

Nous avons focalisé cette partie sur la question suivante :

- Quelles caractéristiques variétales, parmi les géotypes disponibles actuellement, permettent de minimiser les pertes de production quantitative et qualitative en orge brassicole en situation de stress azotés ?

Ce travail fait l'objet du CHAPITRE 2 de la thèse et correspond à une publication à soumettre dans le journal *European journal agronomy (EJA)*. Cette publication est intitulée: « *Which genotypic characteristics favor the maintenance of grain yield and quality performance in winter barley under nitrogen stress?* ».

#### **4. Développement d'un modèle pour simuler l'impact des caractéristiques variétales et de la conduite azotée dans une large gamme d'environnements**

Les réseaux d'essais multi-locaux, comme décrits dans la partie problématique, ne permettent de tester qu'une partie des combinaisons géotype – conduite culturale potentiellement intéressantes pour la production d'orge brassicole économe en intrants. En effet, d'autres caractéristiques des géotypes ou des conduites azotées, non prises en compte ou non analysées dans les réseaux expérimentaux, peuvent être intéressantes pour maintenir une production quantitative et qualitative élevées d'orge brassicole. De plus, dû au faible nombre de lieux et d'années expérimentés, les réseaux d'essais multi-locaux ne couvrent qu'une petite partie des conditions climatiques susceptibles d'intervenir dans le bassin de production de l'orge brassicole. Or, les performances des géotypes varient fortement suivant les conditions climatiques de l'année. Les résultats expérimentaux sont donc parfois difficilement extrapolables à d'autres conditions pédoclimatiques non testées.

Les modèles de culture permettent, au contraire, de tester rapidement un très grand nombre de combinaisons géotype X conduite culturale, au sein d'une large diversité de conditions pédoclimatiques. De nombreux modèles de culture ont été développés pour prédire le rendement des

céréales. En plus des caractéristiques générales que les modèles de culture doivent présenter pour être utilisés à des fins d'idéotypage, dans ce travail appliqué à l'orge brassicole, nous nous sommes fixés les critères suivants pour choisir le modèle à utiliser/développer : i) modèle relativement simple en terme de formalismes et de nombre de paramètres (pour pouvoir être mis au point et utilisé rapidement), ii) une bonne capacité prédictive de ce dernier pour les variables rendement, teneur en protéines et calibrage, iii) des paramètres génotypiques, mesurables facilement par les sélectionneurs, et interprétables en terme fonctionnel, iv) une expertise scientifique à disposition au sein de l'équipe de recherche dans laquelle se déroule le projet. Nous n'avons pas identifié de modèle répondant à l'ensemble de ces critères. Par exemple, aucun modèle de culture disponible dans la littérature ne prédit la teneur en protéine, le calibrage des grains et le rendement en fonction de diverses conditions de stress azoté.

Le modèle de culture Azodyn répondait à plusieurs critères cités plus haut, même si, au début du projet de recherche, il n'était pas disponible pour l'orge et ne prédisait pas le calibrage des grains. Disponible sur blé, Azodyn présente une qualité de prédiction des principales variables de production quantitative et qualitative tout à fait satisfaisante (Barbottin et al., 2006b; David et al., 2005). Les paramètres génotypiques sont, pour la plupart, basés directement sur des variables mesurées directement dans les essais expérimentaux, ce qui facilite leur acquisition et leur interprétation. De plus, une expertise scientifique et technique est disponible au sein de l'unité de recherche ou à proximité pour le développement et l'utilisation de ce modèle. Une étape d'adaptation du modèle Azodyn pour répondre aux objectifs fixés dans ce travail a donc été nécessaire.

Nous avons focalisé cette partie sur les trois questions suivantes :

- Quels paramètres du modèle de culture Azodyn-blé sont à adapter pour prédire le rendement et la teneur en protéines des orges brassicoles ?
- Comment intégrer au modèle Azodyn un formalisme pour prédire la taille des grains ?
- Quelle qualité prédictive et quelle capacité de classement permet le modèle de culture Azodyn-orge dans une diversité d'environnements et de situations de nutrition azotée ?

Ce travail fait l'objet du CHAPITRE 3 de la thèse et correspond à une publication soumise en Aout 2017 dans le journal *Agricultural and Forest Meteorology*. Cette publication est intitulée: « *Azodyn-Barley, a winter-barley crop model for predicting and ranking genotypic yield, grain protein and grain size in contrasting pedoclimatic conditions* ».

### **5. Structuration des environnements de production de l'orge en fonction des facteurs climatiques impactant la production**

Afin de garantir une production quantitative et qualitative satisfaisante dans l'ensemble du bassin de production, la définition des idéotypes variétaux et culturaux doit tenir compte de la diversité des conditions environnementales dans lesquelles ils sont insérés. Par exemple, les performances des

génotypes varient fortement suivant les conditions climatiques. De même, l'effet de la fertilisation azotée est très dépendant du climat. La caractérisation des stress environnementaux subis par l'orge selon les lieux et les années de culture, et la caractérisation de groupes d'environnements, homogènes du point de vue des stress climatiques rencontrés, permettent d'analyser précisément les IGE. Pour la modélisation, cette caractérisation permet, par exemple, d'analyser l'intérêt d'une adaptation des génotypes ou des conduites azotées aux différents environnements cibles, ou au contraire une adaptation globale de ces derniers à l'ensemble du bassin de production. Une caractérisation précise des TPE permet donc *a priori* d'optimiser le triptyque génotype - conduite culturale – pédoclimat.

Comme mentionné dans la partie problématique, aucune caractérisation, à une échelle fine et se basant sur une diversité de stress impactant la production n'est actuellement disponible dans la littérature pour la zone de production brassicole. Afin de définir le plus précisément les idéotypes variétaux et culturaux au sein des environnements cibles de production de l'orge brassicole, il apparaît intéressant et utile de caractériser et de classifier les combinaisons des principaux facteurs climatiques impactant la production.

Nous avons focalisé cette partie sur les deux questions suivantes :

- Quelles sont les combinaisons de facteurs climatiques impactant le rendement de l'orge dans le bassin de production ?
- Comment se structurent les départements suivant la fréquence d'occurrence des différentes combinaisons de stress climatiques impactant le rendement ?

Ce travail fait l'objet du CHAPITRE 4 de la thèse et correspond à une publication soumise en Juin 2017 dans le journal *Agricultural and Forest meteorology*. Cette publication est intitulée: « *Characterization of spatial and temporal combinations of climatic factors affecting yields: an empirical model applied to the French barley belt* ».

## **6. Identification des caractéristiques des conduites azotées économes dans la diversité des environnements de production**

La fertilisation azotée est un élément clé pour garantir un rendement élevé, et des caractéristiques des grains répondant aux critères brassicoles. Par ailleurs, les stratégies optimales de fertilisation azotée sont très dépendantes des conditions climatiques. L'expérimentation menée dans cette thèse n'a permis de tester qu'une seule stratégie de fertilisation azotée pour des conduites à bas niveau d'intrants. De plus, peu de connaissances diffusées sont actuellement disponibles sur les conduites azotées économes, favorables à l'obtention d'une production quantitative et qualitative élevée en orge. D'autres stratégies de fertilisation azotée, différant de part le nombre d'apports, le fractionnement ou la dose totale d'engrais azotée pourraient permettre d'atteindre une production quantitative et qualitative élevée en orge brassicole en fonction des conditions météorologiques.

Nous avons focalisé cette partie sur les deux questions suivantes :

- Quelles stratégies de fertilisation azotée permettent de répondre aux critères brassicoles et d'atteindre un rendement élevé en orge, tout en minimisant les pertes d'azote vers l'environnement ?
- Les stratégies de fertilisation maximisant le rendement et les critères brassicoles sont-elles à adapter en fonction des environnements de production (structurés au chapitre précédent) ?

Ce travail fait l'objet du CHAPITRE 5 de la thèse et correspond à une publication prête pour soumission dans le journal *nutrient cycling in agroecosystems*. Cette publication est intitulée: « *Model-based design of Nitrogen management strategies to reduce N losses and reach high yield and grain quality in the French barley belt* ».

#### **7. Identifier les combinaisons de caractéristiques variétales et des conduites azotées économes les plus favorables à une production d'orge d'hiver 6 rangs brassicole dans la diversité des environnements de production**

Dans les parties précédentes, les caractéristiques des génotypes, de la conduite azotée économe, et les facteurs climatiques impactant le rendement de l'orge ont été identifiés indépendamment les uns des autres. Une analyse conjointe de ces caractéristiques est nécessaire pour définir les idéotypes variétaux et culturaux cohérents et adaptés aux différents environnements de production.

Dans ce but, nous avons utilisé un modèle de culture pour tester de nouvelles combinaisons de caractéristiques, formant ainsi des génotypes virtuels, et des fertilisations azotées économes identifiées dans le chapitre précédent, au sein d'une large gamme de conditions pédoclimatiques de la zone de production brassicole.

Nous avons focalisé cette partie sur les deux questions suivantes :

- Quelles combinaisons de caractéristiques phénotypiques permettent d'atteindre un rendement élevé, et de répondre aux critères brassicoles dans la diversité des environnements de production de l'orge brassicole en situation d'intrant réduits ?
- Une adaptation locale des caractéristiques des génotypes est-elle nécessaire pour la production quantitative et qualitative comparativement à une adaptation des génotypes à l'ensemble du bassin de production ?

Ce travail fait l'objet du CHAPITRE 6 de la thèse et est intitulé: « *Combinations of genotypic traits for a high quantitative and qualitative malting barley production in low-N situations: model-based design in the French barley belt* ».

## 8. Discussion générale

Ce travail a pour objectif de : i) étudier les performances de production (quantité et qualité) de variétés d'orge d'hiver brassicole 6 rangs dans des conduites révélatrices des stress rencontrés en bas niveau d'intrants, ii) concevoir et iii) évaluer des idéotypes variétaux et culturaux permettant d'atteindre les objectifs de production quantitative et qualitative en situation d'itinéraire technique à bas niveau d'intrants, dans une diversité de milieux.

Différentes approches ont été utilisées au cours de ce travail de thèse (expérimentation et analyses statistiques, modélisation mécaniste et analyse de base de données) présentant chacune des limites méthodologiques et apportant des éléments de réponses partiels aux objectifs globaux que nous nous sommes fixés. Le CHAPITRE 7 se propose de faire la synthèse et une analyse critique transversale des résultats produits et des méthodes employées.

Nous avons focalisé cette partie sur les deux analyses suivantes :

- La production d'orge brassicole en conditions d'intrant réduit est-elle envisageable actuellement pour les agriculteurs ? Quelles sont les caractéristiques des itinéraires techniques avec intrants réduits à développer en orge brassicole ?
- Quelles sont les perspectives et futures recherches pour le développement des itinéraires avec recours réduits aux intrants ?
- Quels ont été les concepts et les connaissances mobilisés pour définir la méthode de conception d'idéotype utilisée pendant la thèse ? Quelle en est l'originalité par rapport aux méthodes existantes, les principales limites et les pistes d'améliorations envisageables ?
- Quelles ont été les limites globales de la démarche d'idéotypage et quelles propositions d'amélioration peut-on formuler ?

## MATERIEL ET METHODES

L'objectif de cette partie est de présenter globalement le matériel et les méthodes mis en œuvre dans ce travail de thèse. Une description fine du matériel et méthode est effectuée dans chacun des 6 chapitres de la thèse.

### 9. Un réseau d'expérimentation multi-local

#### 9.1. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été mené sur 7 sites dans le nord de la France en 2013-2014 et 2014-2015 (Figure 15). Deux sites-année n'ont pas été retenus pour les analyses pour des problèmes d'implantation de la culture et d'hétérogénéité des parcelles. Les sites expérimentaux recouvrent les principales zones de production de l'orge brassicole et les différents types de climat et de type de sols en France. L'expérimentation a été menée sur des parcelles agriculteur. La mise en place des essais, les opérations culturales et le suivi de ces derniers ont été effectués en collaboration entre les agriculteurs, les sélectionneurs impliqués dans le projet et l'INRA.

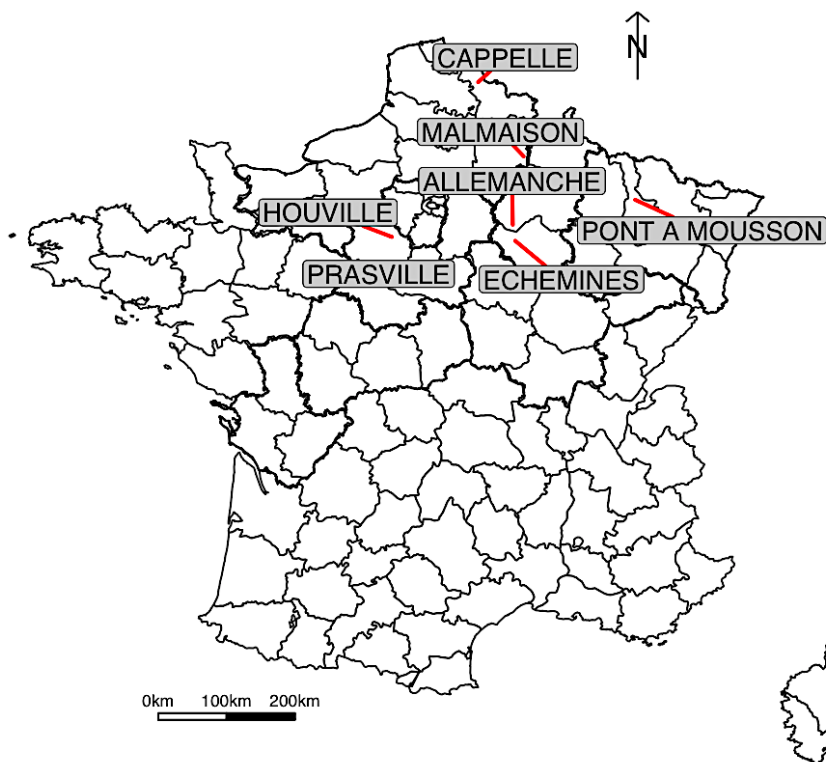
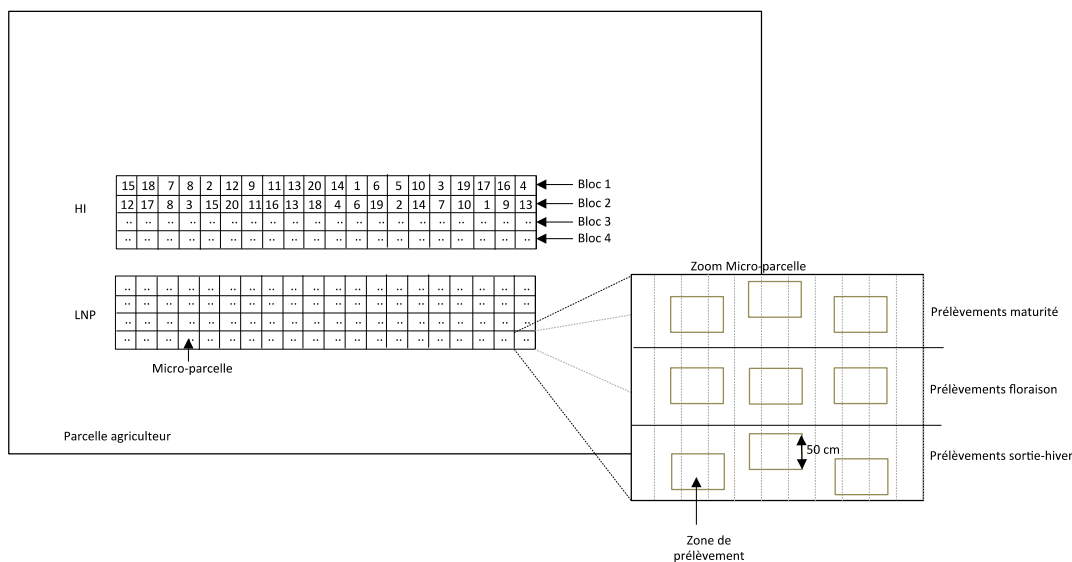


Figure 15. Localisation géographique des sites expérimentaux



Pour chaque site-année, deux facteurs ont été étudiés : la conduite culturale (comportant 2 modalités) et les génotypes (comportant 20 modalités). Chaque conduite culturale comportait 4 blocs contigus (Figure 16). Les 20 génotypes ont été répartis aléatoirement au sein des blocs. Les microparcelles mesuraient entre 9 à 15m<sup>2</sup> suivant le site et l'année.

Les 20 génotypes étaient composés de 4 variétés d'orge d'hiver 6 rang inscrites et 16 génotypes d'orge d'hiver 6 rang en cours de sélection (en dernière ou avant dernière année d'expérimentations avant un potentiel dépôt par les sélectionneurs en vue d'une inscription au catalogue officiel). Les 20 génotypes et variétés proviennent de 3 entreprises de sélection (Secobra, Florimond Desprez et KWS-Momont) et ont été choisis par les sélectionneurs orge associés au projet de recherche<sup>14</sup> pour leur diversité génétique vis-à-vis de la réduction d'intrants selon leur expertise.



**Figure 16.** Exemple de dispositif expérimental. Les conduites culturales HI (pour High Input) et LNP (pour Low-Nitrogen and Pesticides) comportent chacune 4 blocs. Les variétés (numéros) sont aléatoirement réparties au sein des blocs. L'encart représente le détail des zones de prélèvement pour une microparcelle.

Deux conduites culturales ont été testées. La première a été définie suivant les recommandations locales pour un itinéraire technique conventionnel (sera nommée HI dans les chapitres suivants, pour High inputs). La quantité d'azote apportée (appelée X) a été ajustée suivant la méthode du bilan (Rémy et Hébert, 1977). La fertilisation azotée a été fractionnée en 2 apports : un tiers de la dose totale à la sortie de l'hiver (approx. GS 26 -Zadoks et al., 1974), et le reste au stade « épi 1 cm » (GS 30). Un régulateur de croissance a été appliqué à début montaison pour éviter les risques de verse. Un ou deux traitements fongicides (suivant les sites) ont été appliqués si des risques de maladies ont été identifiés. La seconde conduite culturale a été choisie pour induire des stress pour l'azote et les maladies, afin de

<sup>14</sup> Claire Perrot (Florimond-Desprez) et Jean François Herbonomez (KWS-Momont)

maximiser les différences de comportement des génotypes (Calhoun et al., 1994). Elle sera appelée LNP (pour Low Nitrogen and Pesticides). La dose totale d'azote a été réduite de 30 % aux deux apports par rapport à la dose du système HNI. Aucun régulateur de croissance, ni fongicide n'a été appliqué. Cependant, pour les 12 sites X années, la note de maladie maximale enregistrée par les notateurs ne dépassait pas 3 sur une échelle de notation GEVES (maximum de 9). Cela signifie que moins de 5% de la surface foliaire était impactée par les maladies. La densité de semis était équivalente à celle utilisée en conduite culturale HNI. Pour les deux conduites culturales, les plantes étaient totalement protégées contre les adventices pour éviter de créer de l'hétérogénéité inter ou intra-plot.

### 9.2. Mesures et notations sur les plantes

Le rendement et ses composantes, l'intensité de la verse ont été mesurés sur chacun des génotypes, au sein de 3 répétitions des deux conduites culturales. L'intensité des maladies a été mesurée sur chacun des génotypes, au sein de 3 répétitions de la conduite culturale LNP. Le rendement en grains a été mesuré lorsque l'ensemble des microparcelles d'une conduite culturale était mature (déterminé par le jaunissement du col de l'épillet). Les proportions de grains avec une taille supérieure à 2.5 mm ont été mesurées à l'aide d'un sortimat (Pfeuffer GmbH). L'intensité de la verse a été notée, un mois avant récolte environ avec une échelle semi-quantitative allant de 1 (pas de verse) à 9 (orge totalement versée). L'humidité des grains a été mesurée par spectrométrie proche infra-rouge (NIRS). Les rendements en grains ont été reportés à une humidité standard de 0.14 g H<sub>2</sub>O g<sup>-1</sup>.

À la sortie de l'hiver et à floraison, sur la quatrième répétition, les parties aériennes des plantes ont été prélevées sur trois placettes (2 rangs x 0.50m chacune) au sein de chaque microparcelle, pesées puis rassemblées. Le nombre de plantes et le nombre d'épis par placette ont été déterminés, respectivement à la sortie d'hiver et à floraison. À maturité, trois bottillons d'au moins 30 tiges ont été prélevés puis rassemblés. Le poids de la paille, des grains et le poids de 1000 grains ont été mesurés. Pour les trois stades mentionnés, le matériel végétal a été séché à l'étuve (80°C-48 heures) et pesé, puis trois placettes ont été regroupées et broyées en fines particules (<1mm). La teneur en azote des parties aériennes a été déterminée par la méthode DUMAS, qui consiste en une combustion des tissus végétaux à 1800°C, la réduction des oxydes d'azote par du CU à 600°C et l'analyse du N<sub>2</sub> par catharométrie (Carlo Erba NA 1500 Analyser). La teneur en protéines a été obtenue en multipliant la concentration en azote des grains par un facteur de 5,7.

### 9.3. Variables climatiques

Afin de caractériser les sites expérimentaux, cinq variables climatiques journalières (températures minimales et maximales en °C, précipitations et évapotranspiration potentielle (Penman) en mm, et rayonnement global en kJ m<sup>-2</sup>) ont été obtenues grâce aux données météoFrance (accessible par convention INRA-météoFrance) et agroclim (<https://www6.paca.inra.fr/agroclim/Les-outils>).

Les stations ont été choisies, pour chacune des variables climatiques, en fonction de leur distance par rapport aux sites expérimentaux (Table 3).

**Table 3.** Distance entre station météorologique et site expérimentaux pour chacune des 4 variables analysées.

	Température minimum et maximum	ETP	Rayonnement
CAPPELLE	<10km	<10km	<10km
ALLEMANCHE	<12km	<12km	<40km
MALMAISON	<10km	<10km	<35km
HOUVILLE	<12km	<12km	<12km
PRAVILLE	<10km	<10km	<22km
ECHEMINES	<12km	<12km	<22km
PONT A MOUSSON	<30km	<25km	<30km

### 10. Base de données des rendements moyens départementaux des orges d'hiver entre 1989 et 2013

Une base de données des rendements des orges d'hiver, mesurés à l'échelle départementale de 1989 à 2013, a été constituée. Ces données proviennent du Ministère de l'Agriculture (AGRESTE, 2015 - <http://agreste.agriculture.gouv.fr>). Ces statistiques agricoles annuelles (SAA) sont obtenues par synthèse des données provenant des services régionaux de l'information statistique et économique (SRISE) au sein des Directions régionales de l'agriculture et de la forêt. Ces services régionaux disposent de diverses enquêtes statistiques, parfois exhaustives, mais le plus souvent par sondages aléatoires fondés sur des échantillons représentatifs en utilisant des réseaux d'enquêteurs spécialisés. Ces services disposent également d'évaluations de correspondants et d'experts ainsi que de données chiffrées fournies par les organismes techniques professionnels.

Pour l'orge, la base de données ne distingue pas les orges à vocation brassicole et celles à vocation fourragère. Les rendements sont spécifiés pour l'orge avec une humidité de 15%. Ce dernier est estimé par un « *rendement arrivé ferme* », c'est-à-dire que les pertes sur le champ et en cours de transfert jusqu'à la ferme (ou à l'organisme stockeur si la récolte y est livrée directement), les pertes enregistrées au moment du conditionnement ou du triage sont ne pas intégrées.

### 11. Base de données sur les principales variables climatiques (moyennes départementales) entre 1989 et 2013

Une base de données comportant les valeurs journalières de 6 variables climatiques (température minimale et maximale (°C), pluie et évapotranspiration (mm Jour<sup>-1</sup>), rayonnement global (MJ m<sup>-2</sup>) et déficit de pression vapeur (hPa)) de 1989 à 2013 et pour les 35 principaux départements producteurs d'orge brassicole a été constitué.

Ces données proviennent du Joint Research Center (European commission, DG, JRC - <http://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx>). Le JRC collecte quotidiennement des données

issues de plus de 4200 stations météorologiques à travers l'Europe. Une interpolation des données issues de stations météorologiques sur une grille régulière de 25 km est ensuite réalisée sur la base d'une méthodologie définie par Beek, (1991) et Van der Voet et al., (1994). Plus de détails sont disponibles à l'adresse suivante : [http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/agri4castwiki/index.php/Weather\\_Monitoring#Interpolation](http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/agri4castwiki/index.php/Weather_Monitoring#Interpolation)

### **12. Base de données sur les principales caractéristiques des sols (moyenne départementale) entre 1989 et 2013**

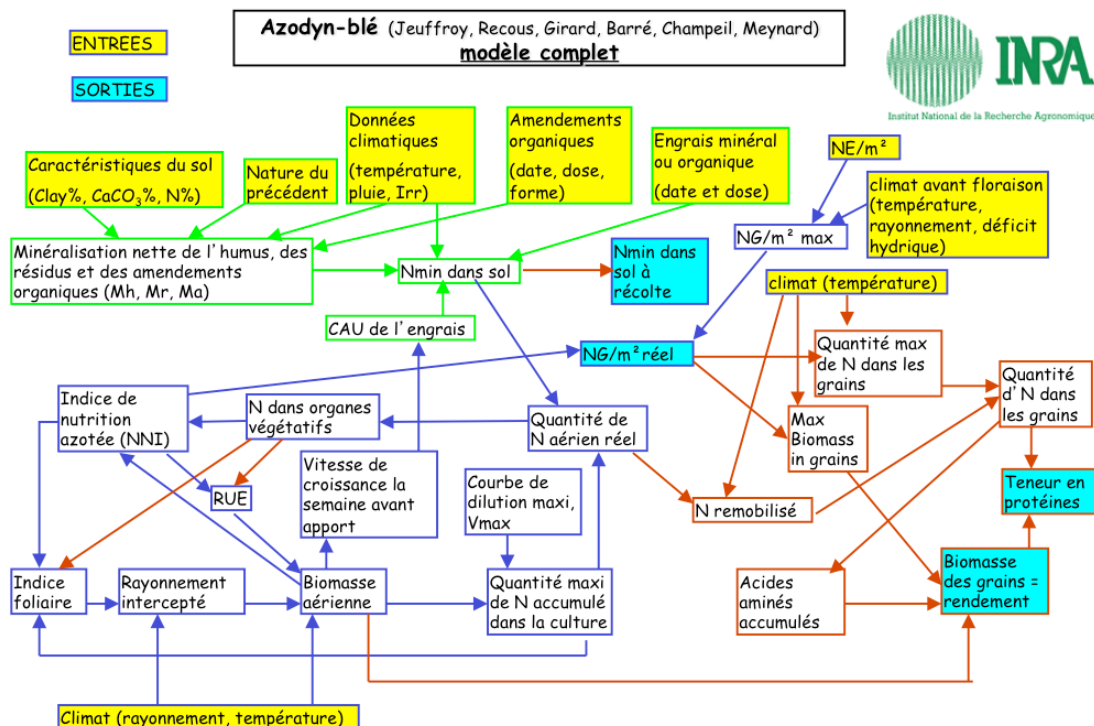
Six caractéristiques de sols (teneur en eau à la capacité au champ, teneur en argile, teneur en calcaire, la teneur en azote organique des sols, la densité apparente et la profondeur racinaire maximum) ont été obtenues à partir d'une base de données européenne de caractéristique des sols (European Soil Database Derived data –ESBD- disponible à l'adresse suivante [http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/ESDBv2/index.htm](http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDBv2/index.htm)). Cette base de données regroupe les principales caractéristiques des sols pour une couche de sols superficielle et une en profondeur. Elle a été construite à partir de données provenant du Harmonized World Soil Database (HWSD) et du Soil-Terrain Database (SOTER) (Hiederer, 2013).

Par exemple, la texture du sol provient d'information du Harmonized World Soil Database (HWSD) V.1.2.1. La profondeur de sol est considérée comme la profondeur sans obstacle pour les racines.

Les caractéristiques de sols étaient disponibles à une échelle de 1/1 000 000. Chaque information a été associée à un département, puis les caractéristiques de sol ont été moyennées par département. La teneur en argile, calcaire et azote organique considérés dans les chapitres suivant sont les moyennes des valeurs pour les deux couches de sols renseignées dans la base de données.

### **13. Modèle de culture utilisé**

Azodyn est un modèle de culture développé initialement par Jeuffroy et Recous, (1999), et a été utilisé comme outil de raisonnement de techniques culturales (notamment fertilisation azotée, choix variétal et dates de semis) ou de prédiction de la production (quantitative et qualitative), en fonction des techniques culturales appliquées et du climat (Figure 17). Il modélise la biomasse et le bilan azoté de la culture à un pas de temps journalier de la sortie-hiver jusqu'à la récolte, à partir de variables d'entrées climatiques (rayonnement, température minimale, température maximale, pluie, évapotranspiration), des caractéristiques du sol (reliquats azotés, azote non disponible, taux d'argile, taux de calcaire, profondeur racinaire maximale, caractéristiques hydriques des sols), des apports azotés organiques et minéraux et des dates de réalisation des stades de la culture. Une présentation plus détaillée des formalismes du modèle est disponible dans le CHAPITRE 3.



**Figure 17.** Présentation schématique du modèle de culture Azodyn-blé (version Excel). Les entrées du modèle sont représentées en fond jaune, les sorties en fond bleu. Les variables simulées avant floraison sont encadrées en bleu, celles simulées après floraison sont encadrées en rouge. NG : Nombre de grains, NE : Nombre d'épis, RUE : Efficience d'utilisation du rayonnement.

Sur blé, deux versions du modèle de culture étaient disponibles : une version Excel validée et utilisée pour des productions scientifiques et une version sous la plateforme de modélisation RECORD (Bergez et al., 2013), mais non validée. Dans le cadre de ce travail, la plateforme de modélisation RECORD présentait plusieurs avantages directs :

- (i) Temps de simulation beaucoup plus faible qu'avec Excel pour les jeux de données importants grâce à l'accès aux serveurs de simulations
- (ii) Possibilité de modulariser le modèle et ainsi d'évaluer et de faire évoluer chacun des sous-modules du modèle
- (iii) Accès à une bibliothèque d'outils d'analyse des modèles (pour l'analyse de sensibilité, l'exploration des résultats de simulation, ...)
- (iv) interfaçage avec R possible, et donc gestion et analyse des données facilitées

Le travail de modélisation dans ce travail de thèse a donc été réalisé en utilisant le modèle de culture Azodyn et la plateforme de modélisation RECORD.

# **Évaluation de la production quantitative et qualitative des génotypes actuels d'orge brassicole dans des conduites économes en intrants**

*« Osez ; le progrès est à ce prix »*

*Victor Hugo*



## Résumé

Engager les systèmes agricoles vers plus de durabilité et notamment réduire l'utilisation des intrants de synthèse nécessite de reconcevoir de nouveaux itinéraires techniques. Les génotypes sont des éléments clés de l'adaptation des itinéraires techniques aux caractéristiques du milieu et au niveau d'intensification des conduites culturales. En France, cependant, les génotypes sont presque exclusivement sélectionnés et développés pour des systèmes intensifs en intrants. La capacité des génotypes actuels à atteindre une production élevée tout en répondant aux différents critères de qualité souhaités par les filières est primordiale pour développer des itinéraires techniques à plus bas niveau d'intrants. Pour répondre aux exigences des collecteurs, des malteurs et des brasseurs, la teneur en protéines des grains d'orge doit être comprise entre 9.5% et 11.5% et plus de 90% des grains doivent avoir une taille supérieure à 2.5 mm (calibrage).

Ce premier chapitre se focalise sur les deux questions suivantes:

- Les variétés, actuellement sélectionnées dans des conduites « intensives », permettent-elles une production d'orge respectant le cahier des charges brassicole en situation de conduite technique à faibles intrants (réduction de la fertilisation azotée, suppression des fongicides et régulateurs de croissance) ?
- Les essais menés avec des conduites intensives en intrants permettent-ils de repérer les génotypes adaptés à des conduites culturales en bas niveau d'intrants ?

Sur la base d'un réseau d'essais, mené sur deux années (de 2013 à 2015) et comprenant 12 sites, les performances quantitatives et qualitatives de 20 génotypes d'orge d'hiver ont été comparées en haut niveau d'intrants (HI- *High Input*) et bas niveau d'intrants (LNP-*Low nitrogen and no pesticide*).

Les génotypes présentaient un rendement moyen inférieur de 17% pour le système LNP par rapport au HI. En moyenne sur les 20 génotypes, les seuils de teneur en protéines étaient respectés dans 2 essais pour le système LNP et 4 essais pour le système HI. Le calibrage moyen des grains (moyenne 20 génotypes) dépassait le seuil de calibrage dans 6 essais LNP et 8 essais HI. La capacité à respecter les spécifications pour la teneur en protéines doit donc être spécifiquement améliorée pour le système LNP. La variance de la teneur en protéine était plus largement expliquée par l'itinéraire technique que par les génotypes. Les stratégies de fertilisation semblent donc un moyen privilégié pour améliorer la capacité des systèmes à bas niveau d'intrants à respecter l'intervalle de teneur en protéines pour la filière brassicole.

La capacité des génotypes à répondre aux critères brassicoles était significativement corrélée entre les deux systèmes. Certains génotypes avec un rendement relativement faible en HI par rapport à la moyenne des autres génotypes, obtenaient cependant des rendements élevés en LNP par rapport à la moyenne des génotypes. De plus, dans le système LNP, la capacité des génotypes à répondre aux critères de qualité brassicole n'étaient pas corrélée au rendement, ce qui laisse penser que les deux critères pourront être améliorés simultanément.



Sur l'ensemble des situations testées, 6 génotypes présentaient simultanément un rendement et une qualité brassicole plus élevés que la moyenne des 20 génotypes dans le système LNP. Parmi ces derniers, un seul répondait à ces caractéristiques pour le système HI. Une évaluation des génotypes en HI ne permet donc pas d'identifier l'ensemble des génotypes avec des fortes performances quantitatives et qualitatives en LNP.

***Messages clés:***

- La capacité à respecter les spécifications brassicoles de teneur en protéines doit être spécifiquement améliorée pour le système LNP
- Les stratégies de fertilisation azotée semblent être un levier déterminant en LNP pour améliorer la teneur en protéines
- Certains génotypes avec un rendement plus faible que la moyenne en HI obtenaient un rendement plus élevé que la moyenne en LNP
- Les essais menés en HI ne permet pas d'identifier l'ensemble des génotypes avec des performances quantitative et qualitative élevées en LNP.

***Mots-clés:***

*Hordeum vulgare L.* Bas niveau d'intrants, qualité brassicole, teneur en protéines, calibrage

## Assessment of the yield and quality of malting barley genotypes in a low-input system in France

Damien Beillouin<sup>a,b,\*</sup>, Marie-Hélène Jeuffroy<sup>a</sup>, Jean-François Herbonomez<sup>c</sup>, Claire Perrot<sup>b</sup>, Arnaud Gauffreteau<sup>a</sup>

<sup>a</sup> UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>b</sup> Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, 59242 Cappelle-en-Pévèle, France

<sup>c</sup> KWS Momont, 7 Rue de Martinval, 59246 Mons-en-Pévèle, France

\*Corresponding author.

E-mail address: damien.beillouin@inra.fr

### Abstract

Most of the genotypes grown in developed countries are bred in high-input systems. The capacity of genotypes bred in such systems to produce high yields and fulfill several quality criteria simultaneously in low-input system is unclear. Our aims were to assess i) the capacity of various 6-rows barley genotypes to achieve high grain yield and malting specifications in low-input conditions relative to high-input conditions, and ii) the possibility of identifying the best genotypes for low-input systems from the results of trials in high-input conditions. Our aims were to assess i) the capacity of various genotypes to achieve high grain yield and malting specifications in low-input conditions relative to high-input conditions, and ii) the possibility of identifying the best genotypes for low-input systems from the results of trials in high-input conditions.

From 2013 to 2015, 12 trials were conducted with 20 winter malting barley genotypes in both high-input (HI) and low-nitrogen and no-pesticide (LNP) systems. Quantitative and qualitative production was evaluated in three replicates for each genotype and each environment.

Mean yield was 17% lower for the LNP than for the HI system. Grain protein content met malting specifications in two trials for the LNP system and eight for the HI system, and grain retention fraction met malting specifications in four trials for the LNP system and six for the HI system. Specific improvements in the capacity of LNP systems to achieve grain protein content are therefore required. The probabilities of a genotype fulfilling the two malting criteria were significantly correlated between the two systems. However, these indicators were not significantly correlated with yield in the LNP system, and some genotypes with low yields in the HI system had high yields in the LNP system. Six genotypes had above- group mean yields and malting qualities in the LNP system. Only one of these genotypes also had above-average yields and malting qualities in the HI system. Thus, it was not possible to identify all the best genotypes for reduced-input systems from the results of HI trials.

### **Highlights**

- The capacity of genotypes to achieve grain protein contents malting thresholds must be improved in low-input systems
- Nitrogen management strategies for low-input barley production need to be improved
- Some genotypes with low yields in HI systems have high yields in low-input systems
- High-input trials are poorly informative for identifying all the genotypes with the highest yields and malting qualities in low-input systems.

### **Keywords**

Malting quality;

Grain protein content;

Grain retention fraction;

Multi-criteria assessment;

### **Abbreviation**

HI: High-input

LNP: Low-nitrogen and no-pesticide

GPC: Grain protein content

RF: Retention fraction

## 1. Introduction

France is the largest European producer of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) and the leading exporter of malt worldwide, accounting for 20% of world trade. French barley production (mainly 6-rows malting varieties) has relied heavily on the use of synthetic inputs: the mean rate of mineral N applications in farmers' fields reached 129 kg.ha<sup>-1</sup> in 2014 (Agreste, 2016), and the treatment frequency index, an indicator of the intensity of pesticide use, reaching 4.2 (Agreste, 2016). This use of large amounts of synthetic inputs on arable crops has led to considerable environmental damage (MEA, 2005; Pretty et al., 2000; Tilman, 1999).

Alternative crop management methods have been developed to decrease significantly the amounts of nitrogen and pesticides used (Hossard et al., 2016). These practices are encouraged by various European policies (e.g. European Commission, 2009). Provided that appropriate genotypes are grown, similar profitability can be achieved for low-input and conventional systems (Loyce et al., 2008, 2012 on wheat). Yield losses due to disease and N deficiency are indeed greatly reduced by the use of genotypes highly tolerant to biotic and abiotic stresses (Lammerts van Bueren et al., 2011; Loyce et al., 2008). For malting barley, several criteria other than yield must be met simultaneously, to ensure the regularity and profitability of the malting and brewing processes and for the farmers to get premium prices. Maximizing the proportion of environments in which genotypes reach the target range for both grain protein content and retention fraction is a key task in malting barley production (Bertholdsson, 1999; Ceccarelli et al., 1994; Kaczmarek et al., 1999). In France, grain protein content must be in the 9.5%-11.5% range and more than 90% of the grains must be more than 2.5 mm large (Incograin, 2014). Increasing the calibrated yield (yield with grains > 2.5 mm large) is also an advantage for farmers, as they receive premium prices for the proportion of their yields satisfying the grain size requirement.

The antagonism between yield and malting quality could make it difficult to achieve high yields and malting quality simultaneously. For example, increasing N fertilizer rates generally increases yield and protein concentration, but could reduce grain size (O'Donovan et al., 2011). Moreover, it may be difficult to achieve high yields and high quality in a low-input system with genotypes bred in high-input conditions. The genotypes in current use were indeed developed and evaluated in high-input systems, in which the environment is standardized by the use of chemical inputs (Ceccarelli, 1994; Dawson et al., 2008; Wortman et al., 2013). The identification of barley genotypes with high yields and high malting quality in low-input systems could be a major issue. The genotypes currently available may not be adapted to low-input systems as both malting quality and grain yield are highly sensitive to management practices and N fertilizer applications (McKenzie et al., 2005; O'Donovan et al., 2011). Farmers are, thus, currently faced with having to choose from cultivars bred in high-input systems for cultivation in low-input environments.

A number of authors have argued that increasing yield potential in high-input environments also leads to an increase in yield in situations in which the potential yield is lower (*Richards, 2000; Slafer et al., 2005; Slafer and Araus, 2007; Fischer and Edmeades, 2010*). It has been suggested that the cultivars with the highest yields use the available resources more efficiently and, therefore, regularly outyield other genotypes at other input levels (*Calderini and Slafer, 1999; van Wart et al., 2013*). *Ogushi et al. (2002)* also showed that high-quality malting genotypes could be bred on the basis of their malting data when grown in another, contrasting environment. By contrast, other studies have shown that the breeding and evaluation of genotypes in high-input environments does not lead to identification of the best genotypes for environments with reduced inputs. According to *Ceccarelli et al. (1996)*, genotypes adapted to severe stress are less likely to reach high performances in high-input environments. *Brancourt-Hulmel et al. (2005)* showed that, in maize, indirect selection under high N conditions for performance in low N conditions became increasingly inefficient with increasing N stress. *Le Champion et al. (2014)* concluded, from an analysis of multi-environment trials in France, that wheat grain quality in organic systems may be difficult to predict from the results obtained in a conventional system.

Little is known about the impact of management practices on both quantitative and qualitative aspects of winter barley production and the capacity of genotypes to fulfill industrial requirements. Most of the studies have indeed analyzed the performance of cereal genotypes in environments different from those in which they were bred, but most of these studies have evaluated a single criterion. Our aims were i) to compare the mean grain yield and the mean probability of various barley genotypes meeting malting specifications, in high-input environments and environments subject to N and biotic stresses, ii) to assess the feasibility of identifying the best genotypes in low-input systems on the basis of trials conducted in high-input systems.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Experimental design

Twelve field trials were conducted over two seasons (2013-2014 and 2014-2015), at seven sites in northern France. Site-year combinations were considered as separate environments. The 12 environments studied were chosen so as to cover a broad range of soil types and climatic conditions (Table 1.1). Mean global radiation ranged from 9.4 to 10.6 MJ m<sup>-2</sup>. Mean rainfall ranged from 402 to 628 mm, and mean evapotranspiration ranged from 384 to 508 mm. Estimated soil water content at field capacity ranged from 108 mm to 198 mm. Initial N content ranged from 19 to 161 kg N ha<sup>-1</sup>.

We compared a high-input (HI) system with low-nitrogen and no-pesticide (LNP) management. For each management system, 20 genotypes were randomized within 3 blocks. The plots were 7 to 9.8 m<sup>2</sup> in size. Winter barley was sown at the optimal date for each region, between 1<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> October, in both seasons. Sowing densities were similar for the two management systems (from 270 to 320 seeds.m<sup>-2</sup>, according to the site).

In the HI system, nitrogen fertilizer rates were adjusted by the balance-sheet method (Rémy and Hébert, 1977), on the basis of the expected yield in local agricultural conditions. The mean total amount of fertilizer applied was 160 kg N ha<sup>-1</sup> (range: 150 to 183 kg N ha<sup>-1</sup>) in 2013-2014, and 152 kg N ha<sup>-1</sup> (range: 130 to 180 kg N ha<sup>-1</sup>) in 2014-2015. The total amount of N fertilizer for the year was split into two applications, at the Zadoks 23 and Zadoks 30 stages. The crops were fully protected against diseases (1 or 2 fungicide treatments applied in each trial) and lodging (one growth regulator treatment). The LNP management involved the application of 30% less N fertilizer during the first and second applications (mean total decrease relative to the HI system: 47 kg N ha<sup>-1</sup>). In this system, no fungicide or growth regulator was applied. However, observed disease intensity was very low at all 12 experimental sites. Disease symptoms covered less than 20% of the leaf area on no more than 25% of the plants. Twenty six-row winter barley genotypes (4 registered cultivars and 16 breeding lines), provided by plant breeding companies, were grown at each site. The genotypes tested, which were in the last or penultimate year before registration, were chosen on the basis of their expected diversity with respect to growth in low-input conditions, according to the expert opinion of the breeders.

### 2.2. Field measurements

Plots were harvested with a small-plot harvester after physiological maturity in each management system. Grain water content and grain protein content were measured by infrared spectroscopy (NIRS; Technicon Infra-Analyser 400, Technicon Instruments Corporation, Tarrytown, NY, USA) on a subsample from each plot consisting of at least 150 g of grain. Grain yield was brought to a standard humidity of 0.14 g H<sub>2</sub>O g<sup>-1</sup>. The retention fraction (proportion of grains more than 2.5 mm large) was determined with a Sortimat (Pfeuffer GmbH). Grains were considered to be of malting quality if the retention fraction was over 90%, and the grain protein content was in the 9.5%-11.5% range. The

calibrated yield was calculated as the yield of grains more than 2.5 mm large.

### 2.3. Impacts of environment, crop management and genotype on barley performance

We quantified the relative effect of management and genotype on barley production, by performing a global analysis of variance. Five outputs were considered: yield, calibrated yield, grain protein content, retention fraction and agronomic malting quality (combination of grain protein content and retention fraction), through the following model:

$$Y_{ijkm} = \mu + G_i + E_j + M_k + EM_{jk} + GE_{ij} + GM_{ik} + GME_{jik} + R_m(EM_{jk}) + \varepsilon_{ijkm}$$

where  $\mu$  is the mean value of the genotype over all environments in the high-input management system,  $G_i$  is the effect of genotype  $i$  in the high-input management system,  $E_j$  is the effect of environment  $j$  in the high-input management system,  $M_k$  is the effect of low-input management relative to high-input management,  $EM_{jk}$  is the particular impact of the LNP management system in environment  $j$ ,  $GE_{ij}$  is the interaction between genotype  $i$  and environment  $j$  in the HI system,  $GM_{ik}$  is the particular response of genotype  $i$  to the LNP management system,  $GME_{jik}$  is the interaction between genotype  $i$ , environment  $j$  and LNP management,  $R_m(EM_{jk})$  is the effect of block  $k$  nested in environment  $j$  and Management  $k$ , and  $\varepsilon_{ijkm}$  is the residual effects.

For each environment, the proportion of genotypes fulfilling the criteria for the malt trade (Incograin, 2014), in terms of grain protein content, retention fraction and agronomic malting quality, was calculated. Similar calculations were made for each genotype for the 12 environments, for each management system.

### 2.4. Direct identification of the best genotypes in the LNP system and indirect identification from HI experiments

For each management system, the capacity of genotypes to display both a high yield and high malting characteristics was analyzed. Synergies or antagonisms between the five outputs were analyzed by genotypic Pearson correlation, using the mean values of the 20 genotypes across the 12 environments. For each management system, the set of genotypes in the first 0.50 quantile for each of the studied outputs was identified. Finally, the set of genotypes with the best compromise between the calibrated yield and grain protein content was identified. This set was composed of genotypes for which it is not possible to improve one of the performance criteria (calibrated yield or grain protein content) without compromising the others. This set is called the *Pareto* optimal solutions.

Genotypic Pearson correlations for the five outputs were also analyzed between the two management systems, using the mean values of the 20 genotypes across the 12 environments. The set of genotypes in the first 0.50 quantile for each of the studied outputs and the set belonging to the *Pareto* optimal solutions were then compared between the two management systems.

All statistical analyses were performed with R 2.15.3 statistical software (R Core Team, 2013).

**Table 1.1** Description of the pedoclimatic characteristics of the 12 site-year experiments

Site	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Soil texture	SWC	Initial soil N content <sup>1</sup> (kg N ha <sup>-1</sup> )		Cumulative rainfall <sup>2</sup> (mm)		Cumulative evapotranspiration <sup>2</sup> (mm)		Mean radiation <sup>2</sup> (MJ m <sup>-2</sup> )		Mean temperature <sup>2</sup> (°C)	
					Year1	Year2	Year1	Year2	Year1	Year2	Year1	Year2	Year1	Year2
Prasville (PRA)	48.27	1.69	Silt loam	162	86	34	554	357	394	384	10.3	10.4	10	9.8
Malmaison (MAL)	49.51	3.98	Sandy loam	126	-	35	-	475	-	417	-	9.9	-	8,1
Echemines (ECH)	48.37	3.87	Clay loam	108	161	64	493	455	475	452	10.6	10.5	9.8	9.4
Cappelle (CAP)	50.49	3.17	Silt loam	198	29	48	628	506	524	508	9.41	9.85	10	9.2
Houville (HOU)	48.44	1.63	Silt loam	180	23	19	534	402	468	482	10.3	10.4	9.9	9.6
Allemanche (ALL)	48.60	3.78	Loam	162	56	34	554	484	475	452	10.6	10.5	9.8	9.4
Pont-a-Mousson (PON)	48.55	5.49	Silt loam	150	-	35	-	555	-	503	-	9.63	-	8.7

SWC: Soil water content at field capacity (mm). <sup>1</sup>At the end of winter <sup>2</sup>over the growing season (October-June)



### 3. Results

#### 3.1. Qualitative and quantitative performances according to environments, management systems and genotypes

##### 3.1.1. Grain protein content

Grain protein content (GPC) was more strongly affected by environment (59.4% of the total variance, Table 1.2) than management system or the environment by management interaction (13.4% and 5.8% of total variability, respectively). However, mean GPC was significantly lower ( $P < 0.001$ ) in the LNP system (9.1%) than in the HI system (9.8%). Averaged over the 20 genotypes, GPC was in the range required for malting in eight of the 12 environments for the HI system, but in only two of the environments for the LNP system (Table 1.3).

The genotype accounted for a significant proportion ( $P < 0.001$ ) of the total variance of grain protein content, although the absolute percentages of the variance explained was small (4.0% of the total variance, Table 1.2). The effect of genotype depended on environment (3.9% of total variance for the EG term), and, to a lesser extent, on the interaction between environment and management system (2.0% of the total variance for the EGM term). The interaction between management and genotype accounted for 0.7% of the total variance for grain protein content. In the LNP system, four genotypes fulfilled the grain protein content criteria in only one environment, and one genotype fulfilled these criteria in seven environments (Figure 1.1a). In the HI system, three genotypes fulfilled these criteria in six environments and six genotypes fulfilled them in 10 environments. The genotypes never exceeded the 11.5% threshold in the LNP system (data not shown). By contrast, 12 genotype by environment combinations exceeded the 11.5% threshold in the HI system.

##### 3.1.2. Grain retention fraction

The variation of retention fraction (RF) was explained by environment (44.1% of the total variance, Table 1.2), followed by management system and the environment by management interaction (7.8 and 5.7% of the total variance, respectively). As observed for grain protein content, mean RF was significantly lower ( $P < 0.001$ ) in the LNP system (84.5%) than in the HI system (90.2%). Averaged over the 20 genotypes, the threshold was respected in half the environments for the HI system, and four environments for the LNP system (Table 1.3).

On the opposite to Grain protein content, genotype accounted for a large proportion (17.5% -  $P < 0.001$ ) of the total retention fraction variance (Table 1.2). This variance was also dependent on environment (13.0% of total variance), the interaction between environment and management (3.4% of total variance) and the interaction between management and genotype (2.8% of total variance). In the LNP system, one genotype never reached the threshold, and one genotype reached the threshold in 10 environments (Figure 1.1a). In the HI system, four genotypes reached the retention fraction

threshold in three environments and one genotype systematically had a retention fraction above the 90% threshold.

### 3.1.3. Agronomic malting quality

For the global agronomic malting quality, environment accounted for 20.9% of total variance, management system accounted for 12.7% of total variance and their interaction accounted for 10.5% of total variance (Table 1.2). For example, half the environments for the HI system and none of the environments for the LNP system had at least 50% of genotypes fulfilling both agronomic malting quality criteria (Table 1.3). The grain protein content criterion was fulfilled more often than the grain retention fraction criterion in the HI system, but the difference between the HI and LNP systems was larger for the grain protein content compared to grain retention fraction.

Genotype accounted for a significant proportion ( $P < 0.001$  - 8.0% of variation) of the total variance for malting quality. The genotype by environment interaction accounted for 8.0% of the total variance, the genotype by environment by management interaction accounted for 8.6%, and the management by genotype interaction accounted for 1.0% of the total variance. In the LNP system, six genotypes did not fulfill the malting criteria in any-environment (Table 1.2), whereas the best genotype reached the target agronomic malting quality in 50% of the environments (Figure 1.1a). In the HI system, the success rate ranged from three environments for five genotypes to 10 environments (for one genotype).

### 3.1.4. Yield and calibrated yield

Environment accounted for 48.6% of the variance for grain yield and 43.8% of that for calibrated grain yield. Management system accounted for 28.0% of the variance for grain yield and 29.6% of that for calibrated yield (Table 1.2). The environment by management interaction accounted for 3.6% of the variance for grain yield and 3.7% of that for calibrated grain yield. The environment by management interaction thus had a much smaller effect than management system. Mean grain yield was 17.0% lower ( $7.8 \text{ t ha}^{-1}$  versus  $9.4 \text{ t ha}^{-1}$ ;  $P < 0.001$ ) and mean calibrated grain yield was 22.4% lower ( $6.6 \text{ t ha}^{-1}$  vs.  $8.5 \text{ t ha}^{-1}$ ) for the LNP than for the HI system, when the 20 genotypes were considered together.

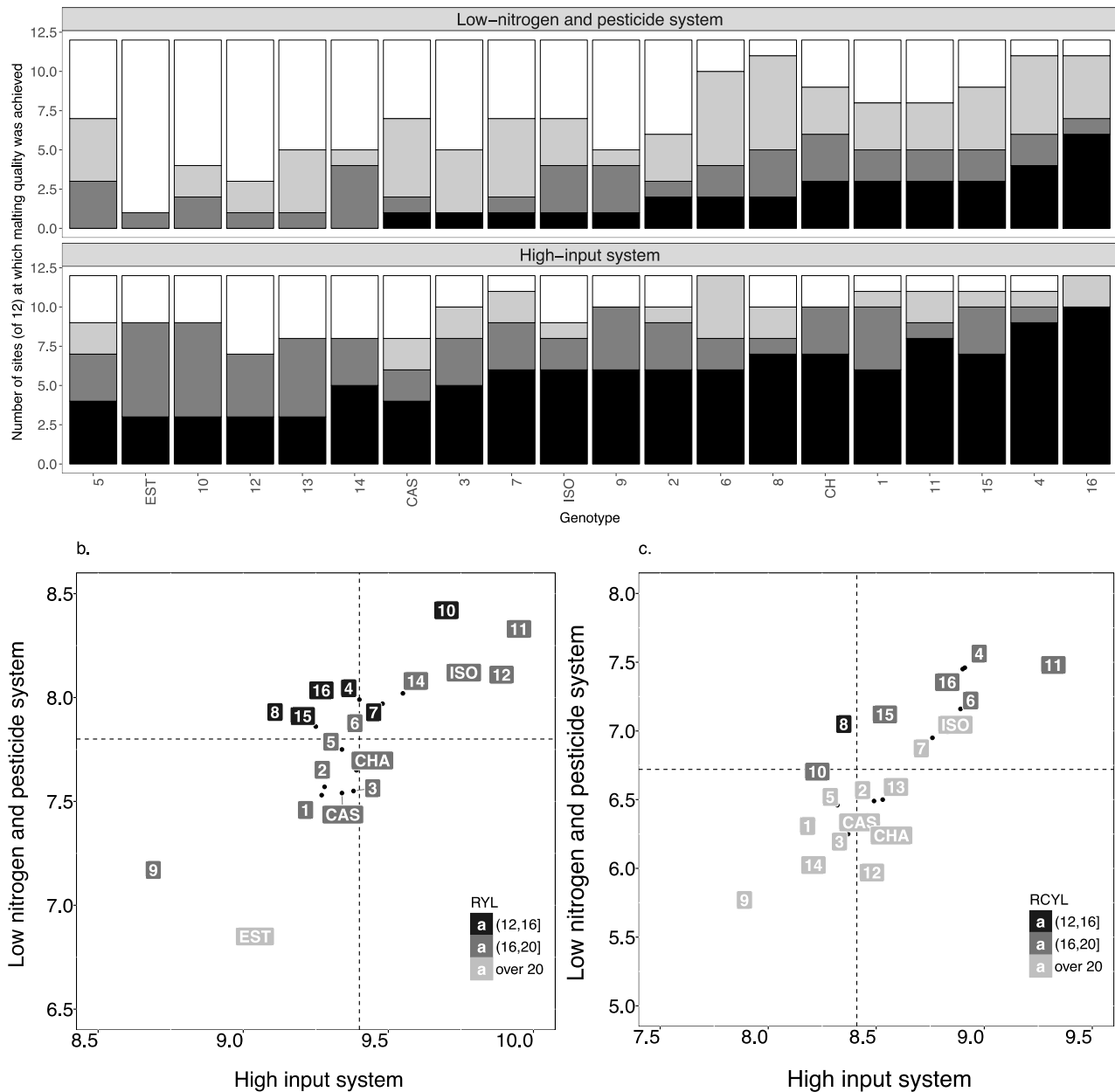
Genotype accounted for 4.9% of the total variance for grain yield and 7.1% of the total variance for calibrated grain yield (Table 1.2). Mean yield varied from  $6.9 \text{ t ha}^{-1}$  to  $8.4 \text{ t ha}^{-1}$  in the LNP system, and from  $8.7 \text{ t ha}^{-1}$  to  $10.0 \text{ t ha}^{-1}$  in the HI system, depending on genotype (Figure 1.1b). The effect of genotype also depended on environment (3.8% of total variance for yield and 5.6% for calibrated yield) and, to a lesser extent, on the interaction between management and environment (1.8% of the total variance for the two variables).

**Table 1.2.** Percent of the variance of malting quality (MQ- binary variable), retention fraction (RF), grain protein content (GPC), yield and calibrated yield explained by environment (E), management (M), genotype (G) and their interactions and the residual (R) variance. Results from an analysis of variance on 7 site-years, 20 genotypes and 2 crop management systems.

Source of variation	GPC	RF	MQ	Yield	Calibrated Yield
E	59.4	44.1	20.9	48.6	43.8
M	13.4	7.8	12.7	28.0	29.6
G	4.0	17.5	8.0	4.9	7.1
E:M	5.8	5.7	10.5	3.6	3.7
E:G	3.9	13.0	16.1	3.8	5.6
M:G	0.7	2.8	1.0	0.6	1.0
E:M:G	2.0	3.4	8.6	1.8	1.8
R	9.7	5.9	21.4	6.4	5.7

**Table 1.3.** Grain yield (t ha<sup>-1</sup>), grain protein content (GPC -%), grain retention fraction (RF -%) and proportion of genotypes (of 20) for which grain protein content (GPC\_Prop) and grain retention fraction (RF\_Prop) fulfilled the malting criteria in each management system. In brackets: standard errors.

		-----High-input system-----					-----Low Nitrogen and pesticides system-----				
Year	Site	Yield	GPC	RF	GPC_Prop	RF_Prop	Yield	GPC	RF	GPC_Prop	RF_Prop
1	ALL	9.2 (0.5)	10.2 (0.5)	95.2 (1.7)	100	100	7.1 (0.5)	8.6 (0.7)	92.7 (3.2)	0	85
2	ALL	12.3 (0.6)	9.6 (0.4)	92.5 (3.3)	60	75	10.5 (0.6)	8.7 (0.5)	85.8 (7.3)	0	30
1	CAP	8.1 (0.9)	10.1 (0.4)	82.3 (6.0)	100	5	6.3 (0.7)	9.5 (0.4)	63.8 (13.4)	45	0
2	CAP	9.4 (1.0)	7.4 (0.3)	87.0 (6.5)	0	25	7.3 (1.0)	7.0 (0.4)	83.8 (8.2)	0	20
1	ECH	8.2 (0.6)	10.0 (0.3)	95.9 (2.1)	100	100	7.2 (0.6)	9.2 (0.4)	92.3 (4.2)	20	70
2	ECH	9.3 (0.6)	10.6 (0.4)	90.3 (4.8)	100	50	8.6 (0.7)	9.7 (0.4)	87.8 (6.6)	75	45
1	HOU	10.0 (0.5)	10.2 (0.4)	89.5 (3.4)	95	45	8.0 (0.7)	10.4 (0.6)	80.0 (9.0)	100	15
2	HOU	9.2 (0.5)	9.4 (0.3)	80.6 (9.3)	35	20	7.4 (0.7)	8.5 (0.4)	69.9 (14.4)	0	5
2	MAL	10.0 (0.5)	10.7 (0.7)	94.4 (3.9)	90	80	8.6 (0.6)	9.5 (0.5)	90.6 (7.4)	45	60
2	PON	8.6 (0.3)	9.3 (0.3)	90.9 (4.1)	10	60	8.4 (0.3)	9.4 (0.4)	92.0 (5.9)	35	75
1	PRA	8.5 (0.6)	10.0 (0.5)	96.4 (3.1)	95	100	7.3 (0.7)	8.9 (0.4)	97.2 (2.9)	5	85
2	PRA	9.7 (0.6)	9.4 (0.9)	87.2 (7.6)	40	25	7.5 (0.6)	9.2 (0.5)	78.3 (10.9)	20	5
	MEAN	9.3 (1.3)	9.8 (1.0)	90.8 (7.3)	70	60	7.9 (1.2)	9.1 (1.0)	84.8 (12.7)	40	50



**Figure 1.1.** Quantitative and qualitative performances of the genotypes in the high-input and low-input systems:

a. Malting quality of genotypes in the high- and low-input systems. Black bars represent situations in which the grain protein content and grain retention fraction thresholds are respected; white bars: none of the criteria are fulfilled; light gray bars: only the retention fraction criterion are fulfilled; dark gray bars: only the grain protein content criterion is fulfilled.

b. Mean yield (t. ha<sup>-1</sup>) and c. Mean calibrated yield (t ha<sup>-1</sup>) of genotypes in high-input and low-input systems. Colors indicate the relative yield loss (RYL) of the relative calibrated yield loss (RCYL) for each genotype in the low-input system. The dashed line indicates the mean value of the variable in the system

### 3.2. What is the trade-off between malting quality and yield in each management system?

In the LNP system, the probability of genotypes satisfying the retention fraction criterion was significantly positively correlated with their probability of satisfying the grain protein content criterion ( $r = 0.63$ , Table 1.4). In the HI system, this correlation was weaker ( $r = 0.42$ , Table 1.4). Whatever the management system, no significant correlations were observed between yield and (i) the probability of respecting the grain protein content criterion ( $r = 0.27$  in LNP and  $-0.39$  in HI), (ii) the probability of respecting the grain retention fraction criterion ( $r = 0.27$  in LNP,  $-0.29$  in HI), and (iii) the probability of respecting both malting quality criteria ( $r = 0.16$  in LNP and  $-0.24$  in HI). Genotypes may thus have a high yield and little chance of satisfying the malting criteria (e.g. genotype 10 in LNP, genotype 13 in HI), or a high yield and a high likelihood of satisfying the malting criteria (e.g. genotype 16 in LNP, genotype 11 in HI).

In the LNP system, six genotypes (4, 6, 8, 11, 15 and 16) had a higher yield, grain protein content and retention fraction than the 20-genotype mean. Their mean yield was  $8.0 \text{ t ha}^{-1}$  and their calibrated yield was  $7.3 \text{ t ha}^{-1}$ . These six genotypes fulfilled the malting criteria in 28% of environments (66% of environments for retention fraction, but only 44.5% of environments for grain protein content).

**Table 1.4.** Pearson correlations between the genotypic capacity to fulfill malting quality (MQ), grain protein content (GPC), grain retention fraction (RF) requirements, the mean genotypic grain yield and calibrated grain yield in the 12 high-input and 12 low-nitrogen and no-pesticide environments. Symbols indicate the  $p$ -value: ■  $p$ -value  $< 0.10$ ; \*  $p$ -value  $< 0.05$ , \*\*  $p$ -value  $< 0.01$ , \*\*\*  $p$ -value  $< 0.001$

		High-Input system					Low Nitrogen and pesticides system				
		GPC	RF	MQ	Yield	Calibrated yield	GPC	RF	MQ	Yield	Calibrated yield
High-Input system	GPC	1	0.42■	0.48 *	-0.39■	0.07	0.74 ***	0.37	0.78 ***	-0.16	0.21
	RF		1	0.91 ***	-0.29	0.68 **	0.66 **	0.91 ***	0.74 ***	0.03	0.72 ***
	MQ			1	-0.24	0.63 **	0.78 ***	0.83 ***	0.82 ***	0.13	0.7 ***
	Yield				1	0.51 *	-0.13	-0.11	-0.13	0.81 ***	0.29
	Calibrated yield					1	0.48 *	0.73 ***	0.55 *	0.64 **	0.87 ***
Low Nitrogen and pesticides system	GPC						1	0.63 **	0.91 ***	0.27	0.63 **
	RF							1	0.72 ***	0.27	0.89 ***
	MQ								1	0.16	0.63 **
	Yield									1	0.67 **
	Calibrated yield										1

### 3.3. Are the best genotypes in high-input systems also the best in low-input systems?

#### 3.1.1. Quality

Grain protein content, like retention fraction, were highly correlated between the two systems ( $r = 0.74$  for grain protein content and  $0.91$  for retention fraction, Table 1.4). Genotypes with high agronomic malting quality in the HI system tended to have high agronomic malting quality in the LNP system too ( $r = 0.82$ , Table 1.4). Moreover, the higher the malting quality in the HI system, the lower the difference in malting quality between the two systems ( $r = -0.9$ , data not shown).

#### 3.1.2. Yield

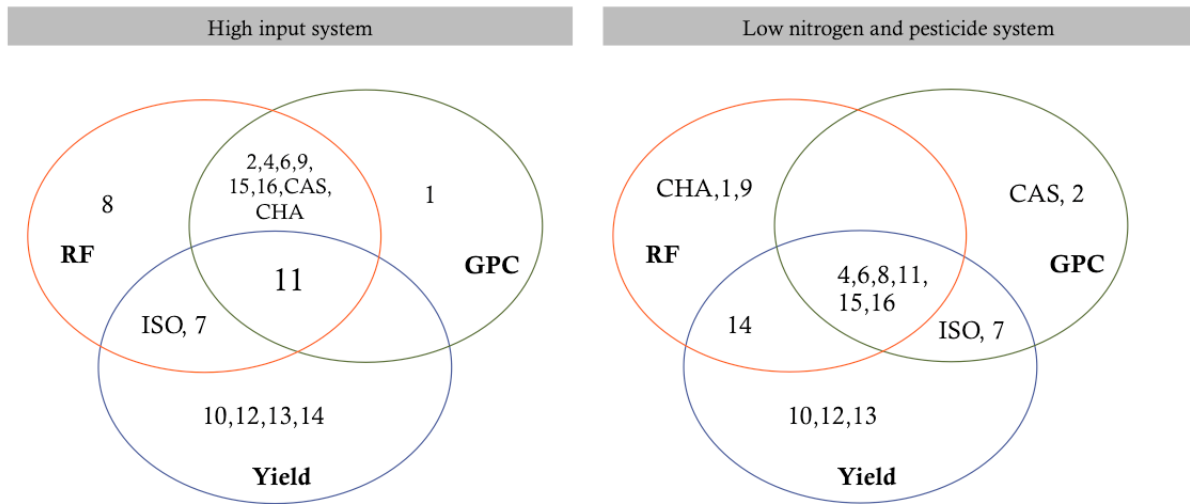
Genotypes with a high yield in the HI system also tended to have a high yield in the LNP system ( $r = 0.81$ , Table 1.4). However, relative yield difference was not correlated with yield in the HI system ( $r = -0.2$ ). Consequently, some genotypes with a low yield in the HI system (e.g. genotypes 8, 16, 15 and 6) may have had a yield above the group mean in the LNP system, due to the small relative yield difference between the two systems (**Figure 1.1b**). By contrast, some genotypes with very high yields in the HI system (genotypes Isocel, 11, 12, and 13) did not have a yield above the group mean in the LNP system.

#### 3.1.3. The combination of malting quality and yield

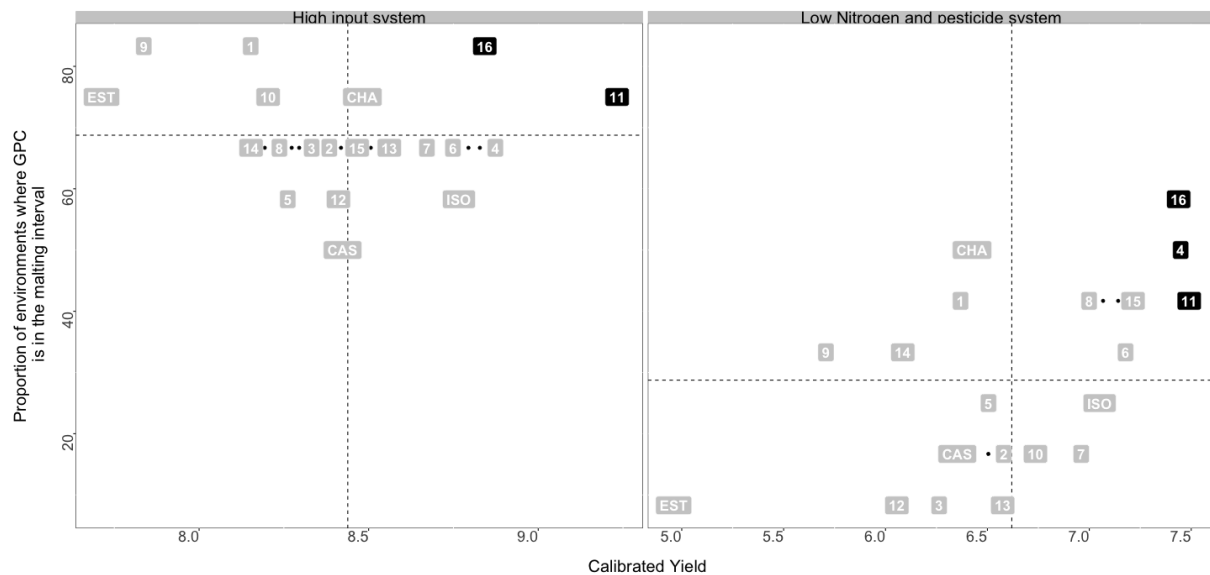
In the LNP system, six genotypes (4, 6, 8, 11, 15 and 16) were in the first 0.5 quantile for yield, grain protein content and grain retention fraction (**Figure 1.2a**). These genotypes also displayed relative little variation of yield, grain protein content and retention fraction between the two different management systems. However, only one of these six genotypes (genotype 11) was in the first 0.5 quantile for these three criteria in the HI system (**Figure 1.2a**). This genotype therefore seems to give a high yield and good malting quality in both systems. It had the second highest yield in both the HI and LNP systems. Genotype 11 was also ranked 3 and 1 for agronomic malting quality in the HI and LNP systems, respectively. The other five genotypes had a yield below the group mean in the HI system (**Figure 1.2b**).

*Pareto* optimal solutions based on calibrated yield and grain protein content retained two genotypes in the HI system and three in the LNP system (**Figure 1.2a**). In the LNP system, one more genotype (no. 4), in addition to genotypes 11 and 16, was retained by the *Pareto* optimal solutions. Compared to genotypes 16, genotypes 4 and 11 had a high retention fraction, which compensated for their relatively low yields.

a.



b.



**Figure 1.2.** Multi-criteria assessment of the genotypes in the high-input system and the low-nitrogen - no-pesticides system.

a. Venn diagram of the genotypes in the first 0.5 quantile for retention fraction, grain protein content and grain yield in the two systems. The intersection between the circles corresponds to genotypes in the first 0.5 quantile for two or three criteria simultaneously.

b. Pareto optimal solutions (black boxes) of the high-input and low-nitrogen no-pesticide systems for calibrated yield and grain protein content. Gray boxes represent the non-optimal genotypes for the studied criterions.

## 4. Discussion

### 4.1. Main hindrance to low-input malting barley production in France

In our experiment, there was a much larger difference in mean grain protein content (0.76 points; -7.8%) and retention fraction (6.11 points; -6.7%) between the LNP and HI systems than reported in the studies of *Turkington et al.*, (2012) and *O'Donovan et al.*, (2011). Similarly, the mean difference in yield between the LNP and HI environments (1.4 t ha<sup>-1</sup> for all environments and the 20 genotypes; -17.0% for LNP versus HI) was large. *Le Gouis et al.* (1999) reported a similar yield difference (-21%), but between a 6-rows winter barley crop fertilized with 110 kg N ha<sup>-1</sup> (yield of 8.0 t ha<sup>-1</sup>) and a winter barley crop grown without fertilizer (yield of 6.3 t ha<sup>-1</sup>), in a two-year experiment in northern France. By contrast, *Delogu et al.* (1998) observed a yield decrease of only 0.5 t ha<sup>-1</sup> (6%) when 42% less N fertilizer was applied, and of 1.2 t ha<sup>-1</sup> (15%) when no N fertilizer was applied, relative to a high-N management system for 6-rows winter barley in Italy (yield = 8.2 t ha<sup>-1</sup>, total N available = 140 kg N ha<sup>-1</sup>). In their study, however, N uptake exceeded 100 kg N ha<sup>-1</sup> in the absence of fertilizer indicating a potential lack of N limitation for the situation with low N fertilizer applied.

The absence of pesticide control in the LNP system could not account for these large differences, as disease intensity was low during the two years of experiments (Disease symptoms covered less than 20% of the leaf area on no more than 25% of the plants). However, the nitrogen-splitting strategy applied in our experiment may partly account for performance in the LNP system. LNP and HI systems both involved early N applications (before Zadoks stage 30). High rates of N application early in the growing season generally stimulate tillering, but many of the tillers generated do not produce spikes (*Baethgen et al.*, 1995; *del Moral and del Moral*, 1995). High nitrogen availability at the end of winter in our experiment may have favored tillering, whereas the limited supply of N later in the growing cycle may have increased competition between tillers and, thus, their mortality. *Loyce* (personal communication) demonstrated that the optimal N fertilizer splitting strategy differs between low-input and high-input systems. Moreover, in our study, the absence of a late N supply may have prevented compensation effects between yield components similar to those reported by *Baethgen et al.* (1995). Other non-optimal management modalities might have increased such effects in the low-input system. *Loyce et al.* (2012) showed that a decrease in sowing density is required in low-input systems to prevent high N demand in the first part of the crop cycle. In our experiment, a similar sowing density was used in the two systems, potentially further increasing the effect of N deficiency in the LNP system.

On the whole, the differences in yields and malting quality observed between low- and high-input systems makes it more difficult to compensate for the lower input use between the two systems, hindering the adoption of lower input management systems. Considerable progress in yields and quality in low-input systems are thus required. This progress could potentially be achieved for barley, as already done for wheat in France, through the simultaneous adjustment of genotype and



management characteristics. Indeed, to date, agronomists have focused on developing management techniques for “elite” genotypes bred in and for high-input environments (Hammer et al., 2014). Some authors have pointed out that there has been less genetic progress in low-input than in high-input systems (Brancourt-Hulmel et al., 2003; Ortiz-Monasterio et al., 1997; Shroyer and Cox, 1993). Moreover, by contrast to the studies conducted in the great plains of America (e.g. O'Donovan et al., 2016, 2011; Turkington et al., 2012), few technical references are available for optimizing the technical management of French malting barley production, particularly for low-input management systems. Finally, studies on wheat production in low-input management systems are difficult to transpose to barley, due to the specific characteristics of these species (e.g. differences in their responses to N fertilization, see for example Delogu et al., 1998), and the particular criteria that must be met for the malting industry.

### **2.5. Future prospects for the development of low-input malting barley systems**

Despite the relatively weak effect of genotype on total variance for the five outputs studied (< 20% of total variance explained by genotype), large differences in the capacity of genotypes to fulfill the malting criteria were observed in the two systems. This finding confirms that genetic variation is one of the main levers for buffering environmental fluctuations and maintaining an acceptable level of production in terms of quality and quantity (Murphy et al., 2007).

Large improvements in the capacity of genotypes to fulfill grain size requirements are required in both HI and LNP systems: only half the HI trials (and 40% of the LNP trials) had a 20-genotype mean for grain size meeting the threshold for malting. In our experiment, as previous studies (Fox et al., 2006), the proportion of the variance explained by genotype for the retention fraction (17.5% of the total variance) was higher than that for grain protein content and yield. For this variable, the proportion of the variance explained by genotype was 2.2 times greater than that explained by management system. The identification of genotypes with large grains should therefore be a priority for improving the capacity to fulfill the retention fraction criterion.

By contrast, the capacity of genotypes to achieve the grain protein content threshold required specific improvement in LNP systems: only two of the trial had satisfactory grain protein contents in the LNP system, versus eight trials for the HI system. As mean grain protein content over the 20 genotypes reached only 9.0%, improvements should focus on increasing grain protein content in low-input systems. Furthermore, the grain protein content in the LNP system never exceeded the upper threshold for malting (11.5%). Management system had a larger impact on grain protein content than genotype (13.4 and 4.0% of the total variance, respectively), by contrast to what was found for retention fraction. Improvements in the capacity of LNP systems to satisfy grain protein criteria should thus be sought through changes in management practices, such as N fertilizer strategy in particular. Management practices should be adapted to the environment: we found that the environment by management interaction had a larger effect than management alone, particularly for quality variables.

Malting barley production must simultaneously achieve high yields and high agronomic malting quality. In the LNP system, the six genotypes with grain protein content, retention fraction and grain yield simultaneously higher than the group mean fulfilled the malting criteria in only 28% of environments (versus 40% for all genotypes in HI system). However, consistent with the findings of *Mathies et al. (2014)* and *Le Bail and Meynard (2003)*, we observed that, for both management systems, the correlations between agronomic malting quality and yield were weak and not significant. Improvement of the three criteria simultaneously thus seemed achievable. In our study, some genotypes reached a high yield and a high agronomic malting quality (e.g. genotype 11 in both management systems). This genotype is thus potentially very interesting for improving the malting barley production. However, our study focused exclusively on the agronomic characteristics of malting barley. Many other characteristics (*Fox et al., 2003*) must also be taken into account to ensure high malting quality.

#### **4.2. Does the identification of genotypes adapted to low-input systems require specific trials?**

Like *Wortman et al. (2013)*, we conclude that the identification of the best genotypes in the HI system can be used to eliminate genotypes likely to give low yields in the LNP system, but not to identify all the genotypes giving the highest yields in the LNP system. In our experiment, the yields obtained in the HI and LNP systems were positively correlated ( $r=0.81$ ), consistent with the findings of other studies (*Richards, 2000; Slafer et al., 2005; Slafer and Araus, 2007; Fischer and Edmeades, 2010*). However, the relative yield loss between the two systems was not correlated with yield in the HI system. Thus, genotypes with relative low yields in the HI system and a small yield difference between the two systems may give high yields in low-input conditions. As a result, genotypes of potential value for use in low-input systems might be abandoned early in the breeding process when trials are conducted in HI systems. This problem has already been highlighted by *Murphy et al. (2007)* in the context of genotype adaptation to organic systems. In our study, five genotypes (nos. 4, 6, 8, 16, 15) with relatively high yields in the LNP system would probably have been abandoned if variety selection was based on yields in a HI system. Interestingly, the genotypes giving the best yields in the LNP system were also those for which the smallest differences in yield were observed between the two systems.

The correlation between agronomic malting quality in the LNP and HI systems was very strong and positive, whereas the correlation between the relative loss of agronomic malting quality and agronomic malting quality in the HI system was strong and negative. The risk of abandoning promising genotypes adapted to the LNP system was thus much lower than for yield. Like *Ogushi et al., 2002*, we conclude that high-quality malting genotypes could be selected based on malting data for the cultivation of the genotype concerned in a different environment.

Finally, when considering a combination of agronomic malting quality and yield, the indirect identification of the best genotypes for the LNP system on the basis of yield and agronomic malting quality in the HI system was inefficient. Indeed, only one of the six genotypes with a yield and agronomic malting quality above the group mean in the LNP system had a yield and agronomic malting quality above the group mean in the HI system. Trials in high-yielding environments thus did not efficiently identified all the best genotypes with high agronomic malting quality in a low-nitrogen no-pesticide system. Our results require confirmation with a larger number of genotypes. Like *Carena et al. (2009)* and *Le Champion et al. (2014)*, we conclude that multienvironmental trials comparing the ranking of cultivars and their interaction in current and alternative production systems are essential to obtain a clear ranking of genotypes for yield and agronomic malting quality.

The identification of genotypes on the basis of calibrated yield, rather than on the basis of yield and retention fraction separately, is potentially interesting for farmers growing malting barley, as they receive premium prices on the basis of calibrated yield. Our findings also suggest that calibrated yield is a better indicator than yield for identifying the genotypes performing best in the LNP system on the basis of the results of experiments in HI conditions (correlation coefficients of 0.48 and 0.73 for the correlations between HI-calibrated yield and LNP-grain protein content and HI-calibrated yield and LNP-retention fraction; versus of -0.13 and -0.11 for the correlations between HI-yield and LNP-grain protein content and HI-yield and LNP-retention fraction). Moreover, some genotypes with a relatively low yield may give a high calibrated yield (e.g. genotype 16 in the HI system and genotypes 4 and 16 in the LNP system).

Depending on the price of malting and feed barley, it might be interesting for farmers to grow dual-purpose (feed and malting) barley crops. In this case, yield (rather than calibrated yield) would be a major factor for ensuring a high income if protein content and grain retention fraction do not meet the requirements for malting.

## **Conclusion**

In this study, we quantified, in a multisite trial, the capacity of 20 genotypes to meet grain protein and grain size requirements for malting, in addition to delivering high yields, in high-input (HI) and low-nitrogen no-pesticide (LNP) environments. Our findings highlight the need to improve the retention fraction in both systems and, specifically, to increase grain protein content in the LNP system. Genetic lever appears to be the key level for achieving industrial requirements in low-input production systems, particularly for grain retention fraction. New N management strategies appear to be required, to increase grain protein content and yield in low-input systems.

Six genotypes simultaneously had a yield, grain protein content and grain size higher than the group mean in the LNP system. Large differences in the genotypic capacity to fulfill malting criteria, and the absence of a significant negative correlation between yield and malting quality would make it possible to achieve genetic progress towards high-yielding and high-malting quality genotypes.

The identification of all the best genotypes for LNP systems on the basis of the results of experiments in the HI system was inefficient, as the relative yield loss between the two systems was not correlated with yield in the HI system. The genotypes providing a high yield, grain protein content and grain size thus partly differ between the two systems. The identification of the best genotypes for the LNP system on the basis of calibrated yield and grain protein content in the HI system appeared to be more effective.

## **Acknowledgments**

This work was supported by a grant from the French Ministry of Agriculture (CASDAR Eco2malt). We thank the technical team of UMR Agronomie, Florimond-Desprez and KWS-Mommont for assistance with the experiment.

## Bibliography

- Agreste, 2016. Les traitements phytosanitaires en 2014.
- Baethgen, W.E., Christianson, C.B., Lamothe, A.G., 1995. Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barley. *Field Crops Res.* 43, 87–99. doi:10.1016/0378-4290(95)00034-N
- Bertholdsson, N., 1999. Characterization of malting barley cultivars with more or less stable grain protein content under varying environmental conditions. *Eur. J. Agron.* 10, 1–8. doi:10.1016/S1161-0301(98)00043-4
- Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., Trottet, M., 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.* 43, 37–45. doi:10.2135/cropsci2003.3700
- Calderini, D.F., Slafer, G.A., 1999. Has yield stability changed with genetic improvement of wheat yield? *Euphytica* 107, 51–59. doi:10.1023/A:1003579715714
- Carena, M.J., Yang, J., Caffarel, J.C., Mergoum, M., Hallauer, A.R., 2009. Do different production environments justify separate maize breeding programs? *Euphytica* 169, 141–150. doi:10.1007/s10681-009-9908-5
- Ceccarelli, S., 1994. Specific adaptation and breeding for marginal conditions, in: Rognli, O.A., Solberg, E., Schjelderup, I. (Eds.), *Breeding Fodder Crops for Marginal Conditions*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 101–127.
- Ceccarelli, S., 1996. Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica* 92, 203–214. doi:10.1007/BF00022846
- Chikowo, R., Faloya, V., Petit, S., Munier-Jolain, N.M., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agric. Ecosyst. Environ.* 132, 237–242. doi:10.1016/j.agee.2009.04.009
- 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 Res.* 107, 89–101. doi:10.1016/j.fcr.2008.01.001
- del Moral, M.B.G., del Moral, L.F.G., 1995. Tiller production and survival in relation to grain yield in winter and spring barley. *Field Crops Res.* 44, 85–93. doi:10.1016/0378-4290(95)00072-0
- 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. doi:10.1016/S1161-0301(98)00019-7
- European Commission, 2009. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of 21 October 2009.
- Fischer, R., Edmeades, G.O., 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50, S–85. doi:10.2135/cropsci2009.10.0564
- Fox, G.P., Kelly, A., Poulsen, D., Inkerman, A., Henry, R., 2006. Selecting for increased barley grain size. *J. Cereal Sci.* 43, 198–208. doi:10.1016/j.jcs.2005.08.004
- Fox, G.P., Panozzo, J.F., Li, C.D., Lance, R.C.M., Inkerman, P.A., Henry, R.J., 2003. Molecular basis of barley quality. *Crop Pasture Sci.* 54, 1081–1101. DOI: 10.1071/AR02237
- Hammer, G.L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M.T., van Oosterom, E., Jordan, D., 2014. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop Pasture Sci.* 65, 614–626. DOI: 10.1071/CP14088
- 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. doi:10.2134/agronj2015.0512
- Incograin, 2014. Addendum technique N°IV pour la vente des orges de brasseries. <https://www.incograin.com/libre/realisations.htm>
- Kaczmarek, Z., Adamski, T., Surma, M., Jezowski, S., Lesniewska-Fratczak, M., 1999. Genotype-environment interaction of barley doubled haploids with regard to malting quality. *Plant Breed.* 118, 243–247. doi:10.1046/j.1439-0523.1999.118003243.x

- Lammerts van Bueren, E.T., Jones, S.S., Tamm, L., Murphy, K.M., Myers, J.R., Leifert, C., Messmer, M.M., 2011. The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review. *NJAS - Wagening. J. Life Sci., Improving Production Efficiency, Quality and Safety in Organic and “Low-Input” Food Supply Chains* 58, 193–205. doi:10.1016/j.njas.2010.04.001
- Le Bail, M., Meynard, J.-M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie* 23, 13–27. doi:10.1051/agro:2002029
- Le Campion, A., Oury, F.-X., Morlais, J.-Y., Walczak, P., Bataillon, P., Gardet, O., Gilles, S., Pichard, A., Rolland, B., 2014. Is low-input management system a good selection environment to screen winter wheat genotypes adapted to organic farming? *Euphytica* 199, 41–56. doi:10.1007/s10681-014-1172-7
- Le Gouis, J., Delebarre, O., Beghin, D., Heumez, E., Pluchard, P., 1999. Nitrogen uptake and utilisation efficiency of two-row and six-row winter barley cultivars grown at two N levels. *Eur. J. Agron.* 10, 73–79. doi:10.1016/S1161-0301(98)00055-0
- 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., 2012. 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. doi: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. doi:10.1016/j.cropro.2008.02.001
- Matthews, R., Stephens, W., Hess, T., Middleton, T., Graves, A., 2002. Applications of crop/soil simulation models in tropical agricultural systems. *Adv. Agron.* 76, 31–124.
- McKenzie, R., Middleton, A., Bremer, E., 2005. Fertilization, seeding date, and seeding rate for malting barley yield and quality in southern Alberta. *Can. J. Plant Sci.* 85, 603–614. doi.org/10.4141/P04-152
- Martin, G., Martin-Clouaire, R., Duru, M., 2013. Farming system design to feed the changing world. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 131–149. doi:10.1007/s13593-011-0075-4
- MEA, 2005. Millennium ecosystem assessment synthesis report. Millennium Ecosystem Assessment.
- Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., Michon, C., 2016. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agric. Syst.* doi:10.1016/j.agsy.2016.08.002
- Murphy, K.M., Campbell, K.G., Lyon, S.R., Jones, S.S., 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Res.* 102, 172–177. doi:10.1016/j.fcr.2007.03.011
- O'Donovan, J., Edney, M.J., Izydorczyk, M., Turkington, T.K., Juskiw, P., McKenzie, R., Grant, C., Harker, K.N., May, W., Johnson, E., Smith, E.G., Clayton, G., 2016. Effect of seeding date and rate on malting barley (*Hordeum vulgare* L.) quality. *Can. J. Plant Sci.* doi:10.1139/CJPS-2016-0137
- O'Donovan, J.T., Turkington, T.K., Edney, M.J., Clayton, G.W., McKenzie, R.H., Juskiw, P.E., Lafond, G.P., Grant, C.A., Brandt, S., Harker, K.N., Johnson, E.N., May, W.E., 2011. Seeding Rate, Nitrogen Rate, and Cultivar Effects on Malting Barley Production. *Agron. J.* 103, 709. doi:10.2134/agronj2010.0490
- Ogushi, K., Lim, P., Barr, A., Takahashi, S., Asakura, T., Ito, K., 2002. Japanese barley meets Australia: quality performance of malting barley grown in different countries. *J. Inst. Brew.* 108, 303–309. doi:10.1002/j.2050-0416.2002.tb00555.x
- Ortiz-Monasterio R., J.I., Sayre, K.D., Rajaram, S., McMahon, M., 1997. Genetic Progress in Wheat Yield and Nitrogen Use Efficiency under Four Nitrogen Rates. *Crop Sci.* 37, 898. doi:10.2135/cropsci1997.0011183X003700030033x

- Pretty, J.N., Brett, C., Gee, D., Hine, R.E., Mason, C.F., Morison, J.I.L., Raven, H., Rayment, M.D., van der Bijl, G., 2000. An assessment of the total external costs of UK agriculture. *Agric. Syst.* 65, 113–136. doi:10.1016/S0308-521X(00)00031-7
- R Core Team, 2013. R Development Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Richards, R., 2000. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *J. Exp. Bot.* 51, 447–458.
- Remy, J., Hebert, J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *CR Acad Agric F.*
- Shroyer, J., Cox, T., 1993. Productivity and adaptive capacity of winter wheat landraces and modern cultivars grown under low-fertility conditions. *Euphytica* 70, 27–33. doi.org/10.1007/BF00029637
- Slafer, G., Araus, J., 2007. Physiological traits for improving wheat yield under a wide range of conditions. *Frontis* 21, 145–154.
- Slafer, G.A., Araus, J.L., Royo, C., Moral, L., 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Ann. Appl. Biol.* 146, 61–70.
- Tilman, D., 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 5995–6000. doi:10.1073/pnas.96.11.5995
- Turkington, T.K., O'Donovan, J.T., Edney, M.J., Juskiw, P.E., McKenzie, R.H., Harker, K.N., Clayton, G.W., Xi, K., Lafond, G.P., Irvine, R.B., Brandt, S., Johnson, E.N., May, W.E., Smith, E., 2012. Effect of crop residue, nitrogen rate and fungicide application on malting barley productivity, quality, and foliar disease severity. *Can. J. Plant Sci.* 92, 577–588. doi:10.4141/cjps2011-216
- Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., Milner, M., Cassman, K.G., 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.* 143, 34–43.
- Wortman, S.E., Francis, C.A., Galusha, T.D., Hoagland, C., Van Wart, J., Baenziger, P.S., Hoegemeyer, T., Johnson, M., 2013. Evaluating Cultivars for Organic Farming: Maize, Soybean, and Wheat Genotype by System Interactions in Eastern Nebraska. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 37, 915–932. doi:10.1080/21683565.2013.764956

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10

11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
  
25  
26  
27  
28  
  
29  
  
30  
  
31  
  
32  
  
33  
  
34  
  
35  
  
36  
  
37  
  
38

Chapitre 2



**Quelles caractéristiques variétales permettent aux géotypes d'orge brassicole de conserver une production quantitative et qualitative élevée en situation de stress azoté ?**

*« Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit »*

*G. Bachelard.*



39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

## 49 Résumé

50 Les génotypes actuels accusent des baisses importantes de rendement calibré et de teneur en protéines dans  
51 des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants. Pour de tels systèmes, développer des génotypes tolérants  
52 aux stress azotés devrait contribuer au maintien de la production quantitative et qualitative. L'identification  
53 de caractéristiques physiologiques est une étape utile pour la sélection de génotypes plus tolérants aux stress  
54 azotés.

55

56 Ce chapitre s'articulera autour des deux questions suivantes :

- 57 • Quelles caractéristiques physiologiques permettent de minimiser la perte de rendement calibré des  
58 orges brassicoles en situation de stress azoté ?
- 59 • Quels traits physiologiques permettent de minimiser la perte de teneur en protéines des orges  
60 brassicoles en situation de stress azoté ?

61

62 L'analyse a été réalisée sur le réseau expérimental décrit dans le premier chapitre. 19 génotypes (voir *le*  
63 *complément au chapitre 2*) ont été caractérisés par une dizaine de co-variables relatives à la production de  
64 biomasse, à l'absorption d'azote, aux composantes de rendement et à la dynamique de l'azote en  
65 situations non stressées en azote. L'impact de ces caractéristiques sur la perte relative de rendement  
66 calibré (CYR- *Calibrated yield loss ratio*) et la perte relative de teneur en protéine (GPR- *grain protein*  
67 *loss ratio*), de ces génotypes entre situations stressées et non stressées (HI) en azote a été étudié par la  
68 méthode des moindres carrés partiels (PLS-*Partial least square regression*).

69 Sur les génotypes analysés, le CYR tend à diminuer quand le rendement en HI augmente. Le CYR  
70 diminue quand le poids de mille grains et la production de biomasse après floraison sont élevés en HI et  
71 quand le nombre de grains par m<sup>2</sup> est faible. Le GPR tend à augmenter quand la teneur en protéine en HI  
72 augmente. Le GPR est faible quand les quantités d'azote absorbées en sortie-hiver sont élevées. Le CYR  
73 et le GPR n'étaient pas significativement corrélés. Optimiser simultanément les deux variables semble  
74 donc possible.

75 Ces informations peuvent être utilisés par les obtenteurs, qui sur la base d'essais menés en haut niveau  
76 d'intrants, pourraient à la fois identifier les génotypes avec des performances élevées en haut niveau  
77 d'intrants et de faibles pertes de production en cas de stress azoté.

78

79

80

81

82

83

84

85

86 **Messages clés:**

87 - La perte relative de rendement calibrée diminue quand le rendement en conduite « intensive »  
88 augmente

89 - La perte relative de rendement calibré est principalement expliquée par le poids de mille grains, le  
90 nombre de grains par m<sup>2</sup> et l'absorption de biomasse après floraison en situation hors stress

91 - La perte de teneur en protéine augmente quand la teneur en protéine en HI augmente

92 - La perte de teneur en protéine est principalement expliquée par l'absorption précoce d'azote et  
93 l'équilibre entre accumulation de biomasse et d'azote pendant le remplissage des grains en situation  
94 hors stress.

95

96 **Mots-clés:**

97 *Hordeum vulgare* L. régression des moindres carrés, tolérance au stress azoté, caractéristiques  
98 variétales

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

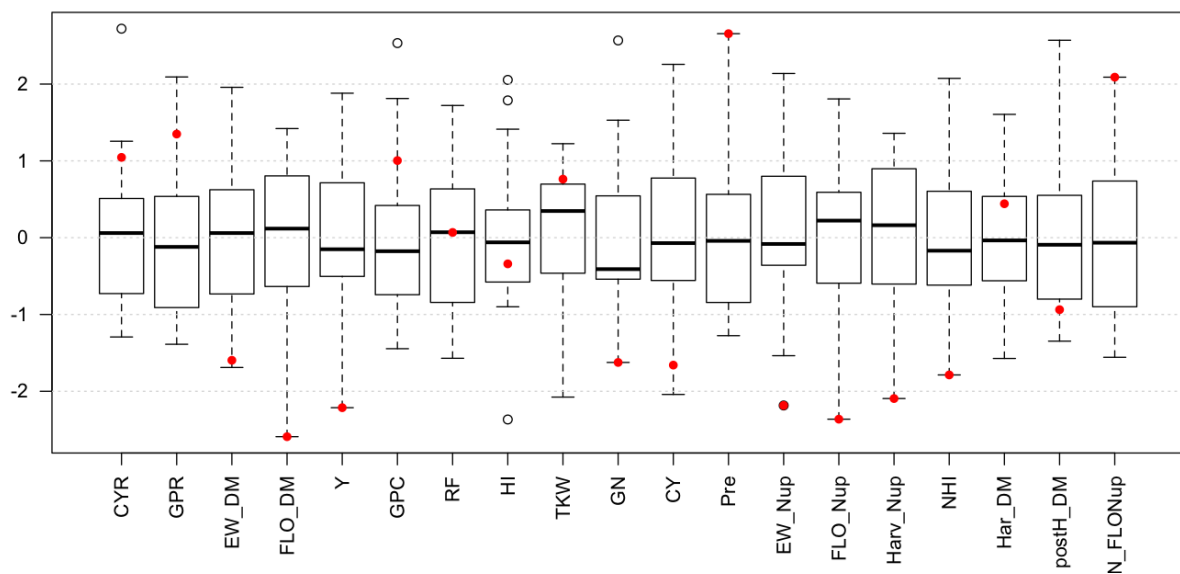
129

130 **Complément au chapitre 2**

131  
 132 Les modèles établis dans le chapitre 2 ont porté sur 19 génotypes alors que 20 génotypes ont été  
 133 analysés dans le CHAPITRE 1. Le génotype 9 n'a pas été inclus dans les analyses pour ce chapitre. Ce  
 134 génotype présente des caractéristiques variétales assez particulières (Figure 18) : Il présente des  
 135 valeurs extrêmes pour 10 des 17 caractéristiques variétales analysées. Intégrer ce génotype pour  
 136 calibrer le modèle, entrainerait une difficulté à établir un modèle robuste liant caractéristiques  
 137 variétales et pertes relatives de rendement. En effet, le risque de confusion d'effets entre les différentes  
 138 caractéristiques variétales extrêmes est important. Ce génotype de plus de part ses caractéristiques et  
 139 des valeurs de CYR et GPR élevées impacte fortement le paramétrage du modèle.

140 Nous avons vérifié cette hypothèse, en réalisant l'analyse avec et sans ce génotype. Pour la variable  
 141 CYR et toute chose égale par ailleurs, la qualité de prédiction *leave-one-out* estimée par le critère  $Q^2$   
 142 (*Tenenhaus, 1998*) est négative pour le premier (-0.03) et le second axe (-0.35) dans le cas d'un  
 143 paramétrage du modèle avec 20 génotypes. Cela signifie que le modèle n'est aucunement prédictif des  
 144 valeurs de CYR. Au contraire, dans le cas d'un paramétrage du modèle avec 19 génotypes, le  $Q^2$  est  
 145 de 0.19 et 0.04 pour le premier et le second axe. Cela confirme que ce génotype impacte fortement la  
 146 capacité du modèle à prédire la valeur de CYR des autres génotypes.

147



148 **Figure 18.** Caractéristiques des 20 génotypes analysés (boxplot) et caractéristiques du génotype n°9  
 149 (point rouges). Les valeurs des caractéristiques sont normalisées.  
 150

151

152

153

154

155

156 **Which genotypic characteristics favor the maintenance of**  
157 **grain yield and grain protein content in winter barley under**  
158 **nitrogen stress?**

159

160 Damien Beillouin<sup>a,b,\*</sup>, Marie-Hélène Jeuffroy<sup>a</sup>, Arnaud Gauffreteau<sup>a</sup>

161 <sup>a</sup> UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon,  
162 France

163 <sup>b</sup> Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, 59242 Cappelle-en-Pévèle, France

164 \*Corresponding author.

165 E-mail address: [damien.beillouin@inra.fr](mailto:damien.beillouin@inra.fr)

166

167 **Abstract**

168 New societal demands and environmental concerns now orientate winter barley (*Hordeum vulgare L.*)  
169 breeding programs towards low-input agricultural practices, including low-nitrogen (N) management  
170 in particular. There is, therefore, a need for barley genotypes with yield and grain characteristics  
171 unaffected by N stress, for the malting industry. In this context, we studied the physiological traits  
172 determining plant tolerance to N deficiency, focusing on both yield and grain quality. We analyzed the  
173 performance of 19 winter barley genotypes in low- and high-nitrogen nutrition conditions, in multisite  
174 trials. The genotypes were characterized in terms of their dry matter, N uptake at different growth  
175 stages, plant N dynamics and yield components in high-nitrogen conditions. We used partial least  
176 squares regression to identify traits favoring a low calibrated yield loss ratio (CYR) and a low grain  
177 protein content loss ratio (GPR) between conditions of N stress and situations without N stress. CYR  
178 was inversely correlated with thousand-kernel weight and dry matter accumulation after heading, but  
179 increased with grain number per square meter. A high capacity of the plant to absorb N early in the  
180 crop cycle and a high nitrogen harvest index favored a low GPR. N remobilization and N uptake after  
181 anthesis had little effect on GPR. CYR and GPR were not significantly correlated. It may therefore be  
182 possible to minimize both these losses. These results are potentially useful for indirect breeding  
183 approaches and as a basis for the definition of barley ideotypes adapted to low nitrogen inputs.

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193 **Highlights**

- 194 - Yield loss (grains >2.5 mm) in N–stress situations was negatively correlated with yield (grains  
195 >2.5 mm) in non-stress situations
- 196 - Thousand-kernel weight, number of grains per square meter and N uptake after flowering in  
197 non-stress situations were good indicators of the yield (grains >2.5 mm) in N–stress situations
- 198 - Grain protein content loss (grains >2.5 mm) in N–stress situations was positively correlated  
199 with grain protein content in non-stress situations
- 200 - Early N uptake and the trade-off between N uptake and biomass accumulation during grain  
201 filling in non-stress situations accounted for grain protein content loss in N-stress situations.
- 202 - Some genotypes had both a low yield (grains>2.5 mm) and low grain protein content loss in  
203 N-stress situations.

204

205

206 **Keywords**

207 Grain protein content; Partial least squares regression;

208 Yield component; Grain retention fraction;

209 N deficiency; Indirect breeding.

210

211

212

**213 1. Introduction**

214 Nitrogen availability is a key determinant of the productivity and quality of cereal crops (*Good et al.,*  
215 *2007; Kraiser et al., 2011; Spaner et al., 2001*). Synthetic fertilizers are the largest source of N inputs  
216 on crop worldwide (*Lassaletta et al., 2014*). However, more than half the nitrogen supplied to crops is  
217 lost to the atmosphere or leached in surface or groundwater (*Vitousek et al., 1997, Lassaletta et al.,*  
218 *2014*). These N losses result in serious environmental pollution (*Erisman et al., 2013*). Agricultural  
219 systems thus need to evolve into profitable, ecologically safe and socially acceptable systems that use  
220 resources very efficiently (*DeLonge et al., 2016; Spiertz, 2010*). Several management techniques have  
221 been proposed for reducing the use of chemical inputs without affecting agronomic performance, with  
222 the development of low-input management systems, for example (*Loyce et al., 2008, Meynard, 1985,*  
223 *1991; Vereijken, 1989*). It has been suggested that, for such systems to achieve simultaneously high  
224 levels of agronomic, environmental and economic performance, the genotype of the crop must be  
225 adapted to the management system (*Loyce et al., 2008; Rolland et al., 2003*). For example, malting  
226 barley varieties with sustained high yields and suitable grain characteristics for industrial purposes  
227 when grown with smaller amounts of nitrogen would be favored in such systems (*Hirel et al., 2007;*  
228 *Laperche et al., 2007; Araus et al., 2008*).

229 However, the identification and development of such varieties remains challenging, particularly when  
230 several production outputs must be optimized simultaneously. As a complementary approach or to  
231 replace direct selection in target environments, indirect methods based on secondary traits could be  
232 used to identify varieties adapted to conditions of stress (*Sadras and Richards, 2014*). However, this  
233 would require the initial identification of secondary traits associated with high levels of agronomic  
234 performance under stress conditions. Some of the many statistical methods developed for the analysis  
235 of genotypic responses to environmental constraints (e.g. *Brancourt-Hulmel et al., 1997*) can identify  
236 genotypic characteristics associated with favorable or unfavorable genotypic performance under stress  
237 conditions. For example, *Laperche et al. (2008)* used factorial regression models (*Denis, 1988; Denis*  
238 *et al., 1980*) to identify the genetic characteristics of winter wheat associated with tolerance to  
239 nitrogen stress. Some authors have preferred the use of partial least squares regression, due to the



240 strong correlations between explanatory traits (*Vargas et al., 1999*). The identification of these traits  
241 can provide insight into the mechanisms of crop tolerance and guide the development of new  
242 genotypes (*Perlikowski et al., 2014; Plaut, 2003*).

243 In wheat, yield potential, yield components and other plant characteristics have been shown to be  
244 correlated with plant N dynamics (*Kanampiu et al., 1997; Le Gouis et al., 2000; Masclaux-Daubresse*  
245 *et al., 2010; Richards, 2000; Slafer and Araus, 2007*). Specific studies have focused on the  
246 identification of physiological markers or QTL regions explaining tolerance to N stress in wheat  
247 (*Kichey et al., 2007; Laperche et al., 2007*) and physiological traits explaining tolerance to N stress in  
248 maize (*Bänziger et al., 1997; Gallais and Coque, 2005*). Factors associated with the tolerance of N  
249 stress in barley (*Hordeum vulgare L.*), a crop covering almost 20% of the acreage under cereals in  
250 Europe (*Eurostat, 2017*), have been much less studied. Malting varieties of barley are of prime  
251 importance in terms of their economic value and uses in industry (*Malteurs d'Europe, 2017*). In  
252 malting barley, it is important to maintain not only grain yield in conditions of N stress, but also the  
253 characteristics of the grain associated with high malting quality. In France, the leading exporter of  
254 malt worldwide, the malting industry will accept only grains with a protein content of 9.5% to 11.5%  
255 dry matter. Grains with a long axis exceeding 2.5 mm are also preferred for the malting industry  
256 (*Incograin, 2014*). Increasing calibrated yield (the yield of grains more than 2.5 mm long) is a key  
257 objective for farmers, as they receive premium prices for grains meeting the target size threshold. The  
258 maintenance of both calibrated yield and grain protein content under conditions of nitrogen stress are  
259 therefore of prime importance for the development of malting barley production systems with a lower  
260 dependence on N fertilizer use.

261 In this study, we investigated the determinants of nitrogen stress tolerance in 19 winter barley  
262 genotypes of different origins, grown under various N conditions in 12 contrasting site-by-year  
263 combinations. We focused on i) N tolerance and its variability between the genotypes studied, in terms  
264 of calibrated yield and grain protein content, ii) the correlation between traits and N tolerance and iii)  
265 the development of a predictive model relating the selected genotypic traits to nitrogen stress tolerance  
266 for the two outputs considered.

267

## 268           **2. Materials and methods**

### 269                   **2.1. Experimental design**

270 Twelve field trials were conducted over two seasons (2013-2014 and 2014-2015), at seven sites in  
271 northern France. A precise description of the climatic and soil characteristics of the environments is  
272 presented in Table 1.1. At each site, we compared a high-input (HI) system with low-nitrogen and no-  
273 pesticide (LNP) management. For each management system, 19 genotypes were randomized in four  
274 blocks. The plots were 7 to 9.8 m<sup>2</sup> in size, depending on the site. Winter barley was sown at the  
275 optimal date for each region, between October 1 and 22, in both seasons. Similar sowing densities  
276 were used for the two management systems at each site (270 to 320 grains.m<sup>-2</sup>, according to the site).  
277 In the HI management system, nitrogen fertilizer applications were adjusted according to the balance  
278 sheet method (*Rémy and Hébert, 1977*) and the expected yield in the local agricultural conditions. Mean  
279 total N fertilizer rate reached 160 kg N ha<sup>-1</sup> (range: 150 to 183 kg N ha<sup>-1</sup>) in 2013-2014, and 152 kg N  
280 ha<sup>-1</sup> (range: 130 to 180 kg N ha<sup>-1</sup>) in 2014-2015. The N fertilizer was split into two applications, at  
281 Zadoks stage 23 and Zadoks stage 30. The crops were fully protected against disease (1 or 2 fungicide  
282 treatments applied per trial) and lodging (one growth regulator treatment). LNP management involved  
283 the application of 30% less N fertilizer on the two application dates (mean total reduction: 47 kg N ha<sup>-1</sup>  
284 <sup>1</sup>). In this system, no fungicides or growth regulators were applied. However, disease intensity was  
285 very low at the experimental sites. In each trial, disease symptoms covered less than 20% of the leaf  
286 area of no more than 25% of the plants. Nitrogen stress was, thus, the principal factor differing  
287 between the two management systems.

288 Nineteen six-row winter barley genotypes (four registered cultivars, indicated by a letter code and 15  
289 breeding lines, indicated by a number code), provided by three plant-breeding companies, were grown  
290 in each trial. The genotypes, which were in the last or penultimate year before registration, were  
291 chosen on the basis of their genetic diversity, based on the breeders' knowledge.

**2.2. Plant measurements**

292  
293 The agronomic performances of the varieties were assessed in both systems. Yield was measured in  
294 the whole surface of plots with a small-plot harvester after physiological maturity of three replicates  
295 (the last replicated was used to carry out destructive measurements to monitor plant development  
296 during the season). Grain water content and grain protein content were measured on three replicates,  
297 by near-infrared spectroscopy (NIRS; Technicon Infra-Analyser 400, Technicon Instruments  
298 Corporation, Tarrytown, NY, USA). Grain yield was determined for a standard humidity of 0.14 g  
299 H<sub>2</sub>O g<sup>-1</sup>. The proportion of grains more than 2.5 mm large (thereafter called the retention fraction) was  
300 determined in the three replicates with a Sortimat (Pfeuffer GmbH), on a subsample of grain weighing  
301 at least 150 g. The calibrated yield was calculated as the yield of grains with a long axis exceeding 2.5  
302 mm.

303 Genotypic characterization was based on measurement the HI system. In each environment and the  
304 four replicates, total biomass and nitrogen uptake by the aerial parts of the plant were measured at the  
305 end of winter, flowering (stage averaged for all genotypes) and maturity (considering the straw and  
306 ears separately). For the first two sampling dates, three samples (2 rows x 50 cm) were cut at ground  
307 level and collected for each genotype, from a single replicate. At harvest, three 30-stem samples  
308 (including stems and tillers) were collected. These samples were dried for 48 h in an oven at 80°C,  
309 weighed and pooled. The N content of the samples was then analyzed by the Dumas method. Earliness  
310 was assessed by determining flowering date. Post-heading N uptake and dry matter accumulation were  
311 calculated as the difference between the values obtained at harvest and at flowering. The ratio of these  
312 two variables was calculated. Thousand-kernel weight and grain number per square meter were  
313 measured at harvest, on three mechanically harvested plots. Harvest index (HI) was calculated as the  
314 ratio of grain yield to total aboveground biomass at harvest. Nitrogen harvest index was calculated as  
315 the ratio of the N accumulated in the grains and that accumulated in the aboveground biomass at  
316 harvest. N remobilization was measured as described by Barbottin *et al.* (2005). In total, 18 plant  
317 characteristics were defined on the basis of the measurements made in the experimental trials (Table 2.  
318 1).

319

Variable	Units	Model	Mean	SD	Min	Max	Range
EW_DM	t ha <sup>-1</sup>	CYR	0.51	0.08	0.37	0.67	0.30
EW_Nup	kg N ha <sup>-1</sup>	GPR	35.2	1.3	32.3	38.0	5.7
FLO_DM	t ha <sup>-1</sup>	CYR	10.95	0.42	9.85	11.55	1.70
FLO_Nup	kg N ha <sup>-1</sup>	GPR	142.5	4.2	132.5	150.2	17.7
GN	grains.m <sup>-2</sup>	CYR	19445	1498	17012	23290	6278
GN_FLONup	grains.kg N ha <sup>-1</sup>	CYR	137.5	10.3	123.5	164.1	40.5
Har_DM	t ha <sup>-1</sup>	-	15.4	0.5	14.4	16.5	2.1
Harv_Nup	kg N ha <sup>-1</sup>	-	201.7	4.5	192.3	207.9	15.6
Harv_Nup_DM	-	GPR	47.5	7.7	6.7	65.8	28.6
HI	%	CYR	0.56	0.02	0.52	0.60	0.08
NHI	%	GPR	0.84	0.02	0.80	0.88	0.07
Nremobp	%	GPR	0.83	0.03	0.78	0.90	0.12
postH_DM	t ha <sup>-1</sup>	-	4.42	0.45	3.72	5.14	1.42
postH_Nup	kg N ha <sup>-1</sup>	GPR	59.2	5.9	42.7	70.4	27.8
Pre	day	CYR/GPR	122	2	120	126	6
RF	%	-	95.17	3.34	89.93	100.92	10.98
TKW	g.1000seeds <sup>-1</sup>	CYR	41.8	1.9	37.8	44.2	6.4
Y	t ha <sup>-1</sup>	-	9.25	0.31	8.56	9.84	1.28

320

321 **Table 2.1.** Description of the 18 genotypic characteristics measured in the absence of N stress.  
 322 *Model* indicates the model in which the variable was used. CY: calibrated yield, EW\_DM: dry matter  
 323 at the end of winter, EW\_Nup: N uptake at the end of winter, FLO\_DM: dry matter at flowering,  
 324 FLO\_Nup: N uptake at flowering, GN: grain number per square meter, GN\_FLONup: ratio between N  
 325 uptake at flowering and grain number, GPC: grain protein content, Har\_DM: dry matter at harvest,  
 326 Harv\_Nup: N uptake at harvest, HI: harvest index, HNI: nitrogen harvest index, Nremobp: proportion  
 327 of N at flowering translocated to the grain, postH\_DM: dry matter accumulated after heading,  
 328 postH\_Nup: N uptake after heading, Harv\_Nup\_DM: ratio of postH\_Nup to postH\_DM. Pre:  
 329 precocity (earliness), RF: retention fraction, TKW: thousand-kernel weight, Y: yield.

330

### 331 2.3. Characterization of nitrogen stress tolerance

332 In each environment, nitrogen stress tolerance was assessed as the capacity of each genotype to  
 333 maintain its performance under N stress. We calculated the calibrated yield loss ratio (CYR) and the  
 334 grain protein content loss ratio (GPR), as described by *Fischer and Mauer (1978)*, as follows:

$$\begin{cases}
 CYR = 1 - \frac{CY_{LNP}}{CY_{HI}} \times 100 \\
 GPR = 1 - \frac{GP_{LNP}}{GP_{HI}} \times 100
 \end{cases}
 \quad (Eq. 1)$$

335

336 Where  $CY_{HI}$  is the calibrated yield in the HI system,  $GP_{HI}$  is the grain protein content in the HI system,  
 337  $CY_{LNP}$  is the calibrated yield in the low-nitrogen and no-pesticide system and  $GP_{LNP}$  is the grain  
 338 protein content in the low-nitrogen and no-pesticide system.

339 CYR and GPR can be expressed as:

$$340 \quad Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + \varepsilon_{ij} \quad (Eq. 2)$$

341 where  $Y_{ij}$  is either CYR or GPR,  $\mu$  is the mean genotype tolerance observed in the whole  
 342 experiment,  $G_i$  is the mean effect of genotype  $i$ ,  $E_j$  is the mean effect of environment (site x year)  $j$ ,  
 343 and  $\varepsilon_{ij}$  is the observed residual for genotype  $i$  in environment  $j$ . Thus,  $\mu + G_i$  is the mean tolerance of  
 344 the genotype.

345  
 346 Genotypic dynamic stability ( $S_i$ ), was estimated for each genotype ( $G_i$ ), according to Wricke's  
 347 ecovalence, and was calculated as follows:

$$348 \quad S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (G_i \times E_{ij})^2} \quad (Eq. 3)$$

349 Where  $n$  is the total number of environments.

350  
 351 Groups of genotypes with similar stress tolerance in a particular environment were established on the  
 352 basis of hierarchical ascendant cluster analysis (HAC) on observed CYR or GPR values. The HAC  
 353 was based on Euclidean distances between genotypes and Ward's minimum variance clustering  
 354 method (Murtagh and Legendre, 2014). The number of groups was chosen according to the proportion  
 355 of the variability of genotypic tolerance explained. The proportion of the variability explained was  
 356 calculated with a linear model as the sum of squares explained by the factor "group" over the total sum  
 357 of squares.

#### 358 **2.4. Identification of genotypic traits favoring N-stress tolerance**

359 For both CYR and GPR, correlations between mean genotypic tolerance and the trait values measured  
 360 in the plots without N stress at harvest (Table 2.1) were calculated from the values for the 19  
 361 genotypes. We then, modeled mean genotypic tolerance to nitrogen ( $G_i$ ) as a function of genotypic  
 362 traits, as follows:

$$367 \quad G_i = \sum_{k=1}^n \beta_k \text{Trait}_i^k \quad (\text{Eq. 4})$$

363 Where  $G_i$  is the mean tolerance to N stress estimated with Eq. 2 for CYR and GPR;  $\text{Trait}_i^k$  is the  $k^{\text{th}}$   
 364 trait measured for genotype  $i$  in high-input conditions (Table 2. 1),  $\beta_k$  is its impact on mean tolerance  
 365 to N stress and  $n$  is the number of traits considered. We prevented the overrepresentation of variables  
 366 with larger variances, by first centering and reducing the traits.

368 Due to the strong correlations between some traits,  $\beta_k$  was estimated by partial least squares (PLS)  
 369 regression (Wold et al., 1983). Partial least squares regression is an iterative process with three steps.  
 370 First, orthogonal latent variables ( $t_1$  to  $t_p$ ) are constructed as the weighted sums of the original input  
 371 variables (named  $\text{Trait}_i^1, \dots, \text{Trait}_i^k$ ), to maximize the covariance with the dependent variable ( $G_i$ ). The  
 372 dependent variable is then regressed against the latent variables. Finally, the dependent variable is  
 373 expressed in terms of the initial input variables. The number of latent variables retained in the PLS  
 374 model was determined on the basis of the proportion of variability explained by the model and the  $Q^2$   
 375 criterion (Tenenhaus, 1998). This criterion compares the prediction error sum of squares in leave-one-  
 376 out cross-validation of a PLS model with  $n$  latent variables ( $PRESS_n$ ) with the residual sum of squares  
 377 of a PLS model with  $n-1$  latent variables ( $RSS_{n-1}$ ). We introduced the  $n^{\text{th}}$  latent variable if  $\sqrt{PRESS_n} \leq$   
 378  $0.95 \sqrt{RSS_{n-1}}$ .

379 Once the model has been established, the importance of each explanatory variable or predictor to the  
 380 projection can be assessed with the VIP (variable importance in the projection) criterion (Chong and  
 381 Jun, 2005): the higher the VIP, the greater the importance of the variable in the PLS projection.  
 382 Standard errors for the impact on mean tolerance to N stress were estimated by a jackknife resampling  
 383 method (Efron and Tibshirani, 1994).

384 Finally, the ability of the model to rank the genotypes correctly according to their mean CYR or GPR  
 385 value was evaluated by determining Spearman's rank correlation between estimated and the observed  
 386 mean CYR and CPR values.

387 All statistical analyses were performed with R 2.15.3 statistical software (R Core Team, 2013).  
 388 Hierarchical clustering was performed with the *hclust* function of R.

389 **3. Results**390 **3.1. Do performance and stability differ between genotypes for nitrogen stress**  
391 **tolerance?**392 *3.1.1 Calibrated yield loss ratio between non-stress and N-stress situations*

393 The CYR ranged from 14.8 to 35.5%, depending on genotype (  
394 **Figure 2.1a**). There was also considerable between-genotype variability in stability with respect to  
395 environmental conditions (site-year), as shown by the wide range of Wricke's ecovalence values  
396 obtained (from 3.3 to 9.1). The correlation between CYR and the Wricke's ecovalence was strong  
397 (correlation coefficient = 0.59) and significant ( $P$ -value = 0.05- correlation coefficient = 0 and  $P$ -value  
398 = 0.9 when the EST genotype was excluded).

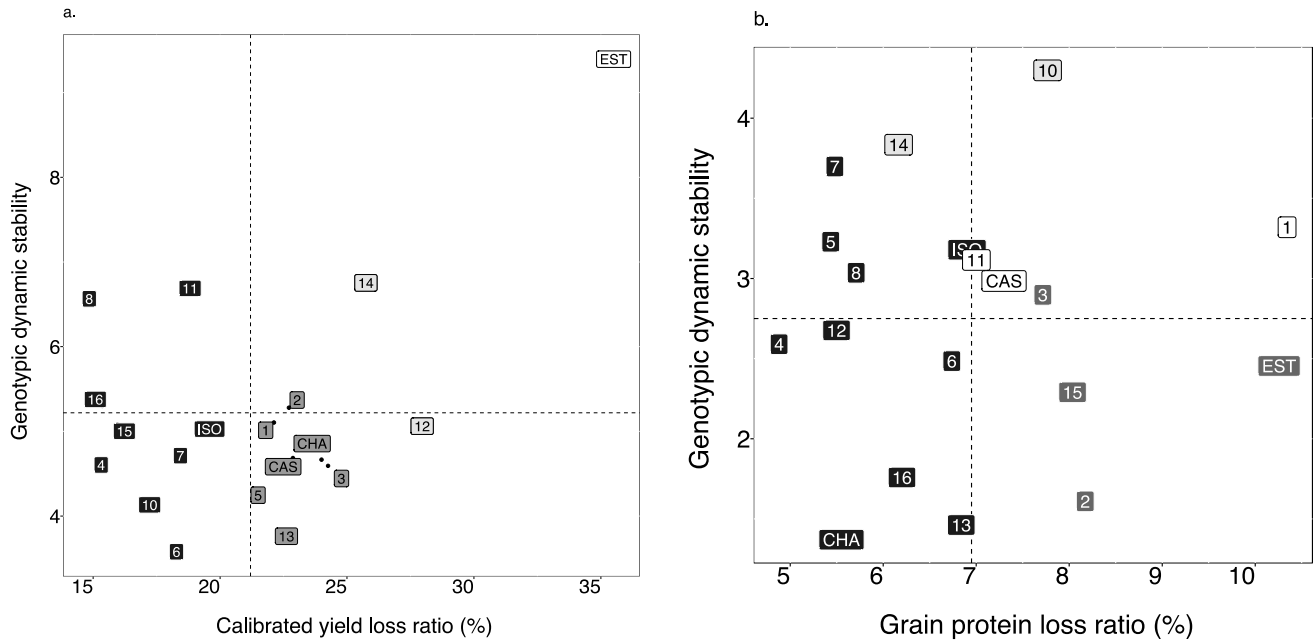
399 Four groups of genotypes clustered according to their CYR values in the different environments.  
400 These groups explained 91.7% of CYR variance and 58.1% of the variance for genotypic stability.  
401 Further division into five groups explained only slightly more (<2% more) of the variance of CYR and  
402 the variance of stability. The groups were structured principally by mean N-stress tolerance. Within  
403 each group, the genotypes displayed different reactions to N stress, depending on the environment  
404 (Fig. S2).

405 Six genotypes had a lower CYR and a lower genotypic CYR variance than the group mean (genotypes  
406 4, 6, 7, 10, 15 and ISO), suggesting that these genotypes had robust mechanisms of N-stress tolerance  
407 for calibrated yield, regardless of the environment considered. These six genotypes belonged to the  
408 same group.

409

410

411 **Figure 2.1.** Genotypic dynamic stability (estimated as Wricke's ecovalence) of 19 barley genotypes,  
 412 according to mean N-stress tolerance for calibrated yield (a) and grain protein content (b). Dotted lines  
 413 indicate mean tolerance or stability for the 19 genotypes. The different colors indicate groups of  
 414 genotypes with similar profiles for calibrated yield ratio (left panel) or grain protein content ratio  
 415 (right panel) in the 12 environments.



416  
 417  
 418

### 3.1.2 Grain protein content ratio between non-stress and N-stress situations

420 GPR ranged from 4.9 to 10.3%, depending on the genotype considered (

421 **Figure 2.1b).** GPC was not very stable in different environmental conditions: the Wricke's ecovalence  
 422 ranged from 1.2 to 4.1. The correlation between Wricke's ecovalence and GPR was very weak  
 423 (correlation coefficient = 0.02) and not significant ( $P$ -value = 0.9). Thus, a genotype with a low GPR  
 424 may have either a low genotypic stability (e.g. genotype 7) or a high stability (e.g. genotype CHA).

425 Genotypes clustered into four groups on the basis of their GPR in the 12 environments. These groups  
 426 explained 60.6% of GPR variance and 43.3% of stability variance. Further division into five groups  
 427 increased the proportion of the GPR variance explained by less than three units, and the percentage  
 428 stability explained by less than 10 points. Genotypic GPR stability varied considerably within each  
 429 group. The lower proportion of variability and stability explained by the groups for GPR than for CYR  
 430 suggests a more diverse response of genotype to environment.



431 Six genotypes had a lower GPR and lower genotypic GPR variance than the group mean (genotypes 4,  
432 6, 12, 13, 16 and CHA), and two of these genotypes also had a lower CYR and lower genotypic CYR  
433 variance than the group mean.

### 434 **3.2. Which genotypic traits favor the maintenance of barley performance under N** 435 **stress?**

#### 436 *3.2.1 Are tolerance to N stress and performance in non-N stress situations* 437 *correlated?*

438 **Higher calibrated yields in the absence of N stress were associated with a lower CYR (**  
439 **Table 2.2- Figure 2.4a).** However, CYR was not correlated with yield in the absence of N stress  
440 (correlation coefficient = 0.07,  $P$ -value>0.10). Similarly, higher retention fractions in the absence of N  
441 stress were associated with a lower CYR.

442 Calibrated yield in the absence of N stress was not correlated with GPR (correlation coefficient = -  
443 0.07,  $P$ -value=0.8), retention fraction (correlation coefficient = 0.13,  $P$ -value=0.6) or nitrogen uptake  
444 at harvest (correlation coefficient=0.0,  $P$ -value=0.72). By contrast, higher grain protein contents in the  
445 absence of N stress were associated with a higher GPR (Figure 2.4b), although considerable variability  
446 was observed between genotypes.

447 Finally, mean CYR and GPR were not significantly correlated (correlation coefficient = 0.41,  $P$ -value  
448 = 0.08), suggesting that these two parameters could potentially be improved simultaneously. There  
449 was also no correlation between Wricke's ecovalence values for CYR and GPR (correlation  
450 coefficient = 0.16,  $P$ -value= 0.5).

#### 451 **3.2.2 Which traits underlie N stress tolerance for calibrated yield?**

452 Based on the  $Q^2$  criterion and the percentage of the variance explained, two latent variables were  
453 retained in the PLS model to explain the mean genotypic CYR in response to N stress in terms of  
454 genotypic traits. A large diversity of trait combinations was observed between genotypes, as suggested  
455 by the projection of genotypes on the first two latent variables (Figure 2.2b). There was a significant  
456 Spearman's rank correlation between the observed and fitted values ( $P$ -value =0.002) with a rho value

457 of 0.67 (Figure 2.2c). The genotypic traits included in the model therefore successfully ranked  
 458 genotypes with a higher CYR and genotypes with a lower CYR than the group mean. Overall, 15  
 459 (79%) genotypes were predicted with an error of less than five CYR points, and 12 (63%) were  
 460 predicted with an error of less than two CYR points. Genotypes less accurately predicted by the PLS  
 461 model (genotypes ISO, EST, CAS, 3 and 4- Figure 2.2c) were present in all four parts of the  
 462 projection (Figure 2.2b).

	Yield	RF	C_Yield	Har_Nup	GPC	CYR	GPR
Yield	1.00						
RF	-0.31	1.00					
C_Yield	0.41	0.74***	1.00				
Har_Nup	0.51*	0.0	0.41■	1.00			
GPC	-0.30	0.42	0.18	0.34	1.00		
CYR	0.07	-0.51**	-0.53**	-0.49*	-0.12	1.00	
GPR	-0.26	0.13	-0.07	0.0	0.65***	0.35	1.00

464

465 **Table 2.2.** Correlation matrix for genotypic grain protein content ratio (GPR), calibrated yield ratio  
 466 (CYR) and the main criteria for productivity measured at harvest in the absence of N stress: yield,  
 467 grain retention fraction (RF), calibrated yield (C\_Yield), harvest N uptake (Har\_Nup) and grain  
 468 protein content (GPC). Symbols indicate the *p*-value: ■ *p*-value <0.10; \* *p*-value <0.05, \*\* *p*-  
 469 value<0.01, \*\*\* *p*-value <0.001

470

	Estimate	Standard error	Pr(> t )
GN	0.873	0.389	0.037
GN_FLONup	0.911	0.425	0.046
TKW	-1.982	1.272	0.136
FLO_DM	0.825	0.560	0.158
Pre	-1.180	0.841	0.178
postH_DM	-1.848	1.369	0.194
EW_DM	-0.627	0.825	0.458
HI	-0.297	0.966	0.762

471

472 **Table 2.3.** Coefficient of the PLS model for estimating calibrated yield ratio. The variable names are  
 473 explained in Table 2.1.

474

475 For the first latent variable ( $Q^2=0.19$ , 45.9% of total CYR variability explained), three genotypic  
 476 characteristics explained most of the sum of squares for CYR (Figure 2.2a). Higher thousand-kernel  
 477 weight (TKW) values were associated with a lower CYR (Table 2.3). By contrast, a higher grain

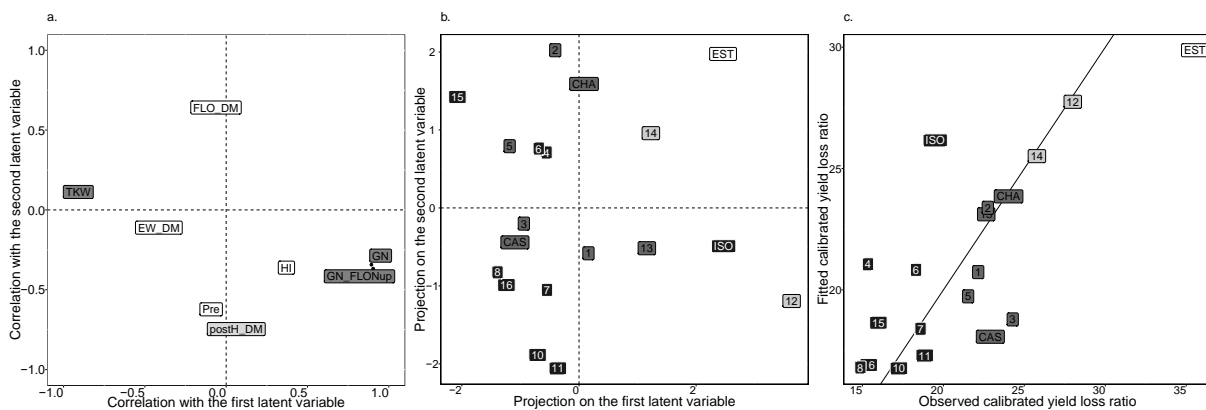
478 number per square meter (GN) and a higher efficiency of grain production per unit N uptake at  
 479 flowering (GN\_FLO\_Nup) were associated with higher CYR values.

480 The second latent variable ( $Q^2=0.04$ , 14.1% of total CYR variability explained) was explained mostly  
 481 by postH\_DM, relatively independently of other genotypic characteristics (Figure 2.2b): the higher the  
 482 postH\_DM value, the lower the CYR (Table 2.3). Two other variables were, however, correlated with  
 483 the second latent variable, but with a lower VIP: earliness was positively correlated and FLO\_DM was  
 484 negatively correlated with postH\_DM for CYR (Figure 2.2a).

485 EW\_DM, HI and FLO\_DM had both lower VIPs and weaker correlations with the first and second  
 486 latent variables (Figure 2.2a).

487 Among the genotypes with a low CYR, genotypes 8, 10 and 16, were located close together on the  
 488 projection biplot and were thus considered to have relatively similar N stress tolerance characteristics.  
 489 They tended to have a high TKW and postH\_DM, and a low GN and GN\_FLO\_Nup. Genotypes 4 and  
 490 8 also had a low CYR, but they were on the opposite side of the projection for the second latent  
 491 variable on PLS regression. Their postH\_DM values were, thus, lower than those for genotypes 8, 10  
 492 and 16.

493



494

495 **Figure 2.2.** Projection of the genotypic traits (a) and genotypes (b) onto the first two latent variables  
 496 and fitted vs. mean calibrated yield ratio of genotypes (c) for the model predicting calibrated yield  
 497 ratio. For panel a, variables in dark gray and light gray made a major contribution ( $VIP>0.9$ ) to the  
 498 construction of the first and second latent variables, respectively. Variables in white made little  
 499 contribution to the construction of the first two latent variables. For panels b and c, the colors  
 500 correspond to the groups defined in section 3.1. The names of the genotypic characteristics are  
 501 described in Table 2.1.

502 **3.3. Which traits underlie N stress tolerance for grain protein content?**

503 The  $Q^2$  criterion was -0.15 and -0.72, and the percentage of total GPC variance explained was 53.3%  
 504 and 1.9% for the first and second latent variables, respectively. The negative  $Q^2$  values suggest that the  
 505 predictive quality of the model for other genotypes may be low. One latent variable was maintained in  
 506 the PLS model. Despite the relatively small proportion of the variance explained, Spearman's  
 507 coefficient for the correlation between observed and fitted GPR values was 0.73 ( $P$ -value < 0.001),  
 508 indicating that the model correctly ranked genotypes according to their mean GPR. Seven genotypes  
 509 (39%) were predicted to have an error of less than 0.5 GPR points, and 14 genotypes (74%) were  
 510 predicted to have an error of less than 1 GPR point. The PLS model gave poor-quality estimates for  
 511 genotypes 13, EST and 1. These genotypes were characterized by particular combinations of traits  
 512 (Figure 2. 3c). Other characteristics not included in the PLS model may explain the tolerance of these  
 513 genotypes to N stress.

514 For GPR, the genotypic characteristics explaining the largest proportion of the sum of squares were N  
 515 uptake at the end of winter (EW\_Nup), and the ratio of N uptake and biomass after flowering  
 516 (postH\_Nup\_DM -Figure 2. 3). Higher EW\_Nup values were associated with lower GPR ( $P$ -value <  
 517 0.15 -Table 2. 4). By contrast, higher postH\_Nup\_DM values were associated with a higher GPR ( $P$ -  
 518 value < 0.20 -Table 2.4). The proportion of N at flowering translocated into the grain, total N uptake  
 519 at flowering, N uptake after heading and NHI did not explain GPR.

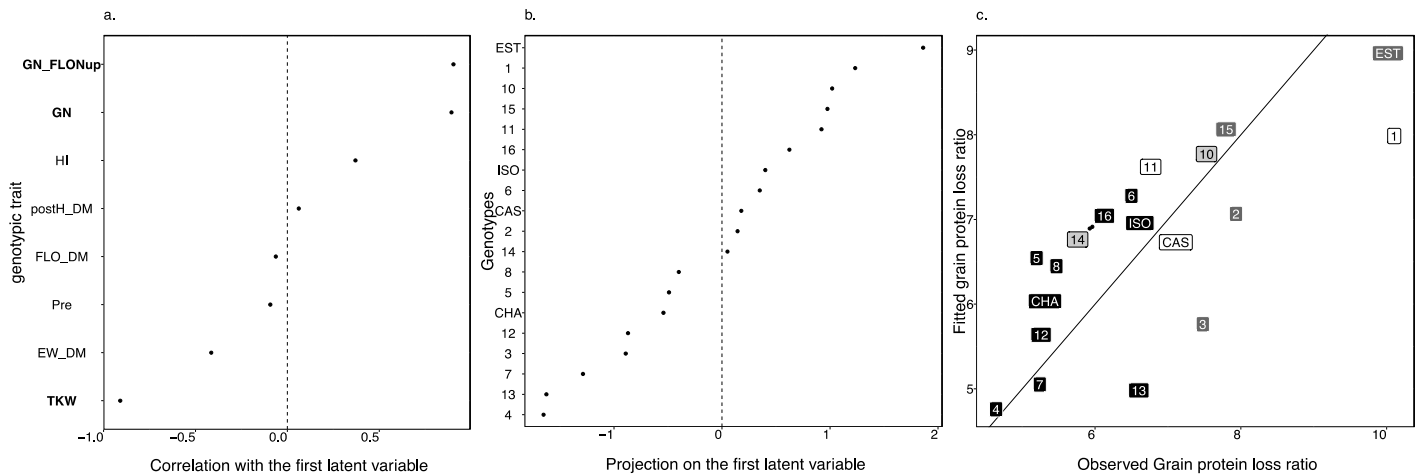
520

	<b>Estimate</b>	<b>Standard error</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
EW_Nup	-0.7034	0.4648	0.15
postH_Nup_DM	0.7434	0.5465	0.19
Pre	0.3738	0.3696	0.33
Nremobp	0.1900	0.3787	0.62
FLO_Nup	0.1463	0.3108	0.64
postH_Nup	0.0994	0.4312	0.82
NHI	0.0428	0.3023	0.89

521

522 **Table 2. 4.** Coefficients of the PLS model estimating grain protein ratio. Standard errors were  
 523 estimated with a jackknife resampling method (Efron and Tibshirani, 1994). The variable names are  
 524 explained in Table 2.1.

525 Genotypes 12 and 7 had negative projections for the first latent variable (Figure 2. 3b) and the model  
 526 correctly predicted their relatively low GPR (Figure 2. 3c). Genotypes 2, 5, and 10 had positive  
 527 projections for the first latent variable and the model correctly predicted their relatively high GPR.  
 528 Among the genotypes with a low GPR, genotypes CHA and 16 were located a long way apart on the  
 529 projection and can thus be considered to have very different characteristics.  
 530  
 531



532 **Figure 2. 3.** Projection of the genotypic traits (a) and genotypes (b) onto the first two latent variables  
 533 and fitted vs. mean calibrated yield ratios of genotypes (c) of the model predicting grain protein ratio.  
 534 For panel a, the variables in dark gray and light gray made a major contribution ( $VIP>0.9$ ) to the  
 535 construction of the first and second latent variables, respectively. Variables in white made little  
 536 contribution to the construction of the first two latent variables. The colors in panels b and c indicate  
 537 the groups defined in section 3.1. The names of the genotypic characteristics are explained in Table  
 538 2.1.

539

## 540 4. Discussion

### 541 4.1. Validity of the results for other genotypes and environments

542 These experimental results were obtained for 19 genotypes bred between 1994 and 2013 and provided  
543 by three different breeders. Unlike *Laperche et al. (2006)*, we did not have access to a pool of  
544 genotypes especially constructed to reflect a range of genotypic reactions to various levels of N stress.  
545 However, the genotypes tested here had diverse characteristics and responses to N stress: CYR and  
546 GPR varied by factors of 2.4 and 2.1, respectively. Furthermore, some genotypes responded  
547 particularly strongly to N stress: EST for CYR, and EST and genotype 1 for GPR. The presence of a  
548 significant genotype x nitrogen interaction for only a few of the genotypes tested was also reported in  
549 a previous study on wheat by *Le Gouis et al. (2000)*.

550 The models presented here explained only part of the total variability of CYR and GPR (60.3 and  
551 50.3%, respectively). However, Spearman's rank correlation between observed and fitted values for  
552 genotypic means for these two variables were significant and strong (coefficients of 0.67 and 0.72,  
553 respectively). We can, therefore, conclude that the models accounted for the principal factors  
554 explaining the variability of these two variables. Indeed, in this study, we chose to build parsimonious  
555 models including only small numbers of explanatory variables selected on the basis of published  
556 findings. Furthermore, we built our models with a number of latent variables based on  $Q^2$ , an indicator  
557 of the predictive quality of the model. This prevented overfitting of the model to the data. The model  
558 analyzing GPR had a lower predictive quality (negative  $Q^2$ ) than that for CYR. The results presented  
559 should, therefore, be more dependent on the set of genotypes included in the analysis than those for  
560 CYR.

561 We focused here principally on mean calibrated yield loss ratio and mean grain protein content loss  
562 ratio between N-stress and non-stress conditions, based on data for 12 environments. Considerable  
563 variation was observed in the agronomic performances of genotypes between sites and years, as  
564 assessed by Wricke ecovalence (

565 **Figure 2.1**). N responses are complex traits, which may follow inconsistent trends over years and sites  
566 (*Chen et al., 2004; Hirel et al., 2001*). Our results thus represent a first step towards understanding the

567 mechanism of N stress tolerance in barley. Analyses of the genotypic traits associated with high  
568 agronomic performance in each environment (*as in Hammami et al., 2017*) would provide additional  
569 insight and confirm these findings.

#### 570 **4.2. Yield potential and tolerance to nitrogen stress**

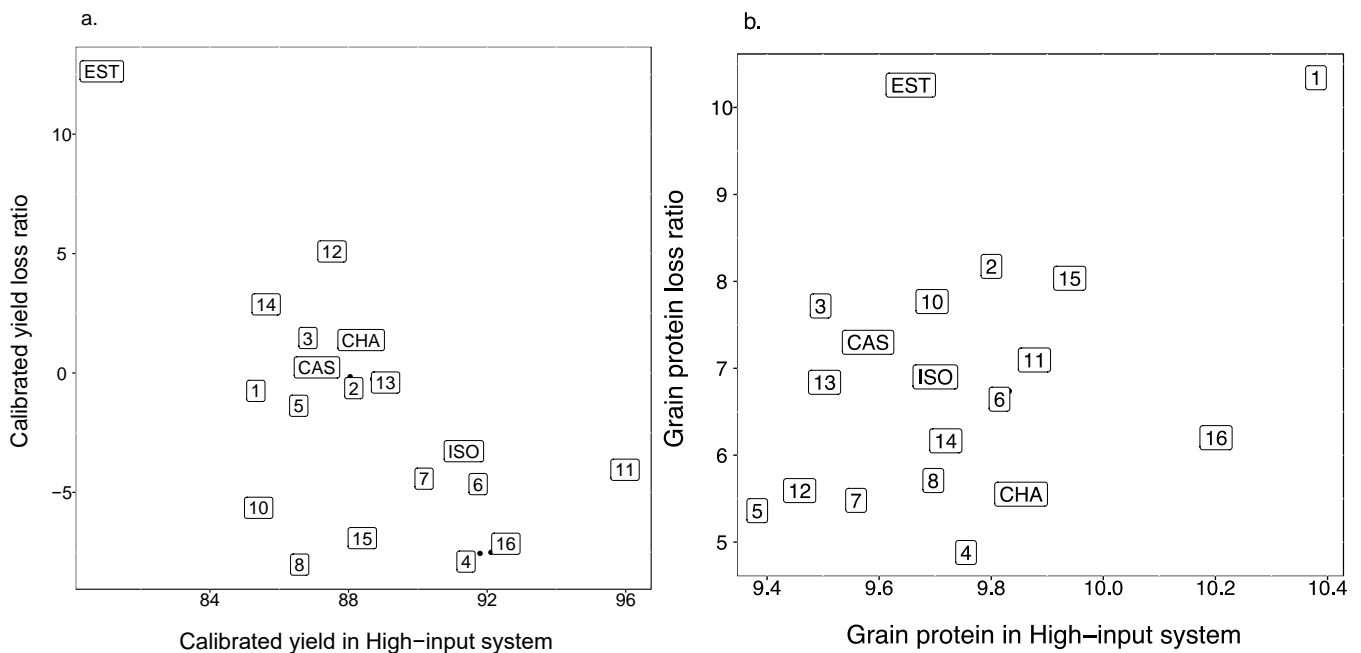
571 We found that higher calibrated yields in HI situations were associated with lower relative calibrated  
572 yield losses under nitrogen stress (correlation coefficient = - 0.53, *P*-value= 0.01). These results are  
573 complementary to those of other studies focusing principally on the correlation between yield in  
574 situations with and without stress. For example, *Ortiz-Monasterio et al., (1997)* for wheat, and  
575 Abeledo et al., (2003) for barley found that genetic increases in yield potential were associated with  
576 higher yields in conditions of nitrogen deficiency. Similar results have also been reported for other  
577 types of stress. For example, *Sadras et al. (2013)* demonstrated that, for a collection of field peas in  
578 Australia, yield under favorable conditions was positively correlated with yield under water and heat  
579 stress. Various studies have thus shown that genetic progress in yield potential (i.e. increases in yield  
580 in favorable environments) should continue to contribute to yield increases in less favorable growing  
581 environments (e.g. *Reynolds, 2001*). Our findings demonstrate that, for winter barley, tolerance to N  
582 stress also increases with yield potential (Figure 2.4a).

583 However, some authors have reported different types of relationship between performances in the  
584 presence and absence of stress. For example, *Peltonen-Sainio et al. (2011)* found, in spring cereals,  
585 that plasticity (i.e. the amount by which the expression of individual characteristics of a genotype is  
586 changed by different environments) was associated with a capacity to benefit from highly favorable  
587 conditions, but was unrelated to yield in stressful conditions. However, these authors considered a type  
588 of stress different from that considered here, as they defined stress and non-stress situations on the  
589 basis of yield. Similarly, for a set of sunflower hybrids in Argentina, high yield plasticity was  
590 associated with high yield under favorable conditions but unrelated to yield under stress (*Sadras et al.,*  
591 *2009*). Finally, *Peltonen-Sainio et al. (2011)* also found that winter cereal yield in favorable  
592 environments was negatively correlated with yield in stressful environments. Precise studies, including

593 a characterization of the type of stress environment seem to be required, to develop a clear  
 594 understanding of the relationship between yield and stress tolerance.

595 Overall, higher grain protein content in HI situations was found to be associated with a higher relative  
 596 grain protein content loss ratio under nitrogen stress (correlation coefficient = 0.65,  $P$  value <0.002),  
 597 as reported by *Bertholdsson (1999)*. *Bertholdsson* also found that, of the seven malting barley cultivars  
 598 tested, the four with stable grain protein contents had lower mean GPC values (mean = 11.7) than the  
 599 less stable cultivars (mean GPC =12.7). Both these previous studies were based on malting barley  
 600 genotypes bred for a relatively low grain protein content. In our study, the mean grain protein content  
 601 of the genotypes in HI situations ranged from 9.9% to 10.9%. This highlights the risk, in situations of  
 602 N limitation, of genotypes falling below the lower threshold for grain protein content for malting, as  
 603 shown in Figure 2.4b.

604



605 **Figure 2.4.** Performances in the high-input system vs. relative performance loss in N stress situations  
 606 for a) calibrated yield (t.ha<sup>-1</sup>) and b. grain protein content (%)

607 **4.3. Genotypic characteristics favoring high N-stress tolerance for calibrated yield**

608 The principal genotypic characteristics affecting calibrated yield ratio (TKW, GN, postH\_DM, and  
 609 GN\_FLO and, to a lesser extent, earliness) were similar to those reported to affect yield plasticity in  
 610 winter cereals by *Peltonen-Sainio et al. (2011)*. Our results suggest that much of the environmental



611 responsiveness of calibrated yield in situations of N stress is mediated by the trade-off between grain  
612 number and thousand-kernel weight. These two variables are highly interdependent: the number of  
613 grains per square meter defines the maximum possible kernel weight (*Brancourt-Hulmel et al., 1999;*  
614 *Fleury and Limaux, 1987; Leterme et al., 1994*). The trade-off between kernel weight and grain  
615 number depends on genotype (*Brancourt-Hulmel et al., 1999*). Not all tillers produce spikes, and  
616 many tillers abort before anthesis (*Gallagher et al., 1975*). Several studies (e.g *Masle-Meynard and*  
617 *Sebillotte, 1981*) have shown that early N deficiency prevents the emergence of tillers and the growth  
618 of developing tillers, thereby reducing spike and grain number per square meter.

619 Early N stress, through N deficiency in particular, can thus decrease potential grain number, as  
620 demonstrated by the positive correlation observed here between the capacity to produce a large  
621 number of grains with a particular amount of N at flowering, and the number of grains. In our  
622 experiment, smaller grain numbers were associated with a higher kernel weight. In the presence of N  
623 stress, the compensation between kernel weight and grain number seemed to be incomplete. Cereal  
624 yield is limited principally by sink strength during grain filling (*Araus et al., 2008*). Our results  
625 therefore suggest that sink strength decreases more strongly in response to N deficiency in genotypes  
626 with lower potential thousand-kernel weights than in those with high potential thousand-kernel  
627 weights. Furthermore, genotypes with a high dry matter accumulation capacity after flowering had a  
628 low CYR. By contrast, under terminal stress, due to drought, for example, an increase in genotypic  
629 grain number per spike can result in a higher yield (*Denčić et al., 2000*). This result suggests that it  
630 may be difficult to develop genotypes tolerant to several different types of stress.

#### 631 **4.4. Genotypic characteristics favoring high N-stress tolerance in terms of grain** 632 **protein content**

633 **Grain N accumulation in cereals is regulated source-regulated, and this regulation depends on**  
634 **genotype (*Dreccer et al., 1997; Martre, 2003*). Various studies have shown that grain N in cereals is**  
635 **strongly correlated with both N uptake after anthesis and the remobilization of N stored before**  
636 **anthesis. Our findings suggest that the capacity of the plant to absorb nitrogen is a crucial importance**  
637 **for achieving a low GPR: the higher N uptake at flowering, the lower the GPR (**

638 Table 2.2). Moreover, N uptake at the end of winter seemed to be one of the main factors explaining  
639 GPR in the PLS model (Table 2. 4). The importance of N uptake for tolerance to N stress has already  
640 been suggested, for wheat, by *Ortiz-Monasterio R. et al. (1997)* and *Le Gouis et al. (2000)*. *Le Gouis*  
641 *et al. found* that N uptake efficiency accounted for the variation in N use efficiency to a greater extent  
642 in conditions of N limitation than in non-stress situations. These findings suggest that, in conditions of  
643 N scarcity, the ability to absorb N is of paramount importance. This ability may reflect root  
644 characteristics, and the plant material tested here may have displayed differences in ability to explore  
645 the soil or to absorb N. However, in our study, N uptake at the end of winter was not significantly  
646 correlated with the relative loss of N uptake (correlation coefficient=0.26, *P*-value= 0.28), or with  
647 relative yield loss (correlation coefficient=-0.5, *P*-value=0.8).

648 N remobilization and N uptake after flowering did not seem to be important factors determining GPR.  
649 Both these factors were only weakly correlated with the latent variable retained in the model. We  
650 found that higher ratios of post heading N uptake to post-heading dry matter accumulation  
651 (postH\_Nup\_DM) were associated with a higher GPR. The trade-off between post-heading N uptake  
652 and post-heading dry matter production was analyzed by *Kichey et al. (2007)*, who found a negative  
653 correlation between grain N and leaf senescence. They concluded that the propensity for low levels of  
654 leaf senescence of genotypes was negatively correlated to grain N content. In our study,  
655 post\_H\_Nup\_DM was not significantly correlated with grain protein content in non-stress situations  
656 (correlation coefficient=0.25, *P*-value=0.3). However, this variable tended to be negatively correlated  
657 with relative loss of N uptake at harvest (correlation coefficient=-0.39, *P*-value=0.09, *not shown*) and  
658 relative yield loss (correlation coefficient=-0.33, *P*-value=0.10, *not shown*).

#### 659 **4.5. Can high levels of stable genotypic tolerance for calibrated yield and grain** 660 **protein content under N stress be combined?**

661 Mean relative calibrated yield loss and grain protein content loss were not highly correlated  
662 (correlation coefficient=0.35, *P*-value=0.1). The accumulation of N and that of carbohydrates in the  
663 grain are not strongly dependent on each other (*Jenner et al., 1991; Martinez-Carrasco and Thorne,*  
664 *1979*). It should therefore be possible to improve both these criteria simultaneously. Genotypes 4 and

665 6 had a low CYR and GPR, and they performed well in the high-input system (Figure 2.4). The  
666 genotype characteristics favoring low losses for the two criteria were different, with no strong negative  
667 correlation between them.

668 For calibrated yield, there was no correlation (if EST was excluded) between mean loss and stability.  
669 The breeding of genotypes with a low and stable mean CYR therefore appears possible. Genotypes 4,  
670 6 and 10, for example, had both a CYR below 18% and a lower Wricke's ecovalence than the other  
671 genotypes. However, for grain protein content loss, the correlation between the mean value and  
672 stability was weak. Moreover, genotypic stability was lower than the mean GPR value. Specific  
673 genotypic characteristics are probably required to achieve a low GPR, according to the site and year  
674 concerned.

#### 675 **4.6. Applications for indirect breeding**

676 The results of this study could be used as a basis for the development of indirect breeding methods in  
677 malting barley, to identify genotypes adapted to both conditions of nitrogen abundance and nitrogen  
678 stress. However, this would require the genotypic traits used as indicators of N-stress tolerance to be  
679 easily measurable by breeders. For the development of a practical application for breeders, more  
680 precise studies of the trade-off between genotypic characteristics facilitating the simultaneous  
681 maintenance of yield and grain protein content in conditions of N stress are required. Moreover, a high  
682 heritability of these traits is preferable, to prevent inconsistencies in the values of traits between  
683 environments.

684 Finally, our findings provide a description of the precise relationships between physiological traits and  
685 agronomic performance in conditions of N stress. These results could be used as a basis for defining  
686 malting barley ideotypes adapted to low nitrogen inputs.

687

688

689

690

691 **Conclusion**

692 We studied the genotypic traits favorable to N tolerance, using data from multisite trials. We evaluated  
693 the relative calibrated yield loss ratio (CYR) and the grain protein content loss ratio (GPR) between  
694 situations with and without N stress, for winter malting barley genotypes. We found that i) higher  
695 calibrated yields in the absence of N stress were associated with a lower CYR, ii) high thousand-  
696 kernel weight and dry matter accumulation after heading were associated with a low CYR, whereas  
697 the reverse was true for grain number per square meter, iii) higher grain protein content in non-N stress  
698 situation was associated with a higher GPR, iv) a high capacity to accumulate N early in the crop cycle  
699 and a high ratio of nitrogen uptake to biomass production after flowering favored a low GPR. Relative  
700 calibrated yield loss and relative grain protein content loss were not significantly correlated. These two  
701 criteria could, therefore, potentially be optimized simultaneously. These findings could serve as the  
702 basis for the innovative development of barley cultivars more tolerant to N stress, in terms of both  
703 quantitative and qualitative performance. They could open up new possibilities for defining malting  
704 barley ideotypes adapted to low nitrogen inputs.

705

706

**Acknowledgments**

This work was supported by a grant from the French Ministry of Agriculture (CASDAR Eco2malt).  
We thank the technical team of UMR Agronomie, Florimond-Desprez and KWS-Mommont for  
assistance with the experiment.

707

708

709

710

711

712

713

714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724

**Supplementary material:**

**Fig. S1.**

Correlation between the physiological traits characterizing the 19 genotypes used to explain calibrated yield loss ratio (a) and grain protein loss ratio (b). The names of the variables are explained in Table 2.1.

a.

	EW_DM	FLO_DM	HI	GN	GN_FLONup	postH_DM	Pre
TKW	0.08	0.02	-0.27	-0.86	-0.87	-0.17	0
EW_DM		0.24	-0.01	-0.06	-0.13	-0.04	-0.05
FLO_DM			-0.35	0.18	-0.1	-0.25	-0.53
HI				0.37	0.47	-0.2	0.15
GN					0.93	0.32	-0.1
GN_FLONup						0.3	-0.06
postH_DM							0.24

b.

	Nremobp	NHI	postH_Nup	postH_Nup_DM	EW_Nup	FLO_Nup
Pre	0.68	0.25	0.12	-0.41	-0.41	-0.2
Nremobp		0.56	0.13	-0.32	-0.12	-0.23
NHI			0.41	-0.05	0.03	-0.3
postH_Nup				-0.15	-0.26	-0.66
postH_Nup_DM					0	0.22
EW_Nup						0.53

725  
726  
727  
728  
729

730 **Literature**

- 731  
732 Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A., 2003. Genetic improvement of barley yield potential and  
733 its physiological determinants in Argentina (1944–1998). *Euphytica* 130, 325–334.  
734 doi:10.1023/A:1023089421426
- 735 Araus, J.L., Slafer, G.A., Royo, C., Serret, M.D., 2008. Breeding for Yield Potential and Stress  
736 Adaptation in Cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 27, 377–412. doi:10.1080/07352680802467736
- 737 Bänziger, M., Betrán, F.J., Lafitte, H.R., 1997. Efficiency of high-nitrogen selection environments for  
738 improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37, 1103–1109.
- 739 Barbotin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.-H., 2005. Nitrogen Remobilization during  
740 Grain Filling in Wheat. *Crop Sci.* 45, 1141. doi:10.2135/cropsci2003.0361
- 741 Bertholdsson, N., 1999. Characterization of malting barley cultivars with more or less stable grain  
742 protein content under varying environmental conditions. *Eur. J. Agron.* 10, 1–8.  
743 doi:10.1016/S1161-0301(98)00043-4
- 744 Beillouin D., 2017. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et culturaux en orge d'hiver  
745 brassicole pour des conduites culturales à bas niveau d'intrants : approche par expérimentation et  
746 modélisation. PhD thesis, AgroParistech-INRA-Paris-France
- 747 Bogard, M., Allard, V., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Machet, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Gate, P.,  
748 Martre, P., Le Gouis, J., 2010. Deviation from the grain protein concentration–grain yield negative  
749 relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat. *J. Exp. Bot.* 61, 4303–  
750 4312. doi:10.1093/jxb/erq238
- 751 Brancourt-Hulmel, M., Biarnès-Dumoulin, V., Denis, J., 1997. Points de repère dans l'analyse de la  
752 stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes. *Agronomie* 17, 219–246.
- 753 Brancourt-Hulmel, M., Lecomte, C., Meynard, J.-M., 1999. A Diagnosis of Yield-Limiting Factors on  
754 Probe Genotypes for Characterizing Environments in Winter Wheat Trials. *Crop Sci.* 39, 1798.  
755 doi:10.2135/cropsci1999.3961798x
- 756 Chen, C., Westcott, M., Neill, K., Wichman, D., Knox, M., 2004. Row configuration and nitrogen  
757 application for barley–pea intercropping in Montana. *Agron. J.* 96, 1730–1738.
- 758 Chong, I.-G., Jun, C.-H., 2005. Performance of some variable selection methods when  
759 multicollinearity is present. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 78, 103–112.  
760 doi:10.1016/j.chemolab.2004.12.011
- 761 Cox, M.C., Qualset, C.O., Rains, D.W., 1985. Genetic variation for nitrogen assimilation and  
762 translocation in wheat. I. Dry matter and nitrogen accumulation. *Crop Sci.* 25, 430–435.
- 763 DeLonge, M.S., Miles, A., Carlisle, L., 2016. Investing in the transition to sustainable agriculture.  
764 *Environ. Sci. Policy* 55, 266–273. doi:10.1016/j.envsci.2015.09.013
- 765 Denčić, S., Kastori, R., Kobiljski, B., Duggan, B., 2000. Evaluation of grain yield and its components  
766 in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphytica* 113, 43–52.
- 767 Denis, J. baptiste, 1988. Two way analysis using covarites1. *Statistics* 19, 123–132.
- 768 Denis, J., Gouet, J., Tranchefort, J., 1980. [Methods for studying the structure of genotype-  
769 environment interaction: application to the analysis of soft wheat variety trials]. *Biom. Fr.*
- 770 Dreccer, M., Grashoff, C., Rabbinge, R., 1997. Source-sink ratio in barley (*Hordeum vulgare* L.)  
771 during grain filling: effects on senescence and grain protein concentration. *Field Crops Res.* 49,  
772 269–277.
- 773 Efron, B., Tibshirani, R.J., 1994. An introduction to the bootstrap. CRC press. Boca Raton, FL:  
774 Chapman & Hall.
- 775 Erisman, J.W., Galloway, J.N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N.B., Petrescu, A.M.R., Leach, A.M.,  
776 de Vries, W., 2013. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philos.*  
777 *Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20130116–20130116. doi:10.1098/rstb.2013.0116
- 778 Fischer, R., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses.  
779 *Aust. J. Agric. Res.* 29, 897–912.
- 780 Fleury, A., Limaux, F., 1987. Comment la comparaison globale de nombreux essais a pu conduire à

- 781 des références régionales pour le blé en Lorraine. *BTI* 417, 95–110.
- 782 Gallagher, J.N., Biscoe, P.V., Scott, R.K., 1975. Barley and its Environment. V. Stability of Grain  
783 Weight. *J. Appl. Ecol.* 12, 319. doi:10.2307/2401735
- 784 Gallais, A., Coque, M., 2005. Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: a  
785 synthesis. *Maydica* 50, 531.
- 786 Good, A.G., Johnson, S.J., De Pauw, M., Carroll, R.T., Savidov, N., Vidmar, J., Lu, Z., Taylor, G.,  
787 Stroehrer, V., 2007. Engineering nitrogen use efficiency with alanine aminotransferase. *Can. J. Bot.*  
788 85, 252–262. doi:10.1139/B07-019
- 789 Hammami, Z., Gauffreteau, A., BelhajFraj, M., Sahli, A., Jeuffroy, M.-H., Rezgui, S., Bergaoui, K.,  
790 McDonnell, R., Trifa, Y., 2017. Predicting yield reduction in improved barley (*Hordeum*  
791 *vulgare* L.) varieties and landraces under salinity using selected tolerance traits. *Field Crops*  
792 *Res.* 211, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.018>
- 793 Hirel, B., Bertin, P., Quilleré, I., Bourdoncle, W., Atagnant, C., Dellay, C., Gouy, A., Cadiou, S.,  
794 Retailiau, C., Falque, M., others, 2001. Towards a better understanding of the genetic and  
795 physiological basis for nitrogen use efficiency in maize. *Plant Physiol.* 125, 1258–1270.
- 796 Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., Gallais, A., 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency  
797 in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within  
798 integrated approaches. *J. Exp. Bot.* 58, 2369–2387.
- 799 Incograin, 2014. Addendum technique N<sup>o</sup>IV pour la vente des orges de brasseries.
- 800 Jenner, C., Ugalde, T., Aspinall, D., 1991. The physiology of starch and protein deposition in the  
801 endosperm of wheat. *Funct. Plant Biol.* 18, 211–226.
- 802 Kanampiu, F.K., Raun, W.R., Johnson, G.V., 1997. Effect of nitrogen rate on plant nitrogen loss in  
803 winter wheat varieties 1. *J. Plant Nutr.* 20, 389–404.
- 804 Kichey, T., Heumez, E., Pocholle, D., Pageau, K., Vanacker, H., Dubois, F., Le Gouis, J., Hirel, B.,  
805 2006. Combined agronomic and physiological aspects of nitrogen management in wheat highlight a  
806 central role for glutamine synthetase. *New Phytol.* 169, 265–278.
- 807 Kichey, T., Hirel, B., Heumez, E., Dubois, F., Le Gouis, J., 2007. In winter wheat (*Triticum aestivum*  
808 L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and  
809 nitrogen physiological markers. *Field Crops Res.* 102, 22–32. doi:10.1016/j.fcr.2007.01.002
- 810 Kraiser, T., Gras, D.E., Gutiérrez, A.G., González, B., Gutiérrez, R.A., 2011. A holistic view of  
811 nitrogen acquisition in plants. *J. Exp. Bot.* 62, 1455–1466.
- 812 Laperche, A., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Gardet, O., Gouis, J.L., 2006. Estimation of genetic  
813 parameters of a DH wheat population grown at different N stress levels characterized by probe  
814 genotypes. *Theor. Appl. Genet.* 112, 797–807. doi:10.1007/s00122-005-0176-z
- 815 Laperche, A., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Gardet, O., Hanocq, E., Devienne-Barret, F., Le  
816 Gouis, J., 2007. Using genotype × nitrogen interaction variables to evaluate the QTL involved in  
817 wheat tolerance to nitrogen constraints. *Theor. Appl. Genet.* 115, 399–415. doi:10.1007/s00122-  
818 007-0575-4
- 819 Laperche, A., Le Gouis, J., Hanocq, E., Brancourt-Hulmel, M., 2008. Modelling nitrogen stress with  
820 probe genotypes to assess genetic parameters and genetic determinism of winter wheat tolerance to  
821 nitrogen constraint. *Euphytica* 161, 259–271. doi:10.1007/s10681-007-9433-3
- 822 Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., Garnier, J., 2014. 50 year trends in nitrogen use  
823 efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to  
824 cropland. *Environ. Res. Lett.* 9, 105011.
- 825 Le Gouis, J., Béghin, D., Heumez, E., Pluchard, P., 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and  
826 nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *Eur. J. Agron.* 12, 163–173. doi:10.1016/S1161-  
827 0301(00)00045-9
- 828 Leterme, P., Manichon, H., Roger-Estrade, J., Buisson, O., 1994. Analyse intégrée des rendements du  
829 blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais.  
830 *Agronomie* 14, 341–361.
- 831 Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H.,  
832 Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D.,

- 833 Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2008. Interaction between  
834 cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Prot.* 27,  
835 1131–1142. doi:10.1016/j.cropro.2008.02.001
- 836 Martinez-Carrasco, R., THORNE, G.N., 1979. Physiological factors limiting grain size in wheat. *J.*  
837 *Exp. Bot.* 30, 669–679.
- 838 Martre, P., 2003. Modeling Grain Nitrogen Accumulation and Protein Composition to Understand the  
839 Sink/Source Regulations of Nitrogen Remobilization for Wheat. *PLANT Physiol.* 133, 1959–1967.  
840 doi:10.1104/pp.103.030585
- 841 Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., Suzuki, A.,  
842 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and  
843 productive agriculture. *Ann. Bot.* 105, 1141–1157.
- 844 Masle-Meynard, J., Sebillotte, M., 1981. Etude de l'hétérogénéité d'un peuplement de blé d'hiver. II.-  
845 Origine des différentes catégories d'individus du peuplement; éléments de description de sa  
846 structure. *Agronomie* 1, 217–224.
- 847 Meynard, J.-M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. PhD  
848 thesis- INA-PG-France
- 849 Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982. Analysis and Interpretation of Factors Which  
850 Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization1. *Agron. J.* 74, 562.  
851 doi:10.2134/agronj1982.00021962007400030037x
- 852 Murtagh, F., Legendre, P., 2014. Ward's hierarchical agglomerative clustering method: which  
853 algorithms implement ward's criterion? *J. Classif.* 31, 274.
- 854 Ortiz-Monasterio R., J.I., Sayre, K.D., Rajaram, S., McMahan, M., 1997. Genetic Progress in Wheat  
855 Yield and Nitrogen Use Efficiency under Four Nitrogen Rates. *Crop Sci.* 37, 898.  
856 doi:10.2135/cropsci1997.0011183X003700030033x
- 857 Paponov, I., Aufhammer, W., Kaul, H.-P., Ehmele, F.-P., 1996. Nitrogen efficiency components of  
858 winter cereals. *Eur. J. Agron.* 5, 115–124. doi:10.1016/S1161-0301(96)02015-1
- 859 Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Sadras, V., 2011. Phenotypic plasticity of yield and agronomic  
860 traits in cereals and rapeseed at high latitudes. *Field Crops Res.* 124, 261–269.
- 861 Perlikowski, D., Kosmala, A., Rapacz, M., Kościelniak, J., Pawłowicz, I., Zwierzykowski, Z., 2014.  
862 Influence of short-term drought conditions and subsequent re-watering on the physiology and  
863 proteome of *Lolium multiflorum*/*Festuca arundinacea* introgression forms, with contrasting levels  
864 of tolerance to long-term drought. *Plant Biol.* 16, 385–394.
- 865 Plaut, Z., 2003. Plant exposure to water stress during specific growth stages, *Encyclopedia of Water*  
866 *Science.* Taylor & Francis New York.
- 867 R Core Team, 2013. R Development Core Team (2013). R: A language and environment for statistical  
868 computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL  
869 <http://www.R-project.org>. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 870 Reynolds, M., 2001. Application of physiology in wheat breeding. *Cimmyt.*
- 871 Richards, R., 2000. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *J. Exp.*  
872 *Bot.* 51, 447–458.
- 873 Rolland, B., Bouchard, C., Loyce, C., Meynard, J.-M., Guyomard, H., Lonne, P., Doussinault, G.,  
874 2003. Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre:  
875 une alternative pour concilier économie et environnement. *Courr. Environ. INRA* 49, 47–62.
- 876 Sadras, V., Lake, L., Leonforte, A., McMurray, L., Paull, J., 2013. Screening field pea for adaptation  
877 to water and heat stress: associations between yield, crop growth rate and seed abortion. *Field*  
878 *Crops Res.* 150, 63–73.
- 879 Sadras, V., Reynolds, M., De la Vega, A., Petrie, P., Robinson, R., 2009. Phenotypic plasticity of yield  
880 and phenology in wheat, sunflower and grapevine. *Field Crops Res.* 110, 242–250.
- 881 Sadras, V.O., Richards, R.A., 2014. Improvement of crop yield in dry environments: benchmarks,  
882 levels of organisation and the role of nitrogen. *J. Exp. Bot.* 65, 1981–1995. doi:10.1093/jxb/eru061
- 883 Slafer, G., Araus, J., 2007. Physiological traits for improving wheat yield under a wide range of  
884 conditions. *Frontis* 21, 145–154.



- 885 Spaner, D., Todd, A.G., McKenzie, D.B., 2001. The Effect of Seeding Rate and Nitrogen Fertilization  
886 on Barley Yield and Yield Components in a Cool Maritime Climate. *J. Agron. Crop Sci.* 187, 105–  
887 110. doi:10.1046/j.1439-037X.2001.00507.x
- 888 Spiertz, J., 2010. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.*  
889 30, 43–55.
- 890 Tenenhaus, M., 1998. *La régression PLS: théorie et pratique*. Editions Technip, Paris.
- 891 Vargas, M., Crossa, J., van Eeuwijk, F.A., Ramirez, M.E., Sayre, K., 1999. Using partial least squares  
892 regression, factorial regression, and AMMI models for interpreting genotype× environment  
893 interaction. *Crop Sci.* 39, 955–967.
- 894 Vereijken, P., 1989. Experimental systems of integrated and organic wheat production. *Agric. Syst.*  
895 30, 187–197. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(89\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0308-521X(89)90046-2)
- 896 Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger,  
897 W.H., Tilman, D.G., 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and  
898 consequences. *Ecol. Appl.* 7, 737–750.
- 899 Wold, S., Martens, H., Wold, H., 1983. The multivariate calibration problem in chemistry solved by  
900 the PLS method, in: *Matrix Pencils*. Springer, pp. 286–293.
- 901
- 902
- 903
- 904
- 905
- 906
- 907
- 908
- 909
- 910
- 911
- 912
- 913
- 914
- 915
- 916
- 917
- 918
- 919
- 920
- 921
- 922
- 923
- 924
- 925
- 926
- 927

928  
929  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939

940  
941 **Azodyn-Orge, un modèle de culture pour prédire le**  
942 **rendement, la teneur en protéine et le calibrage des**  
943 **génotypes d'orge d'hiver brassicole au sein**  
944 **d'environnements contrastés**

945  
946  
947  
948  
949  
950  
951

*“We have no idea about the 'real' nature of things ...  
The function of modeling is to arrive at descriptions which are useful”.*

*Richard Bandler and John Grinder. (1979)*

952  
953  
954  
955  
956  
957

958

959

960

## 961 **Résumé**

962 Les performances quantitatives et qualitatives de l'orge sont très largement dépendantes des conduites  
963 techniques, des génotypes et de leurs interactions. Les expérimentations ne permettent, avec les moyens  
964 disponibles, de ne tester qu'une partie de la variabilité génétique et les génotypes sont testés dans un  
965 nombre limité de milieux. Dans la littérature différents auteurs ont montré que les modèles de culture  
966 peuvent être utiles pour identifier et classer les caractéristiques des génotypes et des itinéraires  
967 techniques les plus adaptés à l'obtention de performances agronomiques élevées dans une diversité  
968 d'environnements.

969 Sur la base d'un modèle de culture existant en blé, nous avons développé un modèle orge permettant de  
970 prendre en compte les effets des caractéristiques génotypiques, de l'itinéraire technique et des  
971 conditions pédo-climatiques sur la production d'orge brassicole.

972 Cette étude s'est focalisée sur les questions suivantes :

973

- 974 • Quels paramètres du modèle de culture Azodyn-blé sont à adapter pour prédire le  
975 rendement et la teneur en protéines des orges brassicoles dans une diversité  
976 d'environnements ?
- 977 • Comment intégrer au modèle Azodyn un formalisme pour prédire le calibrage des grains ?
- 978 • Quelle qualité prédictive et quelle capacité de classement permet le modèle de culture  
979 Azodyn-orge dans une diversité d'environnements et de situations de nutrition azotée ?

980

981 23 paramètres du modèle Azodyn-blé ont été adaptés pour l'orge brassicole : 13 à partir de la littérature  
982 et 10 à partir d'expérimentations spécialement mises en place. Parmi ces derniers, 5 sont dépendants des  
983 génotypes. Un modèle statistique de prédiction du calibrage basé sur le poids de mille grains et sur  
984 stress température et rayonnement a été mis au point et inclus au modèle. Le modèle Azodyn-orge a été  
985 évalué sur la base de 140 combinaisons de génotypes et d'environnements incluant des itinéraires  
986 techniques à bas niveau d'intrants (LNP) et haut niveau d'intrants (HI). L'erreur relative quadratique  
987 moyenne de prédiction (RMSEP) était inférieure à 15% pour le rendement, la teneur en protéines et le  
988 calibrage, pour l'ensemble des situations HI et LNP, et le modèle classait correctement 74%, 55% et  
989 85% des paires de génotypes pour le rendement, la teneur en protéine et le calibrage, respectivement.

990 La qualité de prédiction et de classement entre environnements permet d'envisager une utilisation du  
991 modèle pour identifier les stratégies de fertilisation adaptées à une production d'orge brassicole en bas  
992 niveau d'intrants. La qualité de classement du modèle pour les variables quantitatives, et la capacité du  
993 modèle à correctement prédire la teneur en protéines des génotypes au sein des différents  
994 environnements permettent d'envisager une utilisation du modèle pour identifier les caractéristiques  
995 génotypiques adaptées à une production d'orge brassicole.

996

997 **Messages clés:**

998 - 23 paramètres du modèle de culture blé ont été adaptés à l'orge : 13 issus de la littérature, 10

999 issus d'expérimentations spécifiques.

1000 -un modèle statistique prédisant le calibrage des grains a été établi et intégré au modèle mécaniste

1001 -la RRMSEP du modèle est inférieure à 15% pour le rendement, la teneur en protéines et le

1002 calibrage pour les situations HI et LNP et l'ensemble des 20 génotypes testés

1003 - le modèle classe correctement 74%, 55% et 85% des paires de génotypes pour le rendement, la

1004 teneur en protéine et le calibrage respectivement.

1005

1006 **Mots-clés:**

1007 *Hordeum vulgare L.*, teneur en protéines, calibrage, paramètre, interactions génotype X

1008 environnement, qualité prédictive, modèle de culture

1009

1010

1011

1012

1013

1014

1015

1016

1017

1018

1019

1020

1021

1022

1023

1024

1025

1026

1027

1028

1029

1030 **Azodyn-Barley, a winter-barley crop model for predicting and**  
1031 **ranking genotypic yield, grain protein and grain size in**  
1032 **contrasting pedoclimatic conditions**  
1033

1034 Damien Beillouin<sup>a,b,\*</sup>, Margot Leclère<sup>a</sup>, Corentin Barbu<sup>a</sup>, Maud Bénézit<sup>a</sup>, Ronan Trépos<sup>c</sup>, Arnaud  
1035 Gauffreteau<sup>a</sup>, Marie-Hélène Jeuffroy<sup>a</sup>

1036 <sup>a</sup> UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

1037 <sup>b</sup> Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, 59242 Cappelle-en-Pévèle, France

1038 <sup>c</sup> MIAT Auzeville BP 52627 31326 Castanet-Tolosan, France

1039 \*Corresponding author

1040 E-mail address [damien.beillouin@inra.fr](mailto:damien.beillouin@inra.fr)

1041

1042 **Abstract**

1043 Increasing societal demand for a more ecological agriculture stimulates demand for farm management  
1044 systems adapted to non-standard situations such as low-nitrogen systems. However, trade-offs  
1045 between traits of interest could make difficult to reach high agronomic and environment performances.  
1046 For malting barley, premium prices depend on grain protein content and grain size with strong trade-  
1047 offs with yield, such traits being highly dependent on practices and genotypes. Here we assume that  
1048 such trade-offs can be implicitly embedded in models taking into account varietal traits. Starting with  
1049 an existing wheat-crop model, we developed a parsimonious model on how genotypic traits, crop  
1050 management practices and pedo-climatic environment determine yield, grain protein content and grain  
1051 size. Grain size predictions required the development of a new module. We parameterized the model  
1052 with published and new experimental data using 200 genotype-by-environment combinations of high-  
1053 and low-input management situations. The model was then assessed on 280 other situations, including  
1054 high and low level of nitrogen input. The relative root mean square error of prediction of the model on  
1055 hold-out data was below 15% for grain yield, grain protein content and grain retention fraction in high  
1056 and low-input situations. In addition, the model correctly ranked 72% of the genotype pairs for grain  
1057 yield, 55% for grain protein content and 85% grain retention fraction. Our model can be used to  
1058 predict grain protein content and retention fraction, and rank yield and calibrated yield performance of  
1059 existing combinations of genotype by management by environment combinations. It also could help to  
1060 explore new combinations, to support breeding.

1061

1062

1063

1064

1065

1066

1067

1068 **Highlights**

- 1069 -Based on a wheat crop model, we developed a barley crop model by adapting 23 parameters  
1070 -The model's RRMSEP is less than 15% for yield, protein content and grain calibration for HI and LNP  
1071 situations and all 20 genotypes tested.  
1072 -The model correctly classifies 74%, 55% and 85% of genotype pairs for yield, protein content and grain  
1073 calibration respectively  
1074 - The model can be used to help design variety and cultural ideotypes for malting barley

1075

1076 **Keywords**

- 1077 *Hordeum vulgare L.*  
1078 Grain protein content  
1079 Grain retention fraction  
1080 Parameter estimation  
1081 Model evaluation  
1082 Genotype-by-environment interaction

1083

1084 **Abbreviations**

- 1085 RMSEP: Root mean square error of prediction  
1086 RRMSEP: Relative root mean square error of prediction

1087

1088

**1089 1. Introduction**

1090 Barley (*Hordeum vulgare L.*) is the fourth most produced cereal in the world, after maize, rice and  
1091 wheat (Newton *et al.*, 2011). Malt production accounts for about a third of the production (Baik and  
1092 Ullrich, 2008). France is the largest exporter of malt worldwide, accounting for 20% of malt world  
1093 trade (Brasseurs de France, 2014). To be used by malting industry and to achieve premium prices for  
1094 farmers, barley grains have to meet precise criteria simultaneously for grain protein content and grain  
1095 size (Grain Trade Australia, 2015; The malster's association of Great Britain, 2016). In France, for  
1096 example, the malting barley grain protein content must be in the range 9.5 - 11.5% of dry weight and  
1097 the retention fraction (proportion of grains larger than 2.5 mm) must be over 90% to maximize the  
1098 efficiency of the malting process and the quality of the products (Incograin, 2014).

1099 Current societal demands and environmental regulations encourage to design new parsimonious N  
1100 fertilization practices (Dawson *et al.*, 2008; Meynard *et al.*, 2002). Yet, current genotypes and  
1101 management are generally developed and evaluated in high-input systems (Ceccarelli, 1994; Dawson  
1102 *et al.*, 2008; Wortman *et al.*, 2013). Many studies have demonstrated large effects of nitrogen (N)  
1103 fertilization, location and their interaction on grain yield, grain protein content, and retention fraction  
1104 of malting barley (McKenzie *et al.*, 2005; O'Donovan *et al.*, 2011; Turkington *et al.*, 2012). In such  
1105 low-N systems, reaching high agronomic and economic performances requires to grow genotypes  
1106 tailored to the management (Loyce *et al.*, 2008). Appropriate genotype characteristics are however  
1107 complex to pinpoint due to trade-offs between quality criterion and yield and might be difficult to  
1108 identify directly from high input trials (CHAPITRE 1).

1109 On various species, crop models including genotypic parameters have been useful to identify efficient  
1110 combinations of genotypic traits and management characteristics (Boote *et al.*, 2001; Jeuffroy and  
1111 Recous, 1999; Semenov *et al.*, 2009; Cantero-Martínez *et al.*, 2016; García-Vila and Fereres, 2012)  
1112 in a diversity of environments (Casadebaig *et al.*, 2011; Jeuffroy *et al.*, 2006). To inform French  
1113 malting barley production, the model should predict yield, grain protein content and retention fraction,  
1114 give a good account of the crop response to N dynamics availability and uptake, and satisfactorily rank  
1115 the performances of genotypes (thus including genotypic parameters). The model should also be  
1116 adapted for 6-row winter barley genotypes (major malting barley grown cultivars in France; Doucet,  
1117 2004, Agreste, 2016).

1118 Numerous crop models have been developed for 2-row barley (Rötter *et al.*, 2012; Salo *et al.*, 2016;  
1119 Tao *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2017), including genotypic parameters, prediction of grain yield and grain  
1120 protein content. However, yield components and crop N dynamics are different between 6-row and 2-  
1121 row genotypes (Le Gouis *et al.*, 1999), limiting direct use of 2-row barley models for 6-row barley.  
1122 Moreover, no barley model predicts the grain retention fraction, a major quality criteria for malting  
1123 barley, influencing the price of production paid to the farmer, and the use by malting industry. On  
1124 wheat, numerous physiological studies have investigated the factors influencing grain size (Borrás *et*



1125 al. 2004, Slafer et al. 2014). However, a simpler statistical model by *Sharma and Anderson, (2004)*  
1126 adequately predicted the percentage of wheat grains that passes through a 2 mm sieve with climatic  
1127 variables and genotypic characteristics, a problem very similar to the grain retention fraction for  
1128 barley. Considering explicitly such physiological factors and mechanisms of their actions on barley  
1129 size might hence not be necessary.

1130 Evaluate the ranking capacity of the model clearly allows to evaluate the utility of the crop model to  
1131 be used as a tool for farmer or breeders to choose genotypes to grow. However, to assess crop models,  
1132 the absolute predictive quality is more often used (Asseng et al., 2002; Brisson et al., 2003; Rötter et  
1133 al., 2012) than the model ranking ability (Barbottin et al., 2006; Casadebaig et al., 2016). Bias in  
1134 crop modeling could affect absolute predictive quality, but may not be important to consider for end-  
1135 users of models, such as breeders, farmers or advisors, when they search for top-yielding and top-  
1136 quality genotypes. In these cases, a high predicted ranking quality may hence be more important than  
1137 the absolute predictive quality of the genotypes (*Barbottin et al., 2006; Jeuffroy et al., 2014; van*  
1138 *Ittersum et al., 2003*).

1139 The Azodyn-wheat crop model was initially developed to test N fertilization strategies (*David et al.,*  
1140 *2004; Jeuffroy and Recous, 1999*). *Barbottin et al. (2006)* adapted it to include genotypic parameters  
1141 and demonstrated that the model could be used as a decision support tool to identify the best cultivars  
1142 in contrasting environments. As a simple model developed for a similar crop, the Azodyn-crop model  
1143 is a good candidate to be used as a basis for the development of a decision-support tool for winter-  
1144 barley.

1145 The first aim of the study was to develop a barley crop model predicting and ranking the quantitative  
1146 and qualitative production of various genotypes in various N limiting environments. We adapt the  
1147 Azodyn-wheat crop model to barley assuming that the ecophysiological processes of N uptake,  
1148 biomass and grain number production, and grain filling were similar between winter barley and winter  
1149 wheat. When necessary, we adapted the parameters of the Azodyn crop model, including genotype-  
1150 dependent parameters, to the barley crop. We also developed a statistical equation predicting grain  
1151 retention fraction and included it in the Azodyn crop model. The second aim of the study was to assess  
1152 the predictive and genotype-ranking quality of this new barley crop model, on the three main outputs,  
1153 grain yield, grain protein content and grain size fraction.

1154

1155

**1156 2. Materials and methods****1157 2.1. Field trials conducted for model parameterization and assessment**

1158 Twelve field trials were conducted over two seasons (2013-2014 and 2014-2015), at seven sites across  
1159 northern France. Site-year combinations were considered as different environments. The trials were  
1160 based on a split-plot design with management practices as main factors and genotypes as subplots,  
1161 with four replicates of at least 7 m<sup>2</sup> in size. The managements were a high-input (HI) and a low-  
1162 nitrogen and pesticides (LNP) system. HI management involved N fertilizer application according to  
1163 the balance sheet method, to satisfy total N requirements for maximal local yield (Remy and Hebert,  
1164 1977). The total amount of N fertilizer was split into two applications (stages 21-23 and 30 of Zadoks  
1165 et al. (1974) growth scale). In the HI system, plants were fully protected against diseases and lodging.  
1166 LNP management involved N fertilizer application at 70% of the rate used for HI management, at both  
1167 stages. LNP system included no applications of phytochemicals to protect against diseases or lodging.  
1168 In all trials, sowing densities were similar for the 2 treatments (from 220 to 300 seeds.m<sup>-2</sup> depending  
1169 on the environment). We grew 20 genotypes each year, randomized within the main treatments: 4  
1170 registered cultivars (Champie, Esterel, Isocel, Casino) and 16 inbred lines.

1171 Total biomass and nitrogen uptake in the above-ground parts of the plants were measured at the end of  
1172 winter, at flowering and at maturity. For one replicate out of 4, two samples (2 rows x 50 cm), cut at  
1173 ground level, were collected for each genotype-by-environment-by-management combination, oven-  
1174 dried for 48 h at 80°C, weighed and pooled. The N content of the various samples was analyzed by the  
1175 Dumas method. The number of ears was also counted at flowering on each of the two samples. The  
1176 three remaining replicates were harvested mechanically and were used to determine grain yield, after  
1177 oven-drying (0% humidity). Thousand-kernel weight and the proportion of grains larger than 2.5 mm  
1178 were determined for each replicate, on a 150 g subsample of grains. Grain size fractions were  
1179 determined with a Sortimat (Pfeuffer ®). Grain protein content at harvest was determined with a near-  
1180 infrared spectroscopy grain analyser (NIRS; Technicon Infra-Analyser 400, Tehnicon instruments  
1181 Corporation, Tarrytown, NY, USA). For one particular environment, leaf area index was measured on  
1182 a subsample of plants (10% of the number of plants in each 2 rows x 50 cm sample) at Zadoks' growth  
1183 scale stages 23, 31 and 45, with a planimeter. The samples were then oven-dried for 48 h at 80°C, and  
1184 weighed.

1185 The climatic variables were obtained from the closest meteorological station to each experimental  
1186 field. Maximum volumetric soil moisture content was estimated, from soil texture, with the Jamagne's  
1187 equation (Jamagne et al., 1977). We measured soil texture, available soil water content over the  
1188 maximum rooting depth, and soil mineral nitrogen content at the beginning of the simulation (end of  
1189 winter). Maximum rooting depth was estimated by local experts.

1190 The global database was split into a five-environment calibration database and a nine-environment  
1191 validation database. The calibration database included the environments in which leaf area index was  
1192 measured and sites with the highest yield (for the measurement of maximum yield parameters).

## 1193 **2.2. Adaptation of the Azodyn-wheat crop model to barley**

### 1194 *2.2.1 Overview of the Azodyn crop model*

1195 The Azodyn-Barley crop model was built based on Azodyn-wheat formalisms (*David et al., 2004,*  
1196 *2005; Jeuffroy and Recous, 1999*). Both models include five interacting submodels (soil water  
1197 balance, soil nitrogen dynamics, plant N uptake, plant growth and grain yield). Several major and  
1198 minor changes were however included in the Barley crop model.

1199 Soil is modeled as a reservoir with three layers. The first layer is the ploughed layer, the second layer  
1200 is the current rooting zone, and the third is the zone between actual and maximal root depth. The first  
1201 layer is supplied with water by rainfall and irrigation, and water can be lost by evaporation from the  
1202 soil, transpiration from the crop and drainage. Drainage occurs when the water content of the layer  
1203 exceeds its water retention ability. Water is assumed to move only vertically in the soil, without runoff  
1204 and lateral flow. Daily evaporation and transpiration are calculated from potential climatic  
1205 evapotranspiration, the available water in the layer considered and an indicator of the proportion of  
1206 soil covered with vegetation, as described by Casadebaig et al. (2011). A water-stress variable  
1207 dependent on the fraction of transpirable soil water (FTSW) within the rooting zone is calculated as  
1208 described by Lecoœur and Sinclair, (1996) (Table 3.1, eq. 2).

1209 The daily soil mineral nitrogen content simulated with Azodyn corresponds to the balance between the  
1210 mineralization of humus and organic amendments (calculated with the equations from *Mary et al.,*  
1211 *(1999)*, the mineralization of crop residues (calculated with equations proposed by *Nicolardot et al.*  
1212 *(2001)*, the amount of N fertilizer applied, the amount of N lost through volatilization and leaching  
1213 and the amount of N taken up by the crop. Ammonium volatilization from fertilizer is calculated until  
1214 three days after fertilizer-N application (Table 3.1, eq. 1), but is limited to 50% of the total available  
1215 ammoniacal nitrogen (*Génermont and Cellier, 1997; Sherlock and Goh, 1984*), and is null when  
1216 rainfall exceeds 10 mm. Fertilizer-N recovery, is then calculated for the remaining N fertilizer, based  
1217 on the crop growth rate (*Limaux et al., 1999*). Nitrate leaching is calculated as the product of drained  
1218 water (calculated in the soil water balance submodel) and its N concentration according to the *Burns*  
1219 *(1976)* equation.

1220 Crop N uptake is determined by comparing soil N supply and crop N demand. The crop N demand is  
1221 calculated as the minimum value between daily maximum N uptake (maximum N uptake rate per  
1222 degree-day x daily mean temperature) and daily crop N requirement according to daily crop growth  
1223 (Table 3.1, eq. 8).

1224 Dry matter production is calculated as a daily increment, according to the Monteith equation (*Monteith*  
1225 *and Moss, 1977*), from photosynthetically active radiation, radiation use and interception efficiencies

1226 (Table 3.1, eq. 3). Light interception efficiency is based on Beer-Lambert's law, and is a function of a  
1227 light extinction coefficient and leaf area index. Leaf area is calculated from the critical nitrogen  
1228 content of the crop (Table 3.1, eq. 7).

1229 Grain yield results from the balance between grain dry matter demand and carbohydrate supply by the  
1230 crop. The dry matter demand of grains is calculated from a logistic curve, according to the maximum  
1231 duration of grain filling and potential grain weight (Table 3.1, eq. 9). The potential weight of grains is  
1232 calculated as the minimum value between maximal genotypic thousand-kernel weight and maximal  
1233 reachable thousand-kernel weight, for the number of grains per square meter in the given environment.  
1234 The number of grains per square meter is calculated from dry matter at flowering (Table 3.1, eq. 11).  
1235 Daily N increment in the grains is calculated taking into account the minimum value between the N  
1236 demand of the grains and the sum of crop current N uptake and N remobilization (*Girard, 1997*). Dry  
1237 matter accumulation in the grains is calculated with crop biomass accumulation after flowering,  
1238 remobilization of water-soluble carbohydrates and fluxes of carbohydrates associated with N  
1239 migration to the grains (Table 3.1, eq. 14). Maturity is reached when daily dry matter accumulation in  
1240 the grains stops or when the duration of the grain-filling period is at its maximum value.

1241 The newly developed barley crop model was implemented on the "RECORD" modeling platform  
1242 (Bergez et al., 2013). The model code was written in C++ and is compatible with R statistical software  
1243 (*R Core Team, 2015*) and can be used with the *rvle* package (*Quesnel et al., 2009*).

#### 1244 2.2.2 Model calibration

1245 The Azodyn-Barley calibration was performed for the plant N uptake, plant growth and grain yield  
1246 submodels, given that the soil nitrogen dynamics and the soil water balance submodel were considered  
1247 similar for wheat and barley. A systematic search of peer-reviewed journals for articles about winter  
1248 barley experiments and models identified the most appropriate values for the parameters of the model.  
1249 When several values for a given parameter were found, mean values were used for the Azodyn-Barley  
1250 model. When no value was found in previous studies, the parameter was estimated from our specific  
1251 experiments. When possible, we investigated the effects of genotype, year, experimental site,  
1252 treatment, block and genotype-by-environment interaction in an analysis of variance. The parameters  
1253 of equations 7, 9, 11, and 13 (Table 3.1) were estimated in the absence of N and biotic stresses.  
1254 Moreover, to ensure the physiological significance of parameters and to prevent the compensation of  
1255 estimates when several parameters were estimated simultaneously (*Jeuffroy et al., 2006*), the  
1256 parameters were adjusted individually (for each function), and based on direct measurements.  
1257 Parameters were considered to be genotypic if they were easily measurable, and varied with genotype  
1258 rather than environment (*Jeuffroy et al., 2006*).

1259 *2.2.3 Introduction of a submodel simulating grain retention fraction*

1260 The equation predicting grain retention fraction was established from the calibration database. First,  
 1261 the grain retention fraction variable was transformed (root-square and then arcsin transformation) to  
 1262 normalize the data. Then, 896 linear models including all combinations of 7 potential explanatory  
 1263 variables were defined. The possible explanatory variables were: thousand-kernel weight, grain  
 1264 number per square meter, the interaction between either thousand kernel weight or grain number per  
 1265 square meter and genotype, nitrogen nutrition index at flowering, the sum of incident global radiation  
 1266 between flowering and harvest, the difference between rainfall and potential evapotranspiration  
 1267 between flowering and harvest, the cumulative temperature above 25°C between flowering and  
 1268 harvest. The best model was selected on the basis of the Bayes' factor indicator (BayesFactor package  
 1269 – *Morey et al., 2015*).

1270 Once grain retention fraction had been parameterized on observed values from the calibration  
 1271 database, the formalism was included in the Azodyn-Barley crop model. For the simulations, the  
 1272 explanatory variables of the final grain retention fraction equation were the values predicted by the  
 1273 Azodyn crop model rather than observed values.

1274 **2.3. Model evaluation**

1275 Eleven variables were used to assess the model. Four of these variables (grain yield, yield of grains  
 1276 with a size over 2.5 mm, thereafter called calibrated yield, grain protein content and grain retention  
 1277 fraction) were the main outputs of interest. Two other variables (grain number per square meter and  
 1278 thousand kernel weight) were evaluated to assess the prediction of yield components. Five variables  
 1279 concerned dry matter accumulation and N uptake at flowering and harvest and nitrogen nutrition index  
 1280 at flowering.

1281 *2.3.1 Predictive quality*

1282 The root mean square error of prediction (RMSEP), bias and the difference of the standard deviation  
 1283 of measurement and simulated values (SD) were calculated for the Azodyn crop model for each of the  
 1284 11 variables (Wallach, 2006). For convenience, we also calculated the relative root mean square error  
 1285 of prediction (RRMSEP).

$$1286 \quad RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad ; \quad RRMSEP = \frac{RMSEP}{\bar{y}}$$

$$1287 \quad bias = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad ; \quad SD = \frac{n-1}{n} \times (\sigma_Y - \sigma_{\hat{Y}})^2$$

1288  
 1289 where  $y_i$  is the  $i^{\text{th}}$  measured value,  $\hat{y}_i$  is the corresponding simulated value,  $\bar{y}$  is the mean of the  
 1290 measured values,  $n$  is the number of measurements, and  $\sigma_Y$  and  $\sigma_{\hat{Y}}$  are the variances of observed and  
 1291 simulated values, respectively.

1292                                    *2.3.2 Ranking quality*

1293 We evaluated the ability of the crop model to rank mean genotypic performance over all environments  
1294 in the validation database. For all pairs of genotypes, we computed discrepancies between mean  
1295 genotypic performances for predicted and observed values. If the discrepancy has the same sign for the  
1296 predicted and the observed values, the model was considered to correctly rank this particular  
1297 combination. This ranking quality allows to evaluate the confidence we have in the crop model to  
1298 identify the best genotype from a pair of genotypes. Similar procedure was performed for the ability of  
1299 the crop model to rank mean environment performance and genotypic performance in each  
1300 environment. This latter ranking quality allows to evaluate if the model could be used to identify the  
1301 best genotype in each environment.

1302 As we developed the model as a tool for malting barley farmers and breeders, we evaluate not only the  
1303 ability of the model to rank grain protein content and grain retention fraction, but also its ability to  
1304 correctly predict situations where criteria are in the malting interval.

1305                                    *2.3.3 Comparison of the Azodyn model with mean value in the calibration database*

1306 The ability of the Azodyn model to predict and rank genotypic and environment performances was  
1307 compared with an average model. For each variable, the mean value (or the mean ranking) for each  
1308 genotype and for each management system in the calibration database was considered as predictive  
1309 values, and thereafter called average models. These criteria were chosen as representative of the  
1310 information available to breeders and advisors.

1311 R software (*R Core Team, 2015*) was used for all data analyses, statistics and graphics.

1312

1313 **Table 3.1.** Main equations, corresponding submodels, list of variable and references of the Azodyn crop model described in the section 2.2.1. *coef\_tot\_a*,

1314 *W1Gpot*, *NDmax\_G\_fill*, *k*, *W1G<sub>FLO</sub>*, *W1G\_max\_gen*, *Yield\_max\_gen*, *AlphaGN* and  $\theta$  are parameters

Submodel	Eq.	Variable	Equation
Soil nitrogen	1	$Volat_t$ : Volatilization of N fertilizer (kg ha <sup>-1</sup> ); $N_{NH4_t}$ : NH <sub>4</sub> content of N fertilizer (kg ha <sup>-1</sup> ); Date_Nfer <sub>i</sub> : Date of the N <sup>th</sup> nitrogen supply (julian days) Sum_P <sub>t,i</sub> : Sum of rainfall and irrigation since nitrogen supply i (mm) P_ETP <sub>t,i</sub> : Discrepancies between rainfall and evapotranspiration from t-3 to t (mm)	$Volat_t = N_{NH4_t} \times \theta_1$ if (Sum_P <sub>t,i</sub> < $\theta_2$ or P_ETP < $\theta_{11}$ ) and t < Date_Nfer <sub>i</sub> +3 $Volat_t = 0$ otherwise
Soil water	2	$stressW_t$ : Water stress variable (unit-less) $FTSW_t$ : Fraction of transpirable soil water (%)	$stressW_t = \frac{\theta_3}{(1 + \theta_4 \times e^{(-\theta_5 \times (FTSW_t - \theta_6))})}$
Plant growth	3	$DM_t$ : aerial dry matter (g m <sup>-2</sup> ); $PAR_t$ : Photosynthetically active radiation (MJ m <sup>-2</sup> ) $RIE_t$ : Radiation interception efficiency (unit-less); $RUE_t$ : Radiation use efficiency (g mJ <sup>-1</sup> )	$DM_t = DM_{t-1} + PAR_{t-1} \times RIE_{t-1} \times RUE_{t-1}$
Plant growth	4	$RUE_t$ : Radiation use efficiency (g mJ <sup>-1</sup> ) $stressT$ : Function of non-optimal temperature (Horie, 1977); (Villalobos et al., 1996) (unit-less) $stressN\_RUE_t$ : Function of non-optimal nitrogen plant status (unit-less) (Bélanger et al., 1992)	$RUE_t = \frac{\theta_7}{2} \times stressT_t \times stressN\_RUE_t \times stressW_t$ if t < beginning of stem elongation $RUE_t = \theta_7 \times stressT_t \times stressN\_RUE_t \times stressW_{t-1}$ otherwise
Plant growth	5	$stressN\_RUE_t$ : Function of non-optimal nitrogen plant status (Bélanger et al., 1992) NNInt <sub>t</sub> : Integral of nitrogen nutrition index from the beginning of the simulation (unit-less)	$stressN\_RUE_t = MIN [1; \theta_8 \times (1 - \theta_9 \times e^{(\theta_{10} \times NNInt_t)}]$
Plant growth	6	$RIE_t$ : Radiation interception efficiency (unit-less) $LAI_t$ : Leaf area index (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	$RIE_t = Eimax \times (1 - e^{-k \times LAI_t})$
Plant growth	7	$LAI_t$ : Leaf area index (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) $LAIpot_t$ : Leaf area index potential (without nitrogen and water stress-m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> ) $stressN\_LAI_t$ : Function of non-optimal nitrogen plant status (Bélanger et al., 1992)	$LAI_t = MIN [LAI_{t-1}; MAX[LAIpot_{t-1}, \theta_{13} \times QN_c \times StressN\_LAI_t]]$

Nitrogen uptake	8	$dNreq_t$ : Daily nitrogen requirement of the plant ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); $DM_t$ : aerial dry matter ( $\text{g m}^{-2}$ ); $tN_{max_t}$ : Maximum nitrogen content of aerial parts of the plant (Zhao, 2014)	$dNreq_t = (coef\_tot\_a \times DM_t \times 10 \times tN_{max_t}) - (coef\_tot\_a \times DM_{t-1} \times 10 \times tN_{max_{t-1}})$
Grain yield	9	$demandDMG_t$ : Dry matter demand of the grains ( $\text{g m}^{-2}$ ) $NDafFLO_t$ : Normalized day after flowering $GNM2_t$ : Number of grains per square meter	$demandDMG_t = \frac{W1Gpot/1000}{1 + \frac{W1Gpot - W1GFLO}{W1GFLO} \frac{NDmax\_G\_fill/2 - NDafFLO_t}{NDmax\_G\_fill/2}} \times GNM2_t$
Grain yield	10	$KWpot_t$ : Potential kernel weight of each grain (g) $GNM2_t$ : Number of grains per square meter	$KWpot_t = MIN \left[ W1G\_max\_gen; 1000 \times \frac{Yield\_max\_gen}{GNM2_t} \right]$
Grain yield	11	$GNM2_t$ : Number of grains per square meter; $DM_{FLO}$ : Dry matter at flowering ( $\text{g m}^{-2}$ )	$NGM2_t = AlphaGN \times (\theta_{14} + \theta_{15} \times DM_{FLO})$
Grain yield	12	$dQNG_t$ : Daily increment in nitrogen content in the grains ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) $demandDMG_t$ : Dry matter demand of the grains ( $\text{g m}^{-2}$ ) $QNremob_t$ : Quantity of nitrogen remobilized from flowering to harvest ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) $QNup_t$ : Total nitrogen uptake ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) $NDafFLO_t$ : Normalized days after flowering	$dQNG_t = MIN \left[ \theta_{16} \times 10 \times (demandDMG_t - demandDMG_{t-1}); QNremob_t + \frac{QNup_t}{coef\_tot\_a} \right]$ if $NDafFLO_t > \frac{NDmax\_G\_fill}{2}$ $dQNG_t = Nremob_t + \frac{QNup_t}{coef\_tot\_a}$ otherwise
Grain yield	13	$QNremob_t$ : Quantity of nitrogen remobilized from flowering to harvest ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) $QNveg_{t-1}$ : Quantity of nitrogen in the vegetative part of the plant ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) $QNa_FLO_t$ : Quantity of nitrogen in the aerial part of the plant at flowering ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	$QNremob_t = MAX (0, (QNveg_{t-1} - (QNa\_FLO_t \times (1 - \theta_{17}))) \times (NDafFLO_t \times \theta_{18}))$
Grain yield	14	$DMG_t$ : Dry matter of the grains ( $\text{g m}^{-2}$ ) $DMG_{FLO}$ : Dry matter of the grains at flowering ( $\text{g m}^{-2}$ ) $QNG_t$ : Quantity of nitrogen in the grains ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) $DMpost\_flo_t$ : Dry matter accumulation between flowering and harvest ( $\text{g m}^{-2}$ ) $WSCremob_t$ : remobilization of water-soluble carbohydrates ( $\text{g m}^{-2}$ )	$DMG_t = DMG_{FLO} + MIN \left[ demandDMG_t; \frac{QNG_t}{10} / \theta_{16} + DMpost\_flo_t + WSCremob_t \right]$



### 3. Results

#### 3.1. Adaptation of the Azodyn-wheat crop model to barley

Based on a literature review (and previous work by *Barbottin, 2006*), we identified four equations from the nitrogen uptake, plant growth and grain yield submodels (eq. 7, 9, 11, 13, Table 3.1 and the new equation predicting grain size) as being different between wheat and barley. We then estimated 23 parameters from the three species-dependent submodels (out of a total of 61 parameters) through a literature review and specific field experiments. Based on the literature review, we were able to determine values for 13 barley parameters (Table 3.2), none of which was considered genotypic. Ten parameters were estimated in specific experimental trials (Table 3.3).

In our barley experiments, leaf area index was significantly related to critical above-ground plant tissues nitrogen content of the plant (eq. 7 – parameters  $\theta_{13}$ ). The coefficient between these two variables was estimated at 0.029 ( $P < 0.05$ ), with no significant impact of genotype ( $P < 0.18$  – database including 20 genotypes). Growth stage (Zadoks' stages 26, 30 and 47) had a significant impact ( $P < 0.05$ ) on the relationship between the two variables, but accounted for only a very small (<1%) proportion of the total leaf area index variation. We, therefore, did not include this effect in the Azodyn-Barley model. The parameter value obtained for barley was very similar to that for wheat, for which no variation with growth stage was taken into account.

The proportion of N remobilized to the grains at harvest from the above-ground crop N at flowering (eq. 13 - parameter  $\theta_{17}$ ) was estimated at 78% ( $P < 0.05$ ). Genotype had no significant impact ( $P < 0.40$ ) on this proportion of N remobilized between flowering and harvest. The value obtained for barley was slightly higher than that obtained for wheat.

Calibrated on one particular genotype (to avoid overfitting for model validation), dry matter at flowering accounted for 52% of the total variation of grain number per square meter in 12 environments. Both the intercept (parameter  $\theta_{14} = 10\,293$ ) and the slope (parameter  $\theta_{15} = 7.05$ ) were significant ( $P < 0.05$ ). The inclusion of a genotypic parameter made it possible to decrease the model error considerably. The genotypic parameter (parameter “alphaGN”) was estimated from the calibration database, and the values obtained are reported in Table 3.4.

The maximum duration of grain filling was estimated in two environments. Using a logistic regression curve (*Girard, 1997*) fitted to the change in grain dry matter over time, we estimated the end of the grain-filling period as the time point at which thousand-kernel weight reached 95% of the estimated upper asymptote of the curve. The grain filling period duration was estimated at 65 and 85 normalized days (equivalent number of days at reference temperature and humidity) for the two environments. The maximum duration of grain filling was set to 90 normalized days, a value similar to that for wheat.

Overall, five parameters were considered to be genotype-dependent: the four genotype-dependent parameters present in the wheat model, plus a specific parameter for grain retention fraction. Maximum

yield and maximum thousand-kernel weight were estimated as the 95<sup>th</sup> percentile of the observed values in the calibration database (Table 3.4). Genotypic earliness of flowering was estimated as the mean observed value from the calibration database. The genotypic parameters for the calculation of grain number per square meter and retention fraction were estimated as previously described.

**Table 3.2.** Species-dependent parameters of the Azodyn-Barley model estimated by literature review. The values of the parameters in the Azodyn-Wheat model are provided, for information.

<i>Parameter</i>	<b>Unit</b>	<b>Wheat</b>	<b>Barley</b>	<b>Source</b>
		<b>Value</b>	<b>Value</b>	
<i>Dry matter threshold for Nmax dilution curve</i>	t ha <sup>-1</sup>	2.0	1.79	Zhao, 2014
<i>Parameter for Nmax dilution curve (coef_Nmax)</i>	%	8.3	4.26	Zhao, 2014
<i>Parameter for Nmax dilution curve (tNmax_Nmax)</i>	%	6.0	5.38	Zhao, 2014
<i>Parameter for Nmax dilution curve (pente_Nmax)</i>	-	-0.44	-0.4	Zhao, 2014
<i>Parameter for critical N dilution curve (coef_Nc)</i>	%	5.35	4.76	Zhao, 2014
<i>Parameter for N dilution curve (pente_Nc)</i>	-	-0.44	-0.39	Zhao, 2014
<i>Dry matter threshold for N dilution curve</i>	t ha <sup>-1</sup>	1.55	1.79	Zhao, 2014
<i>N content for low dry matter (tNc_Nc)</i>	%	4.4	3.79	Zhao, 2014
<i>Proportion of water-soluble carbohydrates at flowering remobilized at harvest( WSC)</i>	%	0.75	0.82	Bingham et al., 2007
<i>Ratio of total N uptake to aerial N uptake</i>	-	1.25	1.15	Hansson and André, 2004
<i>Light extinction coefficient (k)</i>	%	0.75	0.63	Muurinen and 2004
<i>Radiation use efficiency (Ebr)</i>	kg.	3.3	3.8	Kemalian et al., 2004
<i>Maximum light interception efficiency (Eimax)</i>	-	0.96	0.96	Kemalian et al., 2004

**Table 3.3.** Species-dependent parameters of the Azodyn-Barley model estimated in specific experimental trials. The values of the parameters of the Azodyn-Wheat model are shown, for information. The number of the equation refers to Table 3.1

<b>Equation</b>	<b>Parameter</b>	<b>Description</b>	<b>Units</b>	<b>Data n</b>	<b>Wheat value</b>	<b>Barley Value</b>
eq.7	$\theta_{13}$	<i>Coefficient for leaf area index and the critical nitrogen crop content</i>	-	60	0.028	0.029
eq.13	$\theta_{17}$	<i>Proportion of nitrogen remobilized from flowering to harvest</i>	%	140	75	78
eq.11	$\theta_{14}$	<i>Slope of the relationship between grain number per square meter and crop dry matter at anthesis</i>	-	25	-	7.05
	$\theta_{15}$	<i>Intercept of the relationship between grain number per square meter and crop dry matter at anthesis</i>	-		-	10293
eq.9	NDmax_G_fill	<i>Maximum duration of grain filling</i>	Normalize d days	2	90	90

**Table 3.4.** Genotype-dependent parameters of the Azodyn-Barley model estimated in specific experimental trials. Yield\_max\_gen: genotypic maximum yield, TKW\_max\_gen: genotypic maximum thousand-kernel weight, alpha.GN, mean ratio of grain number between Esterel and the other genotypes. AlphaRF, genotypic relationship between thousand-kernel weight and retention fraction.

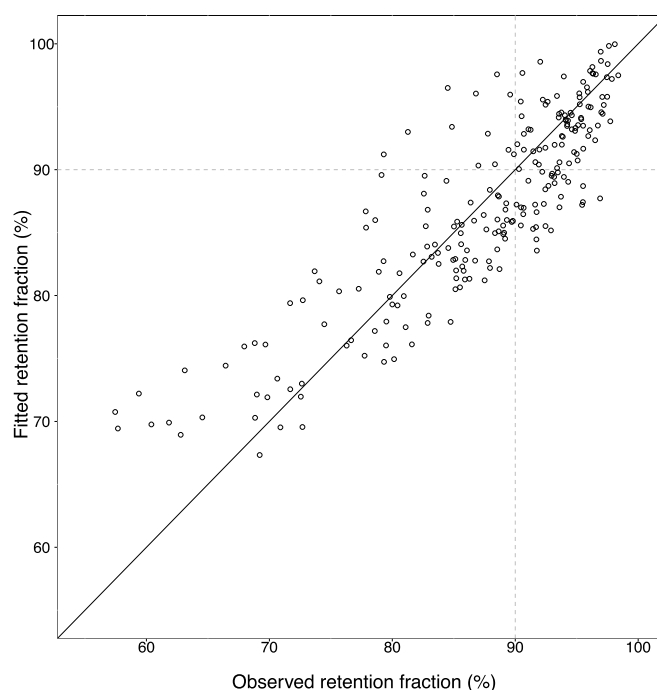
Genotype	Yield_max_gen	TKW_max_gen	Earliness_FLO	alphaGN	alphaRF
CASINO	9.8	46.5	1	0.93	16.1
CHAMPIE	9.2	47.0	-1	0.98	17.6
1	9.6	43.1	0	1.00	16.5
2	9.6	42.1	0	0.96	17.4
3	10.0	44.8	-1	0.98	15.6
4	9.7	41.3	0	1.00	18.4
5	9.6	43.8	0	0.97	15.7
6	9.7	44.2	0	0.99	18.8
7	10.2	44.2	1	0.99	18.4
8	10.1	43.1	0	1.01	17.1
ESTEREL	9.1	39.4	0	1.00	13.9
ISOCEL	10.3	37.8	1	1.15	18.3
9	9.7	45.9	1	0.94	15.1
10	10.1	43.2	0	1.02	15.2
11	10.3	43.6	0	1.07	18.8
12	10.3	36.3	0	1.20	18.9
13	10.0	39.2	0	1.10	17.1
14	9.7	41.7	0	1.07	16.3
15	10.0	42.8	1	0.98	17.0
16	98.9	45.0	0	0.95	18.5

### 3.2. Introduction of a submodel simulating grain retention fraction

Among the 896 models tested, the analysis of variance of the selected model is presented in **Table 3.5**. About 70% of total grain retention fraction variation was explained by 5 variables and 24 parameters. Thousand-kernel weight by genotype interaction, grain number per square meter, radiation and heat stress accounted for 44%, 10%, 11% and 5 % of total variation, respectively (**Table 3.5**). The root mean square error of estimation of the model was 7.4 (RRMSE= 8.4%). Despite this low estimation quality, the model correctly ranked situations with retention fractions above and below the 90% threshold, in about 80% of genotype-by-environment combinations (Figure 3.1).

**Table 3.5.** Proportion of the variation explained by each factor and estimation of the parameter of the grain retention fraction submodel. The genotypic parameter used in the model is presented in Table 3.4. TKW: thousand-kernel weight, GN m<sup>-2</sup>: grain number per square meter, R: sum of radiation between anthesis and harvest, T\_stress: heat stress calculated as the cumulative temperature over 25°C between flowering and harvest.

Variable	Percent of variation	Estimate	Standard error	Pr(> t )
(Intercept)	-	$-4.46 \times 10^{-1}$	$1.13 \times 10^{-1}$	<0.001
GN m <sup>-2</sup>	10	$4.64 \times 10^{-6}$	$2.01 \times 10^{-6}$	0.0219
R	11	$4.66 \times 10^{-6}$	$5.62 \times 10^{-7}$	<0.001
T_stress	5	$-6.02 \times 10^{-4}$	$7.50 \times 10^{-5}$	<0.001
TKW:Genotype (alphaRF)	44		see Table 3.4	
residuals	30		-	



**Figure 3.1.** Estimated *versus* observed grain retention fraction of the model fitting retention fraction over the 140 environments of the evaluation database with the statistical model. Each point corresponds to the mean value of a genotype in one environment. Vertical and horizontal lines represent the commercial grain retention fraction threshold.

### 3.3. Model performance

#### 3.3.1 Predictive performance of the Azodyn-barley crop model

For the 140 genotype-by-environment combinations in HI management, the RRMSEP (and RMSEP) of Azodyn was 11.7% (0.9 t ha<sup>-1</sup>) for grain yield, 19.4% (1.4 t ha<sup>-1</sup>) for calibrated yield, 11.4% (10.0%) for grain retention fraction (predicted through the thousand-kernel weight estimated by the model) and 13.0% (1.3 points) for grain protein content (**Table 3.6**). Predictive performance of the crop model for these variables was quite similar for the HI and LNP management systems (Figure 3.2).

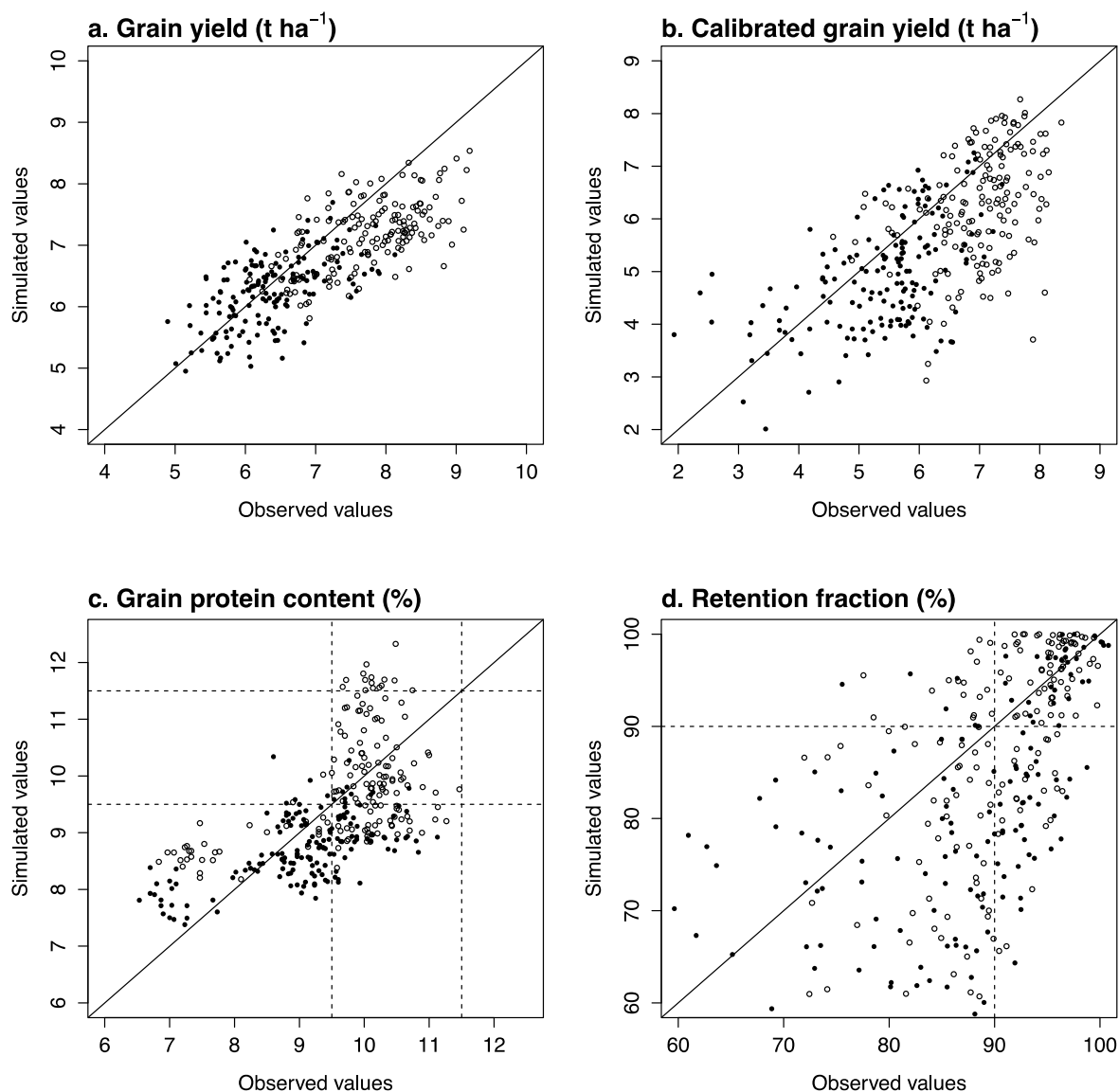
**Table 3.6.** Root mean square error of prediction (RMSEP), relative root mean square error of prediction (RRMSEP), bias and ratio between the SD (difference between the standard deviation of the measurement and the standard deviation of simulated values) of Azodyn and the average model for 11 key variables in high-input conditions, over the whole validation database. The values in brackets correspond to low-nitrogen and low-pesticide situations.

The variables are dry matter at flowering (DM\_FLO), nitrogen nutrition index at flowering (NNI\_FLO), the aerial nitrogen uptake at flowering (QN\_FLO), grain number per square meter (GNM2), thousand-kernel weight (TKW), grain protein content (GPC), dry matter at harvest (DM\_HAR), total aerial nitrogen uptake at harvest (QN\_HAR), grain yield (Yield), calibrated grain yield and grain retention fraction. The average model is the mean observed value of the variable over the calibration database.

Variable	Mean_obs	----- RMSEP ----		----- RRMSEP --		----- Bias -----		SD
		Azod	Average	Azod	Average	Azod	Average	
DM_FLO (g m <sup>-2</sup> )	1096	158	185 (232)	14.4	16.9 (22.8)	29	-68.4 (-)	0.7
NNI_FLO	0.7 (0.6)	0.1	0.1 (0.1)	12.4	10.4 (19.3)	0 (0)	0 (-0.1)	1.1
QN_FLO (kg m <sup>-2</sup> )	184 (154)	37	30 (49)	20.0	16.5 (31.5)	23	0.1 (-37.7)	0.6
GNM2	19999	1950	2565	9.8	12.8 (22.7)	531	-1432 (-)	0.7
TKW (g.1000)	39.0	3.5	3.1 (3.2)	9.0	7.9 (8.6)	1.9	-1.5 (-1.2)	0.7
Yield (t ha <sup>-1</sup> )	7.7 (6.3)	0.8	0.8 (1.4)	10.5	10.6 (22.1)	0.6	-0.4 (-1.2)	0.6
GPC (%)	9.8 (9.1)	1.0	1 (1.1)	10.4	10.7 (11.6)	-0.1	-0.3 (-0.5)	0.9
DM_HAR (g m <sup>-2</sup> )	1515	207	187.9	13.6	12.4 (17.9)	-4.2	65 (-)	1.2
QN_HAR (kg m <sup>-2</sup> )	183 (153)	19.6	20.6 (43.6)	10.7	11.2 (28.5)	-2.4	-4.8 (-)	0.9
Retention	91 (85)	10.4	6 (11.7)	11.5	6.7 (13.9)	3.5	-2.1 (-2.3)	0.8
Calibrated yield	7.0 (5.4)	1.3	0.9 (1.6)	18.3	12.9 (29.5)	0.7	-0.6 (-1.2)	0.4

Both management systems considered, when observed grain protein content values were in (resp. outside) the malting interval, predicted ones were also in (resp. out) this interval in 46% of situations (resp. 94% of situations). The model thus clearly identified situations with grain protein content out the malting threshold. For the retention fraction, Azodyn correctly identified situations over (resp. below) the threshold in 70% of situations (resp. 82%), while observed values were over (resp. below) the threshold. The model was thus able to distinguish situations with acceptable grain retention fraction or not. However, there is a risk of predicting retention fraction below the threshold whereas the observed value was over the threshold. Intermediate variables and yield components were predicted with relatively high accuracy: in the HI validation database, NNI at flowering was predicted with a relative

root mean square error of prediction of 11.8%, resulting from moderately accurate predictions of aerial biomass (RRMSEP =15.2%) and crop N uptake (RRMSEP= 20.4%). RRMSEP was low for thousand-kernel weight and grain number per square meter, at 10.6% (RMSEP=4.1) and 9.8% (RMSEP=1964), respectively, showing good predictions. Dry matter and N uptake at harvest were predicted with a relative error below 15 %.



**Figure 3.2.** Simulated vs. observed values of grain yield (a), calibrated grain yield (b), grain protein content (c) and retention fraction (d). Open symbols represent high-input situations and close symbols correspond to low-nitrogen and no-pesticide situations.

Using mean values of the considered variable in the calibration database led to low prediction errors (Table 3.6). However, the Azodyn crop model outperformed this average model for both HI and LNP situations, for 9 out of 11 variables. Furthermore, this average model did not allow to predict LNP-situations as accurately as Azodyn. For example, LNP yield was predicted with a relative mean square

error of prediction of 9% for Azodyn, and 22% for the average model. The crop model generally predicted variables with a lower bias in both management systems (7 variables), although for two variables (retention fraction and thousand kernel weight), predictions had a higher bias in both systems. However, the crop model generally (for 9 of 11 variables) predicted less variation between genotype-by-environment combinations than the mean value in the calibration database.

### 3.3.2 Ability of the model to rank mean environmental and genotypic values

The crop model correctly ranked 78%, 72%, 75% and 78% of pairs of environments for grain yield, calibrated grain yield, grain protein content and grain retention fraction, respectively. Considering mean genotypic values across all environments and management systems, the crop model correctly ranked 74%, 74% 55% and 85% of situations, respectively for the four variables (**Table 3.7**). Similarly, the model correctly ranked 84% and 76% of all combinations of two genotypes for the number of grains per square meter and for thousand-kernel weight respectively. Crop model ranking performance was much lower for variables assessed before flowering. Compared to mean ranking in the calibration database, Azodyn lower performed for the grain protein content, dry matter and Nuptake at harvest.

**Table 3.7.** Proportion of situations (%) for which the Azodyn crop model and the average model correctly ranked each pair of genotypic mean values across all environment and management systems or environment mean values over all genotypes. The names of the variables are described in **Table 3.6**.

Variable	Environmental mean		Genotypic mean	
	Azodyn	Azodyn	average model	
DM_FLO (g m <sup>-2</sup> )	81	54	65	
NNI_FLO	75	68	49	
QN_FLO (kg ha <sup>-1</sup> )	72	46	44	
GNM2 (grains.m <sup>-2</sup> )	69	84	86	
TKW (g.1000 seeds <sup>-1</sup> )	72	85	85	
GPC (%)	75	55	81	
Yield (t ha <sup>-1</sup> )	78	72	72	
DM_HAR (g m <sup>-2</sup> )	55	53	76	
QN_HAR (kg ha <sup>-1</sup> )	77	51	60	
Retention fraction (%)	78	85	91	
Calibrated yield (t ha <sup>-1</sup> )	72	74	78	

### 3.3.3 Ability of the model to rank genotype-by-environment values

Considering genotypic values in each environment and for both management system, the crop model successfully ranked the discrepancies between two genotypes in 63%, 63%, 53% and 69% of genotype-by-environment combinations for yield, calibrated yield, grain protein content and grain retention fraction, respectively. Similarly, the model correctly ranked 70% and 74% of genotype-by-environment combinations for thousand-kernel weight and the number of grains per square meter, respectively. The ranking errors of the model decreased rapidly with increasing difference between the observed values (

**Figure 3.3).** For example, for observed discrepancies greater than twice the residual standard error, the model correctly ranked the four variables in 70%, 69%, 57% and 77% respectively, of genotype-by-environment combinations, for the HI system. Overall, the ranking ability of the model was similar in LNP and HI situations, except for calibrated grain yield (

**Figure 3.3).**

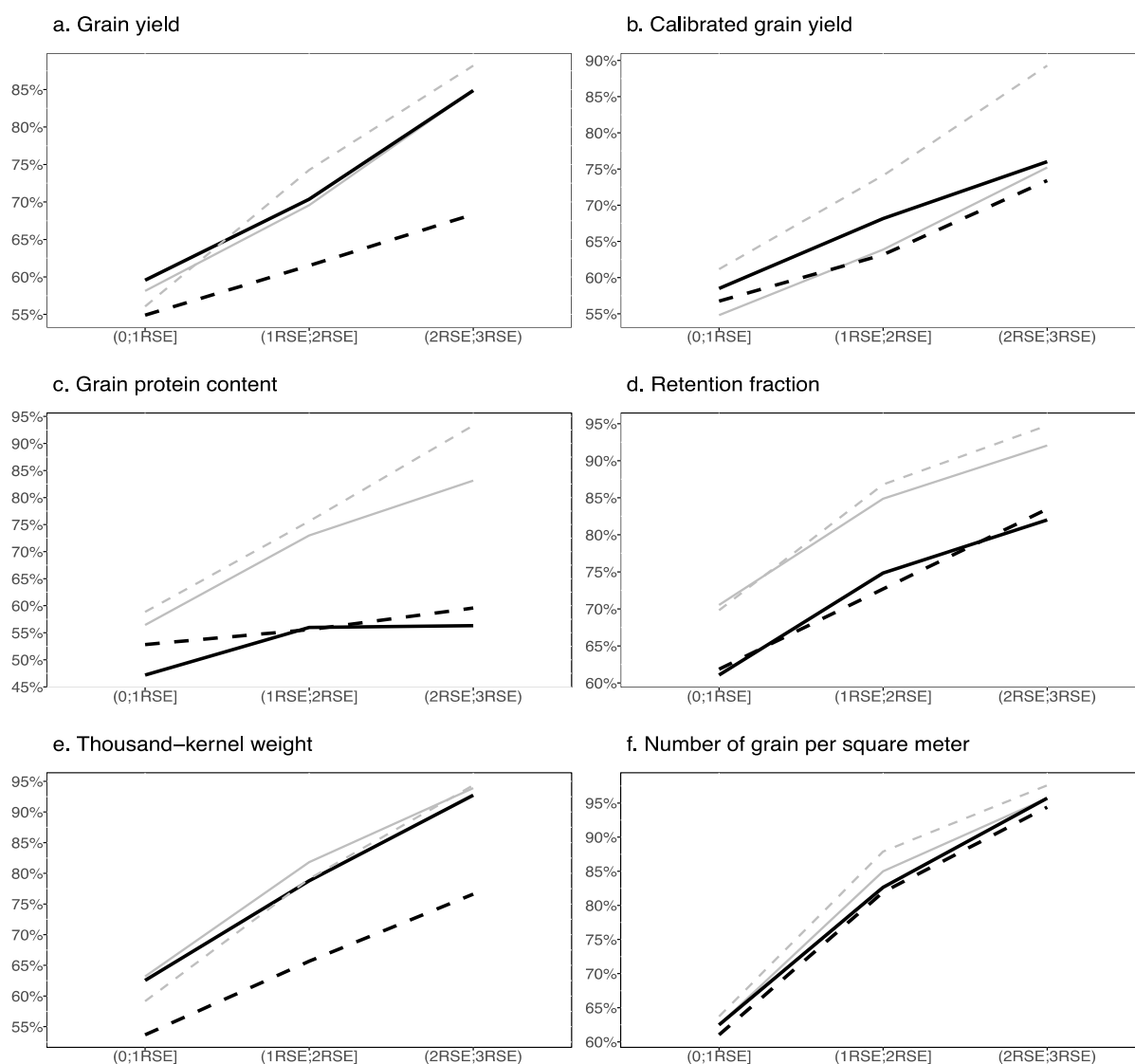
Using the mean ranking in the calibration database led to rank correctly 67%, 66%, 68% and 79% of yield, calibrated yield, grain protein content and grain retention fraction, respectively. For observed discrepancies between genotypes of more than 2 residual standard error in the LNP system, considering the mean ranking in the calibration database allowed to rank correctly 76%, 73%, 79% and 88%, of genotype-by-environment combinations respectively, corresponding to 6%, 4%, 22% and 11% of combinations more than for the crop model.

**The capacity of the model to rank genotypes differed between environments (**

**Figure 3.4a- example for the HI system).** For example, the model correctly ranked genotypic yield in 54% to 78% of situations depending on the environment. Similarly, capacity of the crop model to rank environments differed between genotypes (

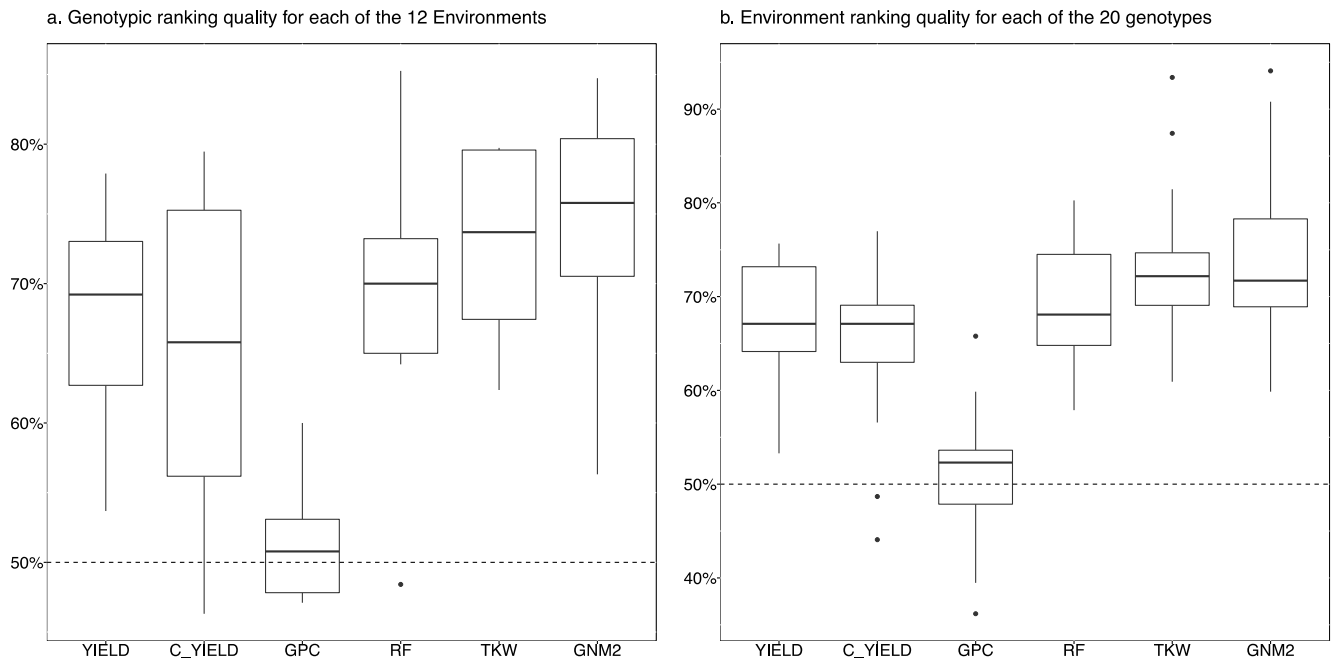
Figure 3.4b - example for the HI system). For example, the crop model correctly ranked environment grain yield in 53% to 76% of situations depending on the genotype considered.





**Figure 3.3.** Percentage of situations in which the model correctly ranked the genotypes for yield (a), calibrated yield (b), grain protein content (c), retention fraction (d), thousand-kernel weight (e), and number of grains per square meter (f), as a function of the discrepancies observed between genotypes. Black lines: Azodyn, Gray lines: mean ranking in the calibration database. Solid line: High input situations, dashed lines: Low Nitrogen and pesticides situations.

Class thresholds were determined with a multiple of the residual standard error (RSE) of the variable. The RSE values were 0.43 for grain yield, 0.48 for calibrated yield, 0.37 for grain protein content, 4.15 for retention fraction 2.41 for thousand-kernel weight, 1924 for the number of grains per square meter in HI situations and 0.47 for grain yield, 0.66 for calibrated yield, 0.33 for grain protein content, 7.7 for retention fraction, 2.8 for thousand-kernel weight and 1755 for the number of grains per square meter in LNP situations.



**Figure 3.4.** Variability in the capacity of the crop model to rank environment values considering individually each genotypes (a) and to rank genotypic values considering each environments (b) for the HI system and 6 main output variables calculated for all genotype-by-environment combinations. C\_YIELD: calibrated yield, GPC: grain protein content, RF: retention fraction, TKW: thousand-kernel weight, GNM2: grain number per square meter.

#### 4. Discussion

The use of a model as a support tool assumes that the model: i) does not require too many parameters and inputs for adaptation and use in new situations (*Barbottin et al., 2006; Meinke et al., 1998*), ii) Reach a high predictive and ranking quality across a wide range of environmental conditions and thus answers the main questions the model was built for. Azodyn-barley was built for identification of improved cultivar by management combinations. We discuss the three of these characteristics for these particular aims.

##### 4.1. Formalisms and genotypic parameters of the Azodyn-Barley crop model

In the Azodyn crop model, we chose to limit the number of formalisms and parameters. The Azodyn-barley model makes use of about 80 parameters, a smaller number than for many other crop models: STICS for example has more than 130 parameters (*Ruget et al., 2002*).

The simple structure of the Azodyn model facilitates the rapid adaptation of this model to other crops. Here, we adapted the Azodyn-Wheat model to barley, by a re-parameterization of less than 25 parameters. This simple adaptation was sufficient to yield high predictive and ranking quality for intermediate and final variables. An Azodyn model has also been used as the basis for models for pea (*Benezit et al., 2016*) and oilseed rape (*Jeuffroy et al., 2001*). Our results confirmed that that the complexity of a model is not a guarantee of its relevance for action (*Boote et al., 1996; Monteith, 1996; Passioura, 1996; Sinclair and Seligman, 1996*).

We chose to include a formalism predicting grain size fraction in the Azodyn-barley crop model, as this is an important criterion for farmers and malters. As *Sharma and Anderson (2004)* grain retention fraction was modeled at harvest, with a simple statistical model dependent on covariables previously simulated by the mechanistic part of the crop model throughout the growing season. This statistical model accounted for 70% of total grain retention fraction variability. In *Sharma and Anderson (2004)* study, 82% of the total variance in small grain screenings was accounted for by a regression model based on variety-specific kernel weight, post-heading rainfall (from about 2 weeks before anthesis), and location factors. With this approach, the existence of other variables influencing grain retention fraction, but not encountered in the calibration situations, cannot be taken into account. This could possibly reduce the model transferability to other environments.

Another important feature of our approach is the definition of genotypic parameters only if they are easy to measure and are physiologically meaningful. The definition of new genotypes in the Azodyn-Barley model therefore requires the specific measurement of particular parameters in experimental trials. For example, trials with optimal growth conditions are required to determine the maximum yield and maximum thousand-kernel weight. However, the measurement of these parameters should be easy to incorporate into breeding or evaluation trials. We did not consider parameters to be genotypic if previous studies yielded conflicting results, or if the parameter values were not stable across a broad

range of environments. For example, parameters relating to light interception (radiation use efficiency; maximum radiation interception efficiency and radiation extinction coefficient) have been reported to be independent of genotype (Akkal, 1998; Kemanian *et al.*, 2004) or to strongly vary for a given genotype (Goyne *et al.*, 1993). Finally, Azodyn-Barley includes five genotypic parameters, none of which is directly linked to N dynamics. Indeed, Zhao (2014) found no impact of genotype on the nitrogen dilution curve for winter barley. Like Barbottin *et al.* (2005), we found no effect of genotype on N remobilization between flowering and harvest. By contrast, some studies have reported genetic variation in N uptake efficiency, N utilization or N translocation between genotypes (Le Gouis and Delbarre, 1996, Delogu *et al.*, 1998) and significant N management-by-genotype interactions (Anbessa *et al.*, 2008). The genotypic differences in plant N dynamics simulated by the Azodyn-Barley model result from discrepancies concerning the dry matter and N uptake values at the end of winter used to initialize the model.

#### 4.2. Predictive quality of Azodyn-barley crop model

Despite its relatively simple structure, the predictive quality of the Azodyn-Barley model for grain protein content and grain yield appeared to be similar to that of other crop models. For instance, in a comparison of nine barley models using minimal information for model calibration, for spring barley grown at the field scale, Rötter *et al.* (2012) found that the HERMES (Kersebaum, 1995), MONICA (Nendel *et al.*, 2011) and WOFOST (Diepen *et al.*, 1989) models performed best, with the lowest root mean square error of prediction values of 1.1, 1.3 and 1.3 t ha<sup>-1</sup> for yield, respectively (for a mean observed grain yield of about 5.9 t ha<sup>-1</sup>). Salo *et al.* (2016), compared the performance of 11 spring barley crop simulation in various nitrogen fertilization strategies ; the observed mean square error of prediction for yield ranged from 10 to 30% (compared to mean values of 10.6% and 22.1% for HI and LNP situations for Azodyn). The errors of prediction for the Azodyn-barley model were of the same order of magnitude as those for the Azodyn-Wheat model: Barbottin *et al.* (2006) estimated predictive errors of 1.4 t ha<sup>-1</sup> and 1.76% for wheat yield and grain protein content, respectively (*vs.* 0.9 t ha<sup>-1</sup> and 1.3% for our barley model). Very few models include a prediction of the proportion of grains over (or lower) a certain grain size. Despite large differences between observed and simulated values (Figure 3.2), the relative mean square error of estimation was relatively low for grain retention fraction in HI situations (11.4%). The calibrated grain yield was predicted with a predictive error below 20% for both HI and LNP management system. Moreover, the Azodyn-Barley model was evaluated in contrasting N fertilization strategies (high-input, and low-nitrogen and no pesticide management systems), as also performed by Salo *et al.*, (2016) for other crop models. Predictive quality of Azodyn barley was globally similar in the two systems. The model thus correctly handled the impact of nitrogen stress- the main biotic stress differing between the two management systems - on predictive quality for both quantitative and qualitative production.

In our study, we used a relative narrow set of environments (only 5 sites by year combinations x 2 management strategies x 20 genotypes) to calibrate the model, and the sites were partly common with the ones used for validation. Models originally parameterized for crops at specific sites tend to perform better for these sites (*Yin et al., 2017*). Model calibration may indeed have a very large impact on the predictive quality of models (*Salo et al., 2016*). A precise calibration of parameters is thus necessary for any model to decrease parameter uncertainty and obtain credible results for local conditions (*Rötter et al., 2012 ; Asseng et al., 2013*). A more precise calibration of the Azodyn-barley crop model would be necessary to increase the predictive quality for some characteristics, such as the retention fraction. However, as stated by *Salo et al. (2016)*, a more detailed model calibration does not necessarily result in higher accuracy of model simulations in particular when simulations are done for suboptimum management such as N-limited growth. Moreover other factors, such as the precision of input data, also impact the predictive quality of the model. In our results, the large variability was observed between environments (e.g. for the grain protein content) could potentially also be explained by the imprecision of the input data (e.g. soil mineral nitrogen measurement at the end of winter). A detailed investigation of the origins of the errors of the model could be useful to identify the parameters or inputs to measure or estimated with highest precision.

Another important feature to use the model in farmers or breeders fields would to integrate a module predicting the impacts of disease on quantitative and qualitative production. The reduction of N fertilizers is indeed often associated with a reduction of pesticides. In the considered experiments, the observed disease symptoms covered less than 20% of leaf area of a maximum of 25% of the plants. Low yield reductions were thus caused by diseases in our experiment. However, diseases could reduced barley yield up to 30% according to years (GEVES, personal communication).

#### **4.3. Can Azodyn be used to rank genotypes and N fertilization strategies?**

Azodyn-barley demonstrated a high capacity to rank main outputs for various environments, even with two contrasted N fertilization strategies. The model correctly ranked more than 75% of mean environment values for yield, grain protein content and retention fraction. Azodyn-Barley thus demonstrated its ability to correctly take into account environmental factors impacting barley production. Azodyn-barley model could thus be used to identify best N fertilization management strategies in various environment conditions. Our experimental design, however, did not allow us to test the model's ability to correctly classify output variables for smaller nitrogen fertilization management differences than a reduction of 30% N. Further investigations should be necessary to evaluate the ranking capacity of the model in such situations.

The ability of the model to rank mean genotypic values was high for variables calculated directly from genotypic parameters (i.e. number of grains per square meter, retention fraction). For example, the model correctly ranked 85% of genotypic mean values for retention fraction over the whole database.

The ranking performance of the model was rather high for yield. By contrast, ranking performance was poor for variables relating to N dynamics. For example, the crop model correctly ranked only 46% of genotypic mean values for N uptake at flowering over the whole database. The model also poorly ranked the mean genotypic grain protein content (55% of situations). Many authors have described the difficulties involved in simulating grain protein content with crop models (*Asseng et al., 2002; Girard, 1997*). This variable cumulates the errors involved in the assessment of biomass growth, grain number and crop N uptake. Moreover, because of the high sensitivity to climatic factors of the nitrogen transfer into the grains (*Smith and Gooding, 1999*), it is difficult to predict and rank errors precisely for this variable. However, when the crop model is designed to support breeders or farmers growing winter barley, a high ranking quality for grain protein is less important than the ability to correctly identify situations where the grain protein content is in the malting threshold. In our study, when observed grain protein content was not in the malting interval, Azodyn correctly predicted 94% of situations.

Azodyn-wheat crop model has already been shown to be useful for the *ex-ante* assessment of new genotypes of wheat (*Barbottin et al., 2006*), for which a ranking error of no more than one rank was reported in more than 80% of cases for yield, and 77% for grain protein content. However, these authors used a different method of ranking as ours. The authors pooled the genotypes into a single group if they differed by less than the value of the least square difference calculated with all genotypes. The number of groups of genotypes was, therefore, quite small, three to six, depending on the environment considered.

### **Conclusion**

We developed a simple dynamic crop model to be used as support tool for identifying winter barley genotypes with high grain yield, suitable grain protein content and grain size for malting in the various pedoclimatic conditions of the French malting barley belt and for usual or low-input N fertilization strategies. Given its simple structure, the Azodyn crop model has several of the key characteristics of a crop model for engineering use, as defined by *Passouria (1996)*: ease of use and extensibility (new genotypes) of parameterization based on measurements, input data easily available from soil and weather records. This property is carried on from the winter wheat crop model we adapted to winter barley crop through a re-parameterization, demonstrating also the capacity of this model to evolve. Based on statistical model, we included a module predicting grain retention fraction taking into account simple genotypic characteristics and climatic factors.

For grain protein content, grain retention fraction and yield, the model reach a high predictive and ranking quality to discriminate environments differing in term of N management and pedoclimatic conditions. The model could thus be a useful tool to identify best management practices in various environments. Despite possible improvements, Azodyn could be a useful tool identify genotypes with a high yield and calibrated yield, and a grain protein content in the malting threshold.

### **Acknowledgments**

This work was supported by a grant from French Ministry of Agriculture (CASDAR ECO2MALT). We thank the technical team of UMR Agronomie, Florimond-Desprez and KWS-Mommont for assistance during the experiments. We thank Alex Edelman & Associates for reviewing the English.





## References

- Akkal, N., 1998. Pilotage de la fertilisation azotée du blé d'hiver sur la base d'une évaluation précoce de la réflectance radiométrique et du taux de couverture du sol: application à l'agriculture de précision. Institut National Agronomique Paris-Grignon., Paris.
- Anbessa, Y., Juskiw, P., 2012. Nitrogen Fertilizer Rate and Cultivar Interaction Effects on Nitrogen Recovery, Utilization Efficiency, and Agronomic Performance of Spring Barley. *ISRN Agron.* 2012, 1–8. doi:10.5402/2012/531647
- Asseng, S., Bar-Tal, A., Bowden, J., Keating, B., Van Herwaarden, A., Palta, J., Huth, N., Probert, M., 2002. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat. *Eur. J. Agron.* 16, 25–42. doi:10.1016/S1161-0301(01)00116-2
- Asseng, S., Milroy, S.P., Poole, M.L., 2008. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment. *Field Crops Res.* 105, 97–106. doi:10.1016/j.fcr.2007.08.003
- Baik, B.-K., Ullrich, S.E., 2008. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *J. Cereal Sci.* 48, 233–242. doi:10.1016/j.jcs.2008.02.002
- Barbottin, A., Le Bail, M., Jeuffroy, M.H., 2006. The Azodyn crop model as a decision support tool for choosing cultivars. *Agron. Sustain. Dev.* 26, 107–115. doi:10.1051/agro:2006003
- Bélangier, G., Gastal, F., Lemaire, G., 1992. Growth analysis of a tall fescue sward fertilized with different rates of nitrogen. *Crop Sci.* 32, 1371–1376.
- Benezit, M., Larmure, A., Munier-Jolain, N.M., Jeuffroy, M.-H., 2016. Adaptation des types variétaux de pois dans différentes régions françaises : réponse du modèle AZODYN-pois. Presented at the Premières rencontre francophone des Légumineuses, Dijon.
- Bergez, J.-E., Chabrier, P., Gary, C., Jeuffroy, M.H., Makowski, D., Quesnel, G., Ramat, E., Raynal, H., Rousse, N., Wallach, D., Debaeke, P., Durand, P., Duru, M., Dury, J., Favardin, P., Gascuel-Oudou, C., Garcia, F., 2013. An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems. *Environ. Model. Softw.* 39, 39–49. doi:10.1016/j.envsoft.2012.03.011
- Boote, K.J., Kropff, M.J., Bindraban, P.S., 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agric. Syst.* 70, 395–420. doi:10.1016/S0308-521X(01)00053-1
- Borrás, L., Slafer, G.A., Otegui, M.E., 2004. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Res.* 86, 131–146. doi:10.1016/j.fcr.2003.08.002
- Brasseurs de France, 2014. Livre blanc de la brasserie française. <http://www.umih.fr/export/sites/default/.content/media/pdf/Etudes-cafes-tablissement-nuit/livre-blanc-de-la-brasserie-francaise.pdf>
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J., H nault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. doi:10.1016/S1161-0301(02)00110-7
- Burns, I.G., 1976. Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *J. Agric. Sci.* 86, 305–313.
- Ceccarelli, S., 1994. Specific adaptation and breeding for marginal conditions, in: Rognli, O.A., Solberg, E., Schjelderup, I. (Eds.), *Breeding Fodder Crops for Marginal Conditions*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 101–127. doi:10.1007/978-94-011-0966-6\_15
- Cantero-Mart nez, C., Plaza-Bonilla, D., Ang s, P.,  lvaro-Fuentes, J., 2016. Best management practices of tillage and nitrogen fertilization in Mediterranean rainfed conditions: Combining field and modelling approaches. *Eur. J. Agron.* 79, 119–130. doi:10.1016/j.eja.2016.06.010
- Casadebaig, P., Guillioni, L., Leco ur, J., Christophe, A., Champolivier, L., Debaeke, P., 2011. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agric. For. Meteorol.* 151, 163–178.

- Casadebaig, P., Mestries, E., Debaeke, P., 2016. A model-based approach to assist variety evaluation in sunflower crop. *Eur. J. Agron.* 81, 92–105. doi:10.1016/j.eja.2016.09.001
- David, C., Jeuffroy, M.H., Laurent, F., Mangin, M., Meynard, J.M., 2005. The assessment of Azodyn- Org model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *Eur. J. Agron.* 23, 225–242.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *Eur. J. Agron.* 21, 249–266.
- 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 Res.* 107, 89–101. doi:10.1016/j.fcr.2008.01.001
- 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)
- Diepen, C. van, Wolf, J., Keulen, H. van, Rappoldt, C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use Manag.* 5, 16–24.
- Doucet, R., 2004. Malting 6-row barley: the French cultural exception. *Perspect. Agric.* 68–71.
- García-Vila, M., Fereres, E., 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron.* 36, 21–31. doi:10.1016/j.eja.2011.08.003
- Génermont, S., Cellier, P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agric. For. Meteorol.* 88, 145–167.
- Girard, M.-L., 1997. Modélisation de l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé tendre d'hiver; simulation de leur teneur en protéines à la récolte. Paris.
- Grain Trade Australia, 2015. Grain trade australia. Section2. Barley trading standarts.
- Horie, T., 1977. Simulation of sunflower growth. I. Formulation and parametrization of dry matter production, leaf photosynthesis, respiration and partitioning of photosynthesis. *Inst Agr Sci* 45–70.
- Incograin, 2014. Addendum technique N°IV pour la vente des orges de brasseries.
- Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J., Mori, A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *B.T.I* 627–641.
- Jeuffroy, M., Barbottin, A., Jones, J., Lecoœur, J., 2006. Crop models with genotype parameters. *Work. Dyn. Crop Model. Anal. Parameterization Appl.* Elsevier Amst. Neth. 281–307.
- Jeuffroy, M.-H., Casadebaig, P., Debaeke, P., Loyce, C., Meynard, J.-M., 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 121–137. doi:10.1007/s13593-013-0170-9
- 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.
- Jeuffroy, M.-H., Vogrincic, C., Meynard, J.M., Valentin-morison, M., Reau, R., Recous, S., 2001. Azodyn-rape : A simple model for decision support in oilseed-rape fertilisation. Presented at the Nitrogen workshop, Reims.
- Kemarian, A.R., Stöckle, C.O., Huggins, D.R., 2004. Variability of barley radiation-use efficiency. *Crop Sci.* 44, 1662–1672.
- Kersebaum, K.C., 1995. Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecol. Model.* 81, 145–156.
- Le Gouis, J., Delebarre, O., Beghin, D., Heumez, E., Pluchard, P., 1999. Nitrogen uptake and utilisation efficiency of two-row and six-row winter barley cultivars grown at two N levels. *Eur. J. Agron.* 10, 73–79. doi:10.1016/S1161-0301(98)00055-0
- Lecoœur, J., Sinclair, T.R., 1996. Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Sci.* 36, 331–335.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., Guckert, A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant Soil* 214, 49–59.

- 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. doi:10.1016/j.cropro.2008.02.001
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 549–566. doi:10.1046/j.1365-2389.1999.00264.x
- McKenzie, R., Middleton, A., Bremer, E., 2005. Fertilization, seeding date, and seeding rate for malting barley yield and quality in southern Alberta. *Can. J. Plant Sci.* 85, 603–614.
- Meinke, H., Hammer, G.L., van Keulen, H., Rabbinge, R., 1998. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective III. The integrated wheat model (I\_WHEAT). *Eur. J. Agron.* 8, 101–116. doi:10.1016/S1161-0301(97)00015-4
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. doi:10.1051/agro:2002064
- Monteith, J.L., Moss, C.J., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain [and discussion]. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 281, 277–294.
- Morey, R.D., Rouder, J.N., Jamil, T., Morey, M.R.D., 2015. Package “BayesFactor.” URL <http://cran.R-project.org/web/packages/BayesFactor/BayesFactor.pdf> accessed 1006 15.
- Nendel, C., Berg, M., Kersebaum, K.C., Mirschel, W., Specka, X., Wegehenkel, M., Wenkel, K.O., Wieland, R., 2011. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecol. Model.* 222, 1614–1625. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.02.018
- Newton, A.C., Flavell, A.J., George, T.S., Leat, P., Mullholland, B., Ramsay, L., Revoredo-Giha, C., Russell, J., Steffenson, B.J., Swanston, J.S., 2011. Crops that feed the world 4. Barley: a resilient crop? Strengths and weaknesses in the context of food security. *Food Secur.* 3, 141–178.
- Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant Soil* 228, 83–103.
- O’Donovan, J.T., Turkington, T.K., Edney, M.J., Clayton, G.W., McKenzie, R.H., Juskiw, P.E., Lafond, G.P., Grant, C.A., Brandt, S., Harker, K.N., Johnson, E.N., May, W.E., 2011. Seeding Rate, Nitrogen Rate, and Cultivar Effects on Malting Barley Production. *Agron. J.* 103, 709. doi:10.2134/agronj2010.0490
- Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 581–594. doi:10.1007/s13593-011-0059-4
- Quesnel, G., Duboz, R., Ramat, É., 2009. The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems. *Simul. Model. Pract. Theory* 17, 641–653. doi:10.1016/j.simpat.2008.11.003
- R Core Team, 2015. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Remy, J., Hebert, J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *CR Acad Agric F.*
- Rötter, R.P., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takáč, J., Trnka, M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Res.* 133, 23–36. doi:10.1016/j.fcr.2012.03.016
- Ruget, F., Brisson, N., Delécolle, R., Faivre, R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22, 133–158. doi:10.1051/agro:2002009
- Salo, T.J., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., Bindi, M., Calanca, P., Klein, T., Moriondo, M., Ferrise, R., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takáč, J., Hlavinka, P., Trnka, M., Rötter, R.P., 2016. Comparing the performance of 11 crop simulation models in

- predicting yield response to nitrogen fertilization. *J. Agric. Sci.* 154, 1218–1240. doi:10.1017/S0021859615001124
- Semenov, M.A., Martre, P., Jamieson, P.D., 2009. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1095–1104. doi:10.1016/j.agrformet.2009.01.006
- Sharma, D., Anderson, W., 2004. Small grain screenings in wheat: interactions of cultivars with season, site, and management practices. *Aust. J. Agric. Res.* 55, 797–809.
- Sherlock, R., Goh, K., 1984. Dynamics of ammonia volatilization from simulated urine patches and aqueous urea applied to pasture I. Field experiments. *Fertil. Res.* 5, 181–195.
- Sinclair, T.R., Seligman, N.G., 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron. J.* 88, 698–704.
- Slafer, G.A., Savin, R., Sadras, V.O., 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Res.* 157, 71–83. doi:10.1016/j.fcr.2013.12.004
- Smith, G., Gooding, M., 1999. Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. *Agric. For. Meteorol.* 94, 159–170.
- Tao, F., Rötter, R.P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C., Mínguez, M.I., Semenov, M.A., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Cammarano, D., Hoffmann, H., others, 2017. Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *Eur. J. Agron.* 82, 144–162.
- The malster's association of great britain, 2016. Barley Requirements.
- Turkington, T.K., O'Donovan, J.T., Edney, M.J., Juskiw, P.E., McKenzie, R.H., Harker, K.N., Clayton, G.W., Xi, K., Lafond, G.P., Irvine, R.B., Brandt, S., Johnson, E.N., May, W.E., Smith, E., 2012. Effect of crop residue, nitrogen rate and fungicide application on malting barley productivity, quality, and foliar disease severity. *Can. J. Plant Sci.* 92, 577–588. doi:10.4141/cjps2011-216
- van Ittersum, M., Leffelaar, P., van Keulen, H., Kropff, M., Bastiaans, L., Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18, 201–234. doi:10.1016/S1161-0301(02)00106-5
- Villalobos, F.J., Hall, A.J., Ritchie, J.T., Orgaz, F., 1996. OILCROP-SUN: A development, growth, and yield model of the sunflower crop. *Agron. J.* 88, 403–415.
- Wallach, D., 2006. Evaluating crop models. *Work. Dyn. Crop Models Eval. Anal. Parameterization Appl.* Elsevier Amst. 11–54.
- Wortman, S.E., Francis, C.A., Galusha, T.D., Hoagland, C., Van Wart, J., Baenziger, P.S., Hoegemeyer, T., Johnson, M., 2013. Evaluating Cultivars for Organic Farming: Maize, Soybean, and Wheat Genotype by System Interactions in Eastern Nebraska. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 37, 915–932. doi:10.1080/21683565.2013.764956
- Yin, X., Kersebaum, K.C., Kollas, C., Manevski, K., Baby, S., Beaudoin, N., Öztürk, I., Gaiser, T., Wu, L., Hoffmann, M., others, 2017. Performance of process-based models for simulation of grain N in crop rotations across Europe. *Agric. Syst.* 154, 63–77.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14, 415–421.
- Zhao, B., 2014. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. *Field Crops Res.* 160, 64–72.

## **Caractérisation de la diversité des environnements de production de l'orge brassicole : un outil pour la conception d'idéotypes cultureux et variétaux**

*« Everything is both simpler than we can imagine,  
and more complicated that we can conceive. »*

*Goethe*



## Résumé

La caractérisation des principaux facteurs impactant le rendement des cultures au sein des différents environnements de production revêt un intérêt majeur pour les sélectionneurs afin de concevoir des génotypes adaptés à la diversité des contraintes du milieu pour lesquels ils sont développés. Cette caractérisation permet également aux agriculteurs de disposer d'informations pour choisir plus précisément les variétés adaptées aux caractéristiques pédoclimatiques de leur exploitation. Enfin, dans le cadre de l'idéotypage par modèle, une telle caractérisation permet d'étudier l'intérêt d'une adaptation locale des génotypes (ou de la fertilisation azotée).

Les questions traitées dans cette étude sont :

- Quelles sont les combinaisons de facteurs climatiques impactant le rendement de l'orge dans le bassin de production français?
- Comment se structurent les départements suivant la fréquence d'occurrence des différentes combinaisons de stress climatiques impactant le rendement ?

L'impact des principaux facteurs climatiques sur le rendement de l'orge d'hiver dans 35 départements et sur 25 années a été estimé par une régression des moindres carrés partiels (PLS).

Les principales combinaisons de facteurs limitants impactant le rendement dans les différents sites et années pris en compte, appelés climatic-stress patterns (CP), ont été définies avec une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur la base des résultats de la PLS. .

Avec 14 facteurs climatiques pris en compte, la PLS a permis d'expliquer 39% des variations de rendement de l'orge d'hiver observées sur la base de données. Quatre principales combinaisons de facteur climatiques (CP) expliquaient 27% de la variabilité totale du rendement. De fortes températures durant la période de remplissage des grains étaient associées à de fortes précipitations durant l'hiver (4.6% des environnements- rendement moyen 5.5 t ha<sup>-1</sup>), ou à de faibles sommes de températures hivernales (28.9% des environnements- rendement moyen 6.2 t ha<sup>-1</sup>). Un autre groupe était caractérisé par des gels hivernaux et de fortes précipitations durant la montaison (34.7% des environnements- rendement moyen 6.5 t ha<sup>-1</sup>), et un autre groupe par une faible précipitation hivernale et peu de stress hydrique en fin de cycle (34.7% des environnements--rendement moyen 7.2 t ha<sup>-1</sup>). Le rendement moyen variait entre 5.5 et 7.2 t ha<sup>-1</sup> suivant les CP.

Une grande diversité de CP intervient dans chacun des départements français : les deux-tiers étaient caractérisés par l'occurrence, pour au moins une année, des 4 CP. Trois zones géographiques ont été caractérisées sur la base des fréquences de CP au sein des départements : une zone au nord de la France et deux zones non contiguës au sud de la zone de production brassicole.

**Messages clés:**

- Une PLS, incluant 14 facteurs climatiques, expliquait 39% de la variabilité totale du rendement moyen départemental sur 25 années étudiées.
- 4 combinaisons de facteurs climatiques expliquaient 27% de la variabilité totale du rendement.
- Trois groupes de départements ont été définis sur la base des fréquences d'occurrence des combinaisons de facteurs climatiques impactant le rendement sur 25 années climatiques.

**Mots clés :** caractérisation environnementale, température, stress hydrique, régression des moindres carrés partiel, environnements cibles.



## Characterization of spatial and temporal combinations of climatic factors affecting yields: an empirical model applied to the French barley belt

Damien Beillouin<sup>1,2</sup>, Marie-Hélène Jeuffroy<sup>1</sup>, Arnaud Gauffreteau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France ;

<sup>2</sup> Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, 59242 Cappelle-en-Pévèle, France

Author for correspondence:

Damien Beillouin

E-mail: [damien.beillouin@inra.fr](mailto:damien.beillouin@inra.fr)

Phone: 33 (0)1 30 81 52 19

### Summary

Characterization of the principal factors affecting yield is of great importance, as it may enable breeders to design genotypes better adapted to the conditions of the area in which they are to be grown, and farmers to choose the most appropriate cultivars to grow.

We analyzed the impact of the climatic factors on winter barley yield in 35 *départements* (French geographic units) over 25 years, by partial least squares (PLS) regression analysis. Using ascendant hierarchical clustering based on PLS results, we defined the main combinations of climatic factors affecting yield in the French barley belt, hereafter referred as “climatic-stress patterns” (CPS).

Four CPS captured 27% of total yield variability and widely differ in term of yield. French environment experienced high temperature during grain filling associated with high winter rainfall (4.6% of environments –mean yield of 5.5 t-ha<sup>-1</sup>) or associated with low vernalization temperatures (28.9% of environments- mean yield of 6.2 t-ha<sup>-1</sup>). Crops also experienced high winter frost levels and high levels of rainfall during stem elongation (34.7% of environments- mean yield of 6.5 t-ha<sup>-1</sup>) or low winter rainfall and days with heat stress (34.7% of environments- mean yield of 7.2 t-ha<sup>-1</sup>).

Two thirds of the French *départements* experienced all the four CPS over the years studied. Three clusters of regions with homogeneous frequencies of the CPS were identified.

These findings have implications for genotype breeding or cultivar choice for wide or local adaptation.

### **Highlights**

- Much of French barley yield variability over the last 25 years (39%) can be accounted for by 14 climatic indicators
- Four main combinations of climatic factors affect yields in the French barley belt
- These four climatic-stress patterns captured 27% of total barley yield variability
- Fine descriptions of climatic variability require the characterization of several stress patterns for each geographic unit
- Similar climatic-stress patterns may occur in very distant geographic units or at distant times.

### **Key words**

Environment characterization;

Temperature;

Water stress;

Partial least squares regression;

Target population of environments;

### **Abbreviations**

CP: climatic-stress patterns

GC: geographic cluster

PLS: partial least squares regression

RMSEP: root mean square error of prediction

RRMSEP: relative root mean square error of prediction

TPE: target population of environments

## 1. Introduction

With a mean annual production of about 11.5 million tonnes of grain (Agreste, 2016), France is the second largest exporter of malting barley in Europe (Brasseurs de France, 2014). Malting barley is grown on about 1 million hectares of French land, covering diverse environments, from shallow sandy to deep clay soils, in both maritime and continental climates. Barley, like other crops, is strongly influenced by environmental conditions, and there is generally considerable variation in yield, both between years and between sites (Le Bail & Meynard, 2003). Climatic factors are a major yield determinant. A large number of climatic factors may potentially affect cereal yield and display considerable between-year variation (Gouache et al., 2015; Lecomte, 2005).

Adapting genotypes to environmental conditions is one of the principal approaches to maintaining an acceptable level of production, in terms of both quality and quantity (Mickelbart et al., 2015; Murphy et al., 2007). One of the key tasks of breeders is, therefore, to produce genotypes adapted to the pedoclimatic conditions of a given set of farms, for the future seasons in which the varieties will be grown. These set of environments is called the “target population of environments” (TPE) (Comstock, 1977; Cooper et al., 1997). Similarly, farmers have the important task of choosing the varieties best adapted to the interannual variability of local climatic conditions on their farms. In both cases, a precise characterization of the stress patterns likely to affect these environments is required, to ensure that both breeding strategies and cultivar recommendations are effective (Calhoun et al., 1994; Podlich et al., 1999).

Various approaches have been proposed for the characterization and classification of TPEs. The occurrence of yield-limiting factors in a TPE can be determined *a posteriori*, from field cultivar trials (Basford & Cooper, 1998; Hernandez-Segundo et al., 2009; Setimela et al., 2005). In such trials, an agronomic diagnosis identifies the climatic and biotic factors explaining the gap between the mean yield of the genotypes tested and their potential yields in the absence of stress (Brancoourt-Hulmel et al., 1999; Cooper & Fox, 1996). However, these trials are generally performed over only a few years, and the sampling of regional sites within the network of field trials may lead to a misrepresentation of the TPE (Chenu et al., 2013). Thus, such characterization may not provide a precise description of the temporal and spatial patterns of factors affecting yields. On the other hand, large-scale environments characterization have been conclusively performed on the basis of climatic and soil data (e.g. Hodson & White, 2007; Löffler et al., 2005) or based on similarities in physical characteristics (e.g. altitude, photoperiod, rainfall). Provided that data on soil and climate are available, this approach makes broad spatial and temporal characterization possible without the need for experiments. Its main limitation is that it does not take into account the impact of the variables considered on crop production. Recent studies have therefore proposed the characterization of TPEs on the basis of stress indicators calculated from crop models taking into account the interactions between plants, soil and climate (e.g. Chenu et al., 2013). However, most crop models struggle to capture the effects of adverse or extreme climate events

accurately (Rötter *et al.*, 2011). Moreover, it has recently been argued that empirical modeling may be more suitable for analyses of past and current crop yield variability than process-based crop models (Soltani *et al.*, 2016), due to the uncertainty of model inputs and formalisms (Iizumi *et al.*, 2009; Tao *et al.*, 2009). Gouache *et al.* (2015) recently used such a model for wheat. They developed a model for predicting wheat yield, but did not characterize the spatial and temporal climatic patterns of the environments. In this study, we characterized the TPE of French barley by empirical modeling, taking into account the various climatic stresses affecting yield.

Once characterized, TPEs can be classified, on the basis of groups of sites, for example, the approach generally adopted by the International Maize and Wheat Improvement Center (e.g. Braun *et al.*, 1996; Hernandez-Segundo *et al.*, 2009). Contiguous areas occurring in more than one country and, frequently, transcontinental, are defined as the basis of the classification. Classifications of this type thus generally extend over very large scales (e.g., at the continental scale: Hernandez-Segundo *et al.*, 2009 for barley; Hodson & White, 2007 and Braun *et al.*, 1996 for wheat), at the expense of poor characterization of the local factors affecting yields. Classification may also be based on site-by-year combinations rather than simply on sites. In this case, groups of environments are constituted on the basis of the specific combination of factors experienced by crops (Chenu *et al.*, 2011). A given site may, indeed, experience very different stress patterns in different years (e.g. Zhang *et al.* 2006 for disease in France; Chenu *et al.*, 2013 for drought in Australia). Chenu's study in Australia dealt with only one type of factor affecting yield (i.e. drought), and did not, therefore, take into account the diversity and possible co-occurrence of limiting factors. In France, given the diversity of climatic factors and their high inter-annual variability, the classification of environments directly and solely on the basis of site might lead to a misrepresentation of the diversity of combinations of factors affecting yields. We therefore chose to base our characterization of the TPE on site-by-year combinations rather than purely on site. However, farmers require information relevant to a particular geographic area, when choosing the varieties to grow on their farms, for example. In this study, we therefore chose to analyze the frequency of the different stress patterns as a function of site.

There has never, to our knowledge, been a precise quantitative characterization and classification of the combinations of climatic-stress factors affecting barley yields in the French barley belt. The aims of this study were, therefore, (i) to use an empirical site-by-year model to identify similar combinations of climatic factors affecting barley yields in French barley environments, ii) to characterize the spatial and temporal structure of the combinations of climatic factors affecting barley yields for the definition of geographic clusters experiencing similar climatic stress patterns.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Dataset description

#### 2.1.1 Geographic and temporal limits of the yield series studied

Yield data for winter barley were collected by the French Ministry of Agriculture (*Agreste, 2015* - <http://agreste.agriculture.gouv.fr>). Yield data are available at the *département* level, corresponding to the NUTS3 scale (i.e. Nomenclature of territorial units for statistics corresponding to 95 administrative geographic units in France). The data collected are for both feed and malting types of winter barley, as the database does not distinguish between production uses.

This study focused on the main *départements* producing malting barley. We thus considered thirty-five French geographic units, accounting for 51% of the total winter barley acreage (i.e., 669 763 ha) in 2015, and more than 90% of the total acreage under the winter malting varieties preferred for malting (*FranceAgriMer, 2015*). We analyzed data for a period of 25 years (from 1989 to 2013). Overall, 875 *département*-by-year combinations were analyzed.

#### 2.1.2 Climatic data and calculation of climatic factors

Six climatic variables (minimum and maximum temperature, potential evapotranspiration, rainfall, incident radiation, and vapor pressure deficit) were averaged at *département* scale from daily interpolated weather data for France on a regular 25 km-grid produced by the Joint Research Center (*European Commission, DG, JRC, https://ec.europa.eu/jrc/en*). The climatic variables were then used to defined factors potentially impacting yield. The climatic factors were defined on the basis of: i) published evidence of impacts on yield for other crops, and ii) the presence of sufficient variability for the set of environments considered in this study. Climatic factors were calculated by phenological period, as performed by *Gouache et al. (2015)* and *Landau et al. (1998)*. We considered three periods: i) from sowing to the start of stem elongation (winter period), ii) from the start of stem elongation to anthesis (stem elongation period), and iii) from anthesis to maturity (grain-filling period). The dates of anthesis and harvest were estimated from records for the studied *départements* provided by the French organization for variety registration (GEVES) for the 1990-2010 period. Dates for the start of stem elongation were estimated with a simple phenological model based on cumulative thermal units (Robert, personal communication). Finally, 14 climatic factors were defined (Table 4.1).

**Table 4.1.** Description of the climatic factors potentially affecting barley yield included in the study

Type of climatic factor	Phenological stage	Example of references showing impacts
-Number of days with a mean	S.E., G.F.	<i>Lecomte, 2005- threshold 25°C Acevedo et</i>
-Cumulative rainfall	W., S.E., G.F.	<i>Lecomte, 2005, Gouache 2015, Qian et</i>
-Cumulative minimum temperature	W., S.E.	<i>Lecomte, 2005, Gate 1995</i>
-Cumulative low temperature	W.	<i>Mary et al., 2009</i>
-Photothermal quotient	W., S.E., G.F.	<i>Lecomte, 2005, Fischer, 1985, Gouache et</i>
-Mean vapor pressure deficit	W., S.E., G.F.	<i>Allen et al., 1998</i>

W.: winter period, S.E.: stem elongation period, G.F.: grain-filling period

## 2.2. Statistical analyses

### 2.2.1 Quantifying the impact of climatic factors on yield

The impacts of the 14 climatic factors ( $X_1, \dots, X_p$ ) on observed barley yield ( $Y_{ij}$ ) over the 25 years ( $i$ ) in the 35 *départements* ( $j$ ) were estimated by partial least squares regression (PLS). Indeed, given the strong correlations (Supplementary 1) between climatic factors over both space and time, partial least squares (PLS) regression outperforms classical linear models for this situation (Wold *et al.*, 1983). As suggested by Lecomte (2005), we normalized the climatic factors, to prevent the overrepresentation of variables with larger variances.

PLS regression is an iterative process that builds orthogonal latent variables ( $T_1, \dots, T_k$ ) as weighted sums of original climatic factors ( $T_k = \sum_1^k \alpha_{kp} \cdot X_p$ ) so as to maximize their covariance with yield ( $\text{cov}(T_k, Y)$ ). Yield is then regressed against the latent variables ( $Y_{ij} = \sum_1^k \beta_k \cdot T_{k,ij}$ ). Each *département*-by-year combination  $ij$ , originally characterized for 14 climatic factors ( $X_{1,ij}, \dots, X_{p,ij}$ ), was finally defined by  $p$  latent variables weighted by their impacts on yield ( $\beta_1 \cdot T_{1,ij}, \dots, \beta_k \cdot T_{k,ij}$ ).

The predictive quality of the models including 1 to  $p$  latent variables were assessed through the root mean square error of prediction (RMSEP) and the model with the best predictive quality was selected. The RMSEP was assessed by a cross-validation procedure involving the iterative exclusion of each year from the dataset (one year at a time), the fitting of model coefficients and the use of the model to predict data for the year that was excluded. Others predictive criterions were also calculated: the relative root mean square error of prediction (RRMSEP) and model efficiency (EF) (Wallach & Goffinet, 1989).

Model efficiency was calculated as follows:  $EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{25} \sum_{j=1}^{35} (Y_{ij} - \hat{Y}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^{25} \sum_{j=1}^{35} (Y_{ij} - \bar{Y})^2}$  with  $Y_{ij}$  the yield value in the geographic unit-by-year combination  $ij$ ,  $\hat{Y}_{ij}$  the corresponding predicted value,  $\bar{Y}$  the mean of the observed values. The higher the EF, the best the model

Finally, we evaluated the capacity of the model to rank each pair of *département*-by-year combinations correctly.

### 2.2.2 Groups of *département*-by-year combinations with similar climatic stress patterns affecting barley yields

In this second step, the 875 *département*-by-year combinations were characterized by the weighted coordinates of each of the retained components of the PLS ( $\beta_k \cdot T_{k,ij}$ ). Groups of department-by-year combinations were defined on the basis of these weighted coordinates. These groups are thus affected by similar combination of climatic stress, thereafter called as climatic-stress patterns (CP). More precisely, euclidean distances were calculated between each pair of *département*-by-year combination coordinates. The *département*-by-year combinations were then clustered into patterns with an ascendant hierarchical classification (AHC), with the HCPC function of the FactoMiner package (Husson *et al.*, 2010), based on the Ward criterion.

The number of partitions (Q) of the AHC was set to that yielding the highest relative loss of inertia:

$\frac{\Delta(Q)}{\Delta(Q+1)}$  with  $\Delta(Q)$  the between inertia for the Q cluster. The between inertia is calculated as follows:

$\Delta(Q) = \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^Q I_q (\bar{x}_{qt} - \bar{x}_t)^2$  where  $\bar{x}_{qt}$  is the mean of the weighted latent variable  $t$  for cluster  $q$ ,  $\bar{x}_t$  is the mean of variable  $t$  over all clusters and  $I_q$  is the number of individuals in cluster  $q$ . The yield variance explained by the groups of department-by-year combinations was calculated by comparing the between variance for Q partitions of the AHC and the total variance for the 875 environments.

The specific climatic factors affecting yield in each climatic pattern were identified by analyzing the variance (one-way ANOVA) of the climatic factors to detect significant differences in the mean value of an explanatory variable between the defined groups. If a significant difference was detected, a Tukey post-hoc test was performed, with the *agricolae* package (*de Mendiburu, 2010*).

### 2.2.3 Analysis of the frequency of climatic-stress patterns by year and site

In this third step, the frequency of climatic patterns was calculated for each of the 25 years (considering 35 *départements* each year), and for each of the 35 *départements* (considering 25 years for each *département*). Groups of *départements* were then created based on the frequency of the climatic patterns over 25 years, hereafter referred to as geographic clusters (GCs). *Départements* with similar frequencies were pooled by ascendant hierarchical classification (AHC in the *factominer* package – using the Ward criterion and Euclidean distances). The number of clusters was defined as the partition resulting in the greatest relative loss of inertia. The yield variance explained by the geographic clusters was calculated as previously described for the climatic patterns.

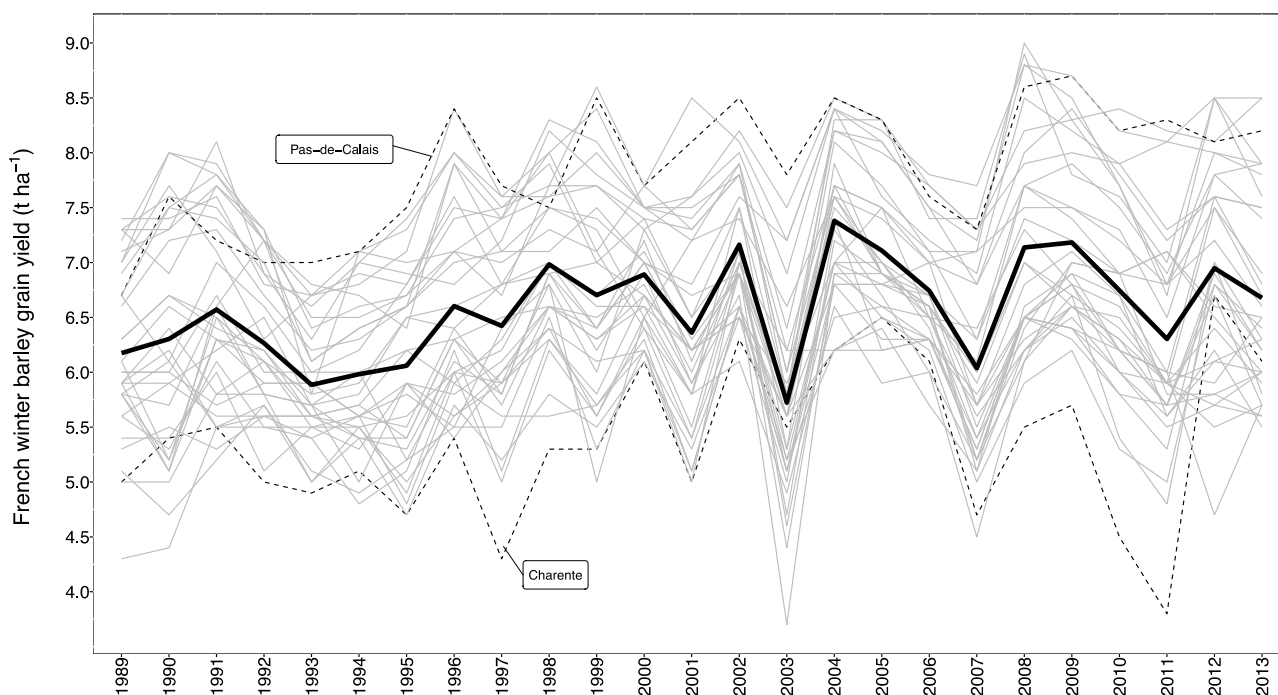
R software (*R Core Team, 2015*) was used for all data analyses, statistics and graphics.

### 3. Results

#### 3.1. Description of historical yield series and climatic variables

The mean yield of winter barley over the 35 *départements* was 6.7 t ha<sup>-1</sup> over the 1989-2013 period, ranging from 5.7 to 7.5 t ha<sup>-1</sup> depending on the year (**Figure 4.1**). Large differences were also observed between *départements*. For instance, the “Charente” *département* (lower dashed line, Fig. 1) had the lowest mean yield (5.4 t ha<sup>-1</sup>) over the 25-year period, whereas the “Pas-de-Calais” (upper dashed line) *département* has the highest yield (7.8 t ha<sup>-1</sup>). Mean yield discrepancies between geographic units varied considerably between years (**Figure 4.1**): from 1.60 t ha<sup>-1</sup> in 2000 to 4.50 t ha<sup>-1</sup> in 2011.

**Figure 4.1.** Mean yield of winter barley (*Hordeum vulgare* L.; t ha<sup>-1</sup>) for the 35 *départements* (French administrative units) over the 1989-2013 period. The black line is the mean yield for the 35 French *départements*. The dashed lines correspond to the *départements* with the lowest and highest mean yields



The climatic variables highlighted the high degree of climatic variability experienced by barley crops in France, over both *départements* and years (**Table 4.2**). The mean minimum (and maximum) temperature varied by 8.1 (8.1), 8.8 (13.0) and 7.1 (8.8)°C between *départements* for the three phenological stages. Similarly, mean rainfall (and evapotranspiration) varied by 531 (97), 372 (87) and 274 (153) mm between *départements* for the three phenological stages. The mean vapor deficit pressure differed by 10, 19 and 20 hPa for the three periods. Finally, radiation levels differed by 3326, 10751 and 8396 MJ.m<sup>-2</sup> for the three periods.



**Table 4.2.** Mean value (minimum/maximum) for main climatic variables, by development period over the 35 *départements* (French geographical units) from 1989-2013 years. Tmin: minimum temperature, Tmax: maximum temperature, Rainfall: cumulative rainfall, Evapotranspiration: cumulative evapotranspiration, VPD: mean vapor pressure deficit.

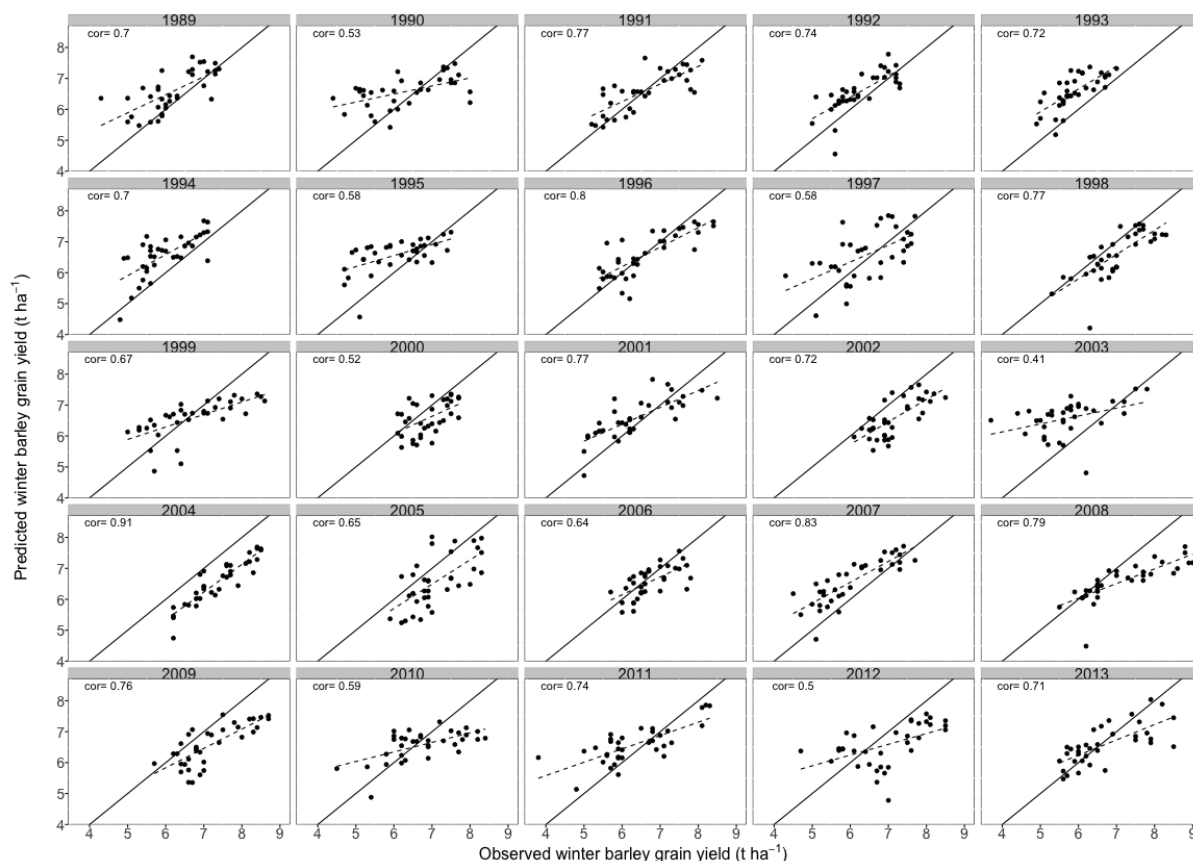
Climatic variable	Phenological stage		
	Winter	Stem elongation	Grain filling
Minimum temperature (°C)	2.8 (-0.6/7.5)	4.6 (0.4/9.3)	10.9 (7.3/14.4)
Maximum temperature (°C)	8.8 (5.3/13.4)	14.1 (7.0/20.0)	21.3 (17.1/25.9)
Radiation (MJ.m <sup>-2</sup> )	4681 (3094 /6420)	12924 (7381/18132)	18853 (15136/23532)
Rainfall (mm)	292 (106/637)	107 (12/384)	135 (31/305)
Evapotranspiration (mm)	109 (60/157)	129 (96/183)	240 (171/324)
Vapor pressure deficit (hPa)	19 (15/25)	25 (17/36)	40 (32/52)

### 3.2. Amount of yield variability explained by climatic factors

We retained four principal components based on the 14 initial climatic factors in the partial least squares regression model. Indeed, the error of prediction decreased up to four latent variables (RRMSEP= 12.3, 11.9, 11.6 and 11.5 respectively for 1, 2,3 and 4 latent variables), and increased thereafter (RRMSEP= 11.6, 11.7 respectively for 5 and 6 latent variables). The RMSEP and model efficiency for the final PLS model with four latent variables were 0.78 t ha<sup>-1</sup> and 0.35, respectively. Pearson coefficients for the correlation between observed and predicted *155epartment* yields for each studied year ranged from 0.41 to 0.91 (Figure 4.2), and were below 0.5 only for 2003. Overall, the model correctly ranked 74% of *155epartment-by-year* combinations for yield. Moreover, ranking errors strongly decreased with increasing yield discrepancies between *155epartment-by-year* combinations. For example, the model correctly ranked 68% of *155epartment-by-year* combinations for discrepancies with respect to observed yield ranging from 0.38 to 0.76 t ha<sup>-1</sup> (23% of situations), and 88% of *155epartment-by-year* combinations for discrepancies with respect to observed yield exceeding 0.76 t ha<sup>-1</sup> (45% of situations).

### 3.3. Combinations of climatic-stress patterns

Four groups of *155epartment-by year* combinations corresponding to different climatic-stress patterns (CP) were created by ascendant hierarchical clustering (Figure 4.3a) based on the PLS results. These four groups explained 26% of the variability of crude yield data (and 72.5% of the yield variability explained by the PLS). Four classes seemed to be an appropriate trade-off in this study, as the inertia gained by adding a 5<sup>th</sup> pattern was 3.5 unit smaller than that gained by adding a 4<sup>th</sup> pattern, and it increased the proportion of the variability explained by only 2.4 %.



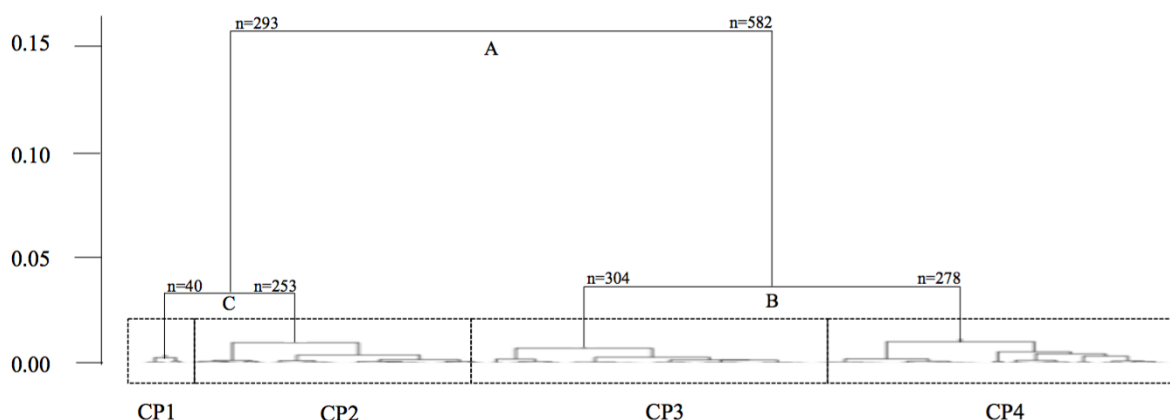
**Figure 4.2.** Observed vs. predicted grain yields ( $\text{t ha}^{-1}$ ) for winter barley (*Hordeum vulgare L.*), for each of the 25 years (1989-2013), with year-based cross-validation. Pearson coefficients for the correlation between observed and predicted values are shown in the top left corner of each subplot. The 1:1 line represents the first bisector. The dashed line is a linear regression on the predicted values.

The 4 CPs involved highly diverse combinations of climatic factors affecting yield (**Figure 4.3b**). The first dichotomy (letter A – **Figure 4.3a**) of the AHC differentiated the CP1 and CP2 groups, which were characterized by a higher vapor deficit pressure, a higher cumulative temperature favorable for vernalization, and a risk of heat stress from the CP3 and CP4 groups.

CP1 differed from CP2 in having an extreme vapor deficit pressure throughout the crop cycle, a very high risk of heat stress and low photothermal quotient during grain filling. CP1 contained only 5.6% of the 156*department*-by-year combinations and had the lowest yield ( $5.5 \text{ t ha}^{-1}$  – **Figure 4.3b**) of the four CPs. CP2 was characterized by very low levels of rainfall during the grain-filling period. It accounted for 26% of 156*department*-by-year combinations and had a mean yield of  $6.2 \text{ t ha}^{-1}$  (**Figure 4.3b**).

CP3 had higher rainfall levels than CP4 throughout the crop cycle, and a higher frequency of low temperature during the first part of the crop cycle. CP3 accounted for 35% of 156*department*-by-year combinations, with a mean yield of  $6.5 \text{ t ha}^{-1}$  (**Figure 4.3b**). CP4 was characterized by a very low probability of heat stress during the grain-filling period. CP4 accounted for 32% of 156*department*-by-year combinations and had the highest yield of the four CPs ( $7.2 \text{ t ha}^{-1}$ , **Figure 4.3b**).

a.



b.

CP	nb	Yield	Vapor pressure deficit			Amount of rainfall			Low temperature			High temperature		Frost		Photothermal quotient		
			W.	S.E.	G.F.	W.	S.E.	G.F.	W.	S.E.	G.F.	W.	S.E.	W.	S.E.	G.F.		
CP1	4.6	83 d	110 a	116 a	111 a	121 a	58 c	114 a	94 ab	643 a	163 a	78 c	105 b	85 c	105 b	87 c		
CP2	28.9	94 c	103 b	104 b	105 b	102 b	99 b	90 b	94 c	136 b	132 b	102 ab	97 b	101 b	98 a	99 b		
CP3	34.7	98 b	99 c	96 c	99 c	104 b	112 a	105 a	99 b	63 c	96 c	105 a	133 c	103 a	102 b	102 a		
CP4	31.8	109 a	97 c	98 c	95 d	91 b	93 b	102 a	108 a	30 c	66 d	96 b	66 a	99 a	99 c	101 a		
All-	<b>875</b>	<b>6.6</b>	<b>19</b>	<b>26</b>	<b>40</b>	<b>292</b>	<b>107</b>	<b>136</b>	<b>81</b>	<b>1</b>	<b>14</b>	<b>42</b>	<b>8</b>	<b>797</b>	<b>1391</b>	<b>1175</b>		

**Figure 4.3** Characterization of the 4 main climatic-stress patterns affecting barley yields in the 875 French *157 department*-by-year combinations. Letters (A, B and C) represent the nodes of the classification tree. *N* represent the number of *157 department*-by-year combination on each branch.

a.. Hierarchical tree with the Euclidean distance between the 4 climatic-stress patterns (CP1 to CP4).

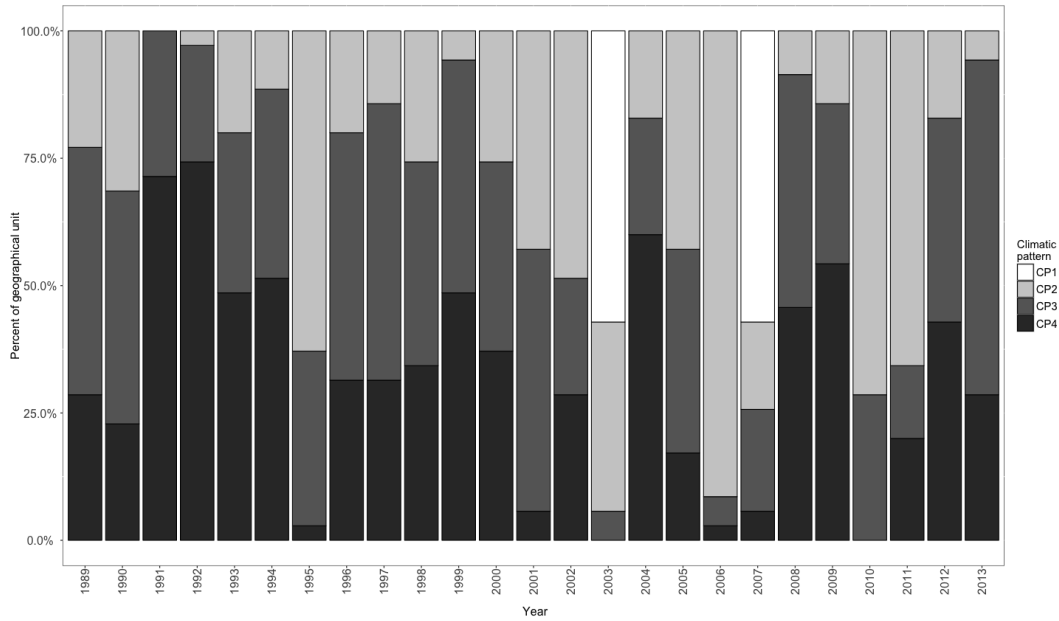
b. Percentage of the mean value of each climatic variable for the 4 climatic-stress patterns (4 first rows) and mean value over the 875 environments (last row). W: winter; S.E.: stem elongation; G.F.: grain filling; Vapor pressure deficit in hPa, Amount of rainfall in mm, temperature in °C, photothermal quotient in MJ °C-1. Within each column, different letters are associated with climatic-stress patterns with significantly different mean values ( $P < 0.05$  –Tukey test).

### 3.4. Frequency of the various climatic-stress patterns by year and *157 department*

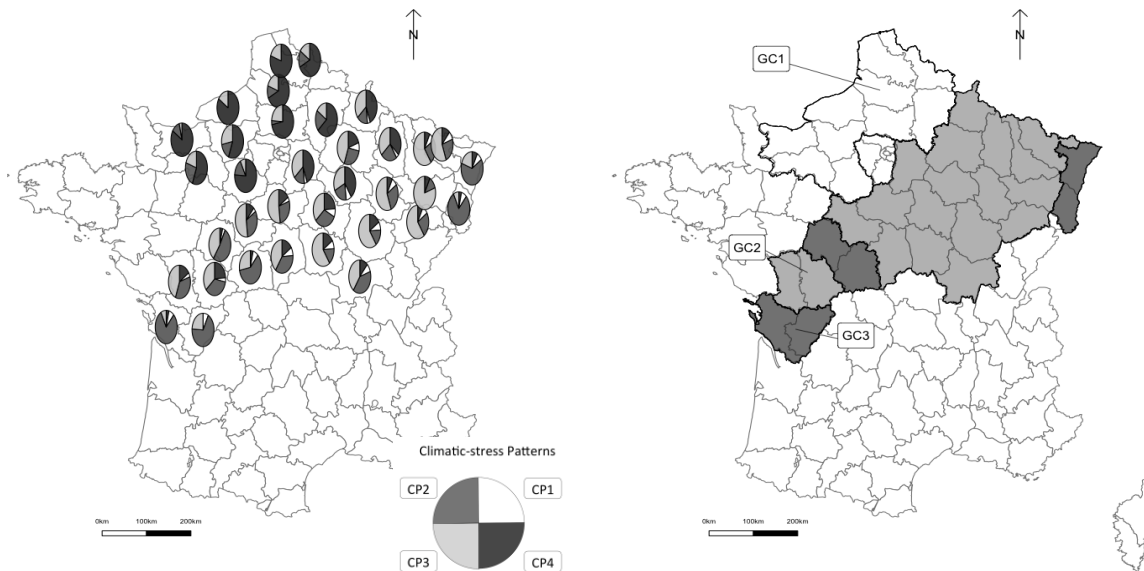
Two to four climatic-stress patterns (CPs) were present each year (Figure 4.4). The mean number of patterns per year during the 1989-2013 period was 3.0, highlighting the diversity of climatic factors by *157 department* each year. Over the 25 years considered, CP1 occurred in only two years (2003 and 2007). CP3 and CP4 occurred more frequently from 1989 to 2001 (40.3 and 37.6 of the climatic-stress patterns, respectively) than from 2002 to 2013 (28.6 and 25.4 of the climatic-stress patterns,

respectively). By contrast, CP2 accounted for 21.9% of the 158 *département*-by-year combinations for 1989 to 2001 and 36.4% of these combinations from 2002 to 2013.

The mean number of climatic-stress patterns in the French *départements* reached 3.6, with 2, 10 and 23 *départements* experiencing 2, 3 and 4 climatic-stress patterns, respectively. The overall frequency of CP4 followed a gradient, gradually increasing towards the north. By contrast, the frequency of CP3 increased towards more southerly latitudes. CP1 occurred only in *départements* in the south of the barley belt. Three geographic clusters (GC-**Figure 4.5**) were created, based on the frequency of CP membership. The three geographic clusters accounted for 87.1% of the variability of the CP, and 66% of the yield variability explained by the PLS. The relative losses of inertia between the two last clusters were 3.46, 1.93, 1.68 and 1.1 for a total of 2, 3, 4 and 5 clusters, respectively. The three geographic clusters consisted of 6, 10 and 19 geographic units, respectively, for geographic clusters GC1 to GC3, respectively. GC1 was located in northern France. GC3 was present in the West of France but also in the East. GC1 consisted of mostly CP4 (71%), followed by CP3 (17%) and CP2 (12%). GC2 consisted mostly of CP3 (48%), followed by CP2 (26%) and CP4 (20%). Finally, GC3 contained a high proportion of CP2 (67%), followed by CP3 (21%).



**Figure 4.4.** Temporal structure of the climatic-stress patterns: Proportion of the 35 départements (French geographic units) presenting a climatic-stress pattern of CP1, CP2, CP3 or CP4 by year (from 1989-2013).



**Figure 4.5.** Geographic structure of the climatic-stress patterns: (a) Frequencies of climatic-stress patterns in each 159 département (French geographic units), (b) Geographic clusters defined on the basis of the frequencies of climatic-stress patterns in each 159 département.

## 4. Discussion

### 4.1. Capacity of models to predict yields from climatic data

The predictive quality of our PLS model (39% of yield explained, RRMSEP of 11.9 %, RMSEP of 0.8 t ha<sup>-1</sup> for leave-one-out validation based on year) was in the same range as that of models assessed in previous studies. For example, *Chmielewski and Potts, (1995)* and *Thorne et al., (1988)*, in a long-term experiment at Rothamsted, UK, reported correlation coefficients for the relationship between observed and predicted yields in the range of 0.45–0.6, thus accounting for 20–35% of the variability in wheat grain yields. However, the use of a partial least squares regression model capable of handling the correlations between variables generally leads to more accurate predictions than multiple regression models (*Cramer, 1993; Lorber et al., 1987*) when larger numbers of climatic variables are included in the model. With a model based on 17 climatic variables, *Landau et al. (2000)* reported a RMSEP of 1.21 t ha<sup>-1</sup> (14.7% of the mean yield) for wheat yields for 1976-1993 in the UK. Similarly, with a model based on a combination of 5–7 variables, selected from an initial pool of over 250 candidate climatic factors, *Gouache et al. (2015)* reported a RMSEP for wheat yields of 0.64 to 1.17 t ha<sup>-1</sup> (for a mean yield of 6.0 to 8.0 t ha<sup>-1</sup>) for 2011-2014 in France.

In our study, we took into account only some of the factors potentially affecting yield: this may explain the poor predictive quality for some years for some *départements* (e.g. in 2012) or the poor discrimination of yields between *départements* (e.g. in 2003). Due to a lack of data, we did not include biotic and non-climatic abiotic stresses, such as crop nitrogen nutrition or disease intensity, in the model, although such factors may have affected yield. For example, *Zhang et al. (2006)* demonstrated that disease intensity varied largely according to site within the French wheat belt. However, in our study, the data used originated from farmers' fields, which are usually protected against diseases: the mean treatment frequency index (TFI) excluding herbicide and seed treatment reached 1.82 for barley crops in the 35 French *départements* considered in 2011 (*Agreste, 2016*). Moreover, some of the climatic variables (e.g. rainfall during grain filling) included in our PLS model may account for part of the variability due to potential diseases, through confounding effects (*Luck et al., 2011*). Similarly, rare or extreme events were not fully predicted by our model. The lower Pearson's correlation coefficient for certain years may be due to particular climatic conditions: for example, in 2003, there was a strong heat wave in France (*Ciais et al., 2005*). Similar, in 2012, unusual episodes of frost occurred, with a major impact on cereal yield (*Deswarte et al., 2012*).

Finally, unlike *Gouache et al. (2015)*, we did not take into account the trend towards a positive increase in yield as a result of genetic progress. Indeed, scientific studies have reported a stagnation of yields for barley in Europe (*Dawson et al., 2015*) and for other cereals in France (*Brisson et al., 2010*), since the mid-1990s. As our study concerned a similar period (from 1989 to 2013), we chose not to include this effect.

#### 4.2. Combinations of climatic–stress patterns in the French barley belt

The four climatic-stress patterns defined in our study captured most of the climatic variability explained by the PLS and revealed the occurrence of very different stresses over the crop cycle. They also resulted in very different yields (from 5.5 to 7.2 t ha<sup>-1</sup>). The climatic-stress patterns defined here are, thus, highly pertinent for characterization and classification of the TPE for barley in France.

Our findings highlight the major impact on yield of climatic factors at the end of the crop cycle. We found that water deficit during the grain-filling period frequently affects yields in the French barley belt (see, for example, CP2, which accounted for 29% of 161 *département*-by-year combinations), as already reported in previous studies for wheat and spring barley (e.g. *Brancourt-Hulmel et al., 1999; Le Bail & Meynard, 2003*). We also showed that water deficit during the grain-filling period is often linked to heat stress. Indeed, CP2, which is characterized by significantly smaller amounts of rainfall during grain-filling than the other CPs, was also characterized by more than 18 days with a temperature over 25°C during this period.

In CP1, there was an extremely large number of days of high temperatures during the grain-filling period, associated with heat stress during stem elongation. CP1 had the lowest yield of the climatic-stress patterns. These findings are consistent with those of many other studies highlighting yield losses due to heat stress during grain-filling, both in France and worldwide (e.g. *Brisson et al., 2010; Fischer, 1985; Lobell et al., 2005*).

We found that the photothermal quotient was not a major variable for discriminating climatic-stress patterns and explaining yield discrepancies between groups. This result conflicts with that of *Lecomte (2005)*, who found that the photothermal quotient had a major impact on yield in wheat multisite trials in France. *Gouache et al. (2015)* found that photothermal quotient was a secondary explanatory factor explaining French wheat yields over a set of 19 *départements* in northern France. Our study also focused on *départements* in northern France, where the variation of photothermal quotient may be smaller than that in the wheat trials of *Lecomte (2005)*, which were located throughout France.

We also found that climatic variables during the stem elongation period played an important role in the discrimination of climatic-stress patterns. For example, CP2 and CP3 differed mostly in terms of frost levels and the amount of rainfall during the stem elongation period.

#### 4.3. Temporal and geographic structure of climatic-stress patterns: implications for farmers and breeders

In this study, we chose to identify the climatic-stress factors affecting yield in each of the 875 *département*-by-year combinations, rather than in the 35 *départements*. An analysis of the climatic factors affecting yield in 161 *département*-by-year combinations provided us with a more precise representation of the stress experienced by the crop and of interannual variability than an analysis based directly on *départements*.

Despite the high level of interannual variation, the frequencies of the CPs differed little from year to year. CP4 seems to have been less frequent in recent years, whereas CP2 seems to have become more frequent. CP2 is characterized by a higher mean number of days of frost in winter, and a larger number of days with temperatures over 25°C during grain-filling period than CP4. These findings are consistent with the higher frequency of extreme weather events, such as heat waves and prolonged droughts, observed in recent years (e.g. *Christidis et al., 2014; Gourdjji et al., 2013*). In our study, CP1 was identified in only two years (2003 and 2007), corresponding to very unusual situations. This finding confirms those of the *IPCC (2012)*, which has projected increasing year-to-year variations in climatic conditions due to climate change. Moreover, in this study, the mean number of climatic-stress patterns present in each *162epartment* (over the 25 years analyzed) reached 3.6 (for the 4 climatic-stress patterns considered), highlighting the very high levels of interannual variability for factors affecting yields. This study thus demonstrates that a single stress pattern is not sufficient to describe precisely the climatic variability in small geographic units, as has previously been assumed in some TPE characterizations (e.g. *Hernandez-Segundo et al., 2009; Hodson & White, 2007*). Our findings also show that, despite clear differences in the frequencies of climatic-stress patterns with latitude, similar climatic-stress patterns can occur in northern France and in the eastern and western parts of the barley production area. Precise characterization of TPE provides considerable advantages to breeding programs for the broad adaptation of genotypes, as it allows to weight the sites in the multi-environment trials by the representativeness of the pedoclimatic conditions with respect to the TPE (*Chenu et al., 2013*). Breeding system simulations have, indeed, demonstrated advantages of a weighted selection strategy for highly variable TPEs (*Podlich et al., 1999*). Some authors (e.g. *Reynolds et al., 2010*) have argued that broadly adapted cultivars are crucial, to buffer unpredictable climatic stresses, such as drought, extreme heat and cold. Moreover, the development of genotypes broadly adapted to a wide range of sites and years has long been the main target of breeders (*Eberhart & Russell, 1966; Shukla, 1972*), as this would maximize the return on investment.

Various studies have provided evidence that precise characterization of the TPE makes it also possible to increase yield progress in particular environments (e.g. *Campos et al., 2004; Cooper et al., 1995; Bänziger et al., 2006* for drought-prone environments). Knowledge of the geographic structure of the main stresses affecting yield is also of great interest when selecting sites for multi-environment trials, and designing appropriate breeding programs (e.g. *Trethowan et al., 2003*). TPE characterization and the choice of trial site can improve our understanding of genotype-by-environment interactions (*Chenu et al., 2013*), by making it easier to link varietal characteristics to environmental stress. This precise characterization and classification of the TPE can thus help breeders and farmers to identify the genotypes best adapted to specific conditions.

Breeding genotypes adapted to some specific conditions could allow the cultivation of various cultivars adapted to the main stress patterns within the TPE, in the same or different fields on a farm. This adaptation is particularly useful, when the combinations of factors affecting yield are highly diverse



within a given region, as observed here. It has been suggested that growing different varieties at different sites may be a better strategy than that based on the use of broadly adapted varieties (Casadebaig *et al.*, 2016; Hammer *et al.*, 2014). Growing different cultivars adapted to the main stress patterns might also smooth the risk of low yield due to the choice of a cultivar not adapted to the weather of the year concerned. Finally, varietal mixtures increase tolerance to abiotic and biotic stresses, contributing to more stable yields (Kilaer *et al.*, 2009). Barkley *et al.* (2010) argued that large potential gains are possible from the use of mixtures of varieties with opposite responses to growing conditions such as drought.

Characterization and classification of the TPE may thus be the starting point for the design and assessment of new ideotypes and a way to unravel genotype-by-environment interactions (Chapman *et al.*, 2000; Chenu *et al.*, 2011) for the development of more sustainable farming systems. Improvements in the agrifood system will, indeed, require combined efforts in the agriculture and food sectors on the part of genetic, technological, organizational and institutional stakeholders (Lamprinopoulou *et al.*, 2014; Meynard *et al.*, 2016). Moreover, Brouwer *et al.* (2016) have argued that the breeding of plant varieties specifically adapted to regional production and end-use is an important component in the creation of a resilient food system. Numerous local malt production industries and breweries are emerging in France and other countries (Carroll and Swaminathan, 2000, Brasseur de France 2015), contributing to the development of local food systems (e.g Brouwer *et al.*, 2016; Courtonne *et al.*, 2015). However, the cultivation of different genotypes in small regions may be difficult to achieve for malting barley, as maltsters and brewers currently demand homogeneous single-genotype batches.

### **Conclusion**

Based on historical yield records and a weather database, we identified four contrasting climatic-stress patterns experienced by barley crops in the French barley belt. The climatic-stress patterns explained 26% of total yield variability and differed mostly in terms of vapor deficit pressure and low temperatures in the first part of the growth cycle, and water shortage stress and high temperatures during grain-filling. French malting barley-producing *départements* were characterized by a mean of 3.6 climatic-stress patterns. Three main geographic clusters with homogeneous frequencies of climatic-stress patterns were identified. Overall, our study demonstrated that i) a large amount of yield variability could be explained by a small number of climatic variables, ii) one stress pattern is not sufficient to describe in detail the climatic variability in small geographic units, iii) the same climatic-stress pattern may occur in very distant geographic units or years. The characterization of crop environments should, thus, explicitly take interannual variability into account. Our characterization of French barley-producing environments is potential useful for the optimization of trial locations in multi-environment networks, and the definition of barley ideotypes specifically or globally adapted to the main combinations of climatic factors affecting yield. These findings have implications for local and regional genotype adaptation strategies.

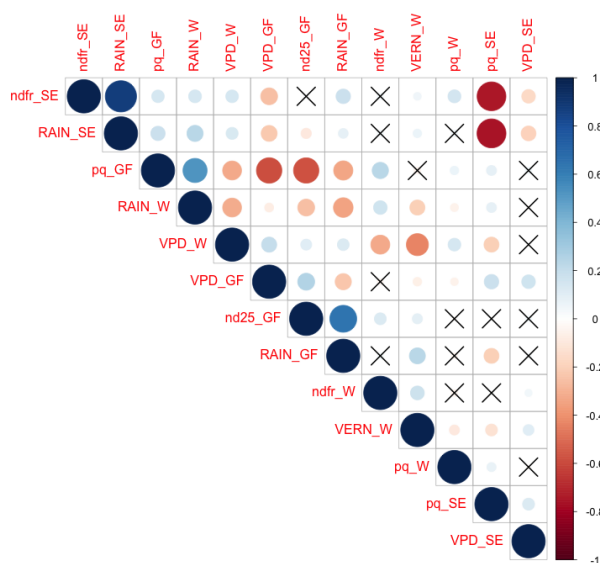
### **Acknowledgments**

This work was supported by a grant from the French Ministry of Agriculture (CASDAR Eco2malt). We thank T. Ben Ari and D. Makowski for helpful comments on a previous version of the manuscript.

**Supplementary**

Fig. 1.

Correlation matrix for the 14 climatic factors included in the partial least squares analysis. The sizes of the points are proportional to Pearson's correlation coefficient. Crosses indicate non-significant correlations. Ndf: number of days of frost, pq= photothermal quotient, rain: amount of rainfall, VPD: vapor pressure deficit, VERN: low temperature for vernalization, W: winter, SE: stem elongation, GF: grain-filling.





## References

- Bänziger, M., Setimela, P.S., Hodson, D., Vivek, B., 2006. Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to southern Africa. *Agric. Water Manag.* 80, 212–224.
- Barkley, A., Hawana Peterson, H., Shroyer, J., 2010. Wheat variety selection to maximize returns and minimize risk: an application of portfolio theory. *J. Agric. Appl. Econ.* 42, 39.
- Basford, K.E., Cooper, M., 1998. Genotype×environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia This review is one of a series commissioned by the Advisory Committee of the Journal. *Aust. J. Agric. Res.* 49, 153. doi:10.1071/A97035
- Brancourt-Hulmel, M., Lecomte, C., Meynard, J.-M., 1999. A Diagnosis of Yield-Limiting Factors on Probe Genotypes for Characterizing Environments in Winter Wheat Trials. *Crop Sci.* 39, 1798. doi:10.2135/cropsci1999.3961798x
- Braun, H.-J., Rajaram, S., van Ginkel, M., 1996. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92, 175–183. doi:10.1007/BF00022843
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Res.* 119, 201–212.
- Brouwer, B.O., Murphy, K.M., Jones, S.S., 2016. Plant breeding for local food systems: A contextual review of end-use selection for small grains and dry beans in Western Washington. *Renew. Agric. Food Syst.* 31, 172–184. doi:10.1017/S1742170515000198
- Calhoun, D., Gebeyehu, G., Miranda, A., Rajaram, S., Van Ginkel, M., 1994. Choosing evaluation environments to increase wheat grain yield under drought conditions. *Crop Sci.* 34, 673–678.
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J., Edmeades, G., Schussler, J., 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Res.* 90, 19–34.
- Carroll, G.R., Swaminathan, A., 2000. Why the Microbrewery Movement? Organizational Dynamics of Resource Partitioning in the US Brewing Industry 1. *Am. J. Sociol.* 106, 715–762.
- Casadebaig, P., Mestries, E., Debaeke, P., 2016. A model-based approach to assist variety evaluation in sunflower crop. *Eur. J. Agron.* 81, 92–105. doi:10.1016/j.eja.2016.09.001
- Chapman, S., Hammer, G., Butler, D., Cooper, M., 2000. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. *Crop Pasture Sci.* 51, 223–234.
- Chenu, K., Cooper, M., Hammer, G.L., Mathews, K.L., Dreccer, M.F., Chapman, S.C., 2011. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. *J. Exp. Bot.* 62, 1743–1755. doi:10.1093/jxb/erq459
- Chenu, K., Deihimfard, R., Chapman, S.C., 2013. Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt - spatial and temporal trends. *New Phytol.* 198, 801–820. doi:10.1111/nph.12192
- Chmielewski, F.-M., Potts, J., 1995. The relationship between crop yields from an experiment in southern England and long-term climate variations. *Agric. For. Meteorol.* 73, 43–66.
- Christidis, N., Jones, G.S., Stott, P.A., 2014. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nat. Clim. Change* 5, 46–50. doi:10.1038/nclimate2468
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533. doi:10.1038/nature03972
- Comstock, R., 1977. Quantitative genetics and the design of breeding programs. Presented at the Proceedings of the international conference on quantitative genetics, Iowa State University Press, Ames, p. 1705 1718.
- Cooper, M., Fox, P., 1996. Environmental characterization based on probe and reference genotypes.

- Cooper, M., Stucker, R., DeLacy, I., Harch, B., 1997. Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield. *Crop Sci.* 37, 1168–1176.
- Cooper, M., Woodruff, D., Eisemann, R., Brennan, P., DeLacy, I., 1995. A selection strategy to accommodate genotype-by-environment interaction for grain yield of wheat: managed-environments for selection among genotypes. *Theor. Appl. Genet.* 90, 492–502.
- Courtonne, J.-Y., Alapetite, J., Longaretti, P.-Y., Dupré, D., Prados, E., 2015. Downscaling material flow analysis: The case of the cereal supply chain in France. *Ecol. Econ.* 118, 67–80. doi:10.1016/j.ecolecon.2015.07.007
- Cramer, R.D., 1993. Partial Least Squares (PLS): Its strengths and limitations. *Perspect. Drug Discov. Des.* 1, 269–278. doi:10.1007/BF02174528
- Dawson, I.K., Russell, J., Powell, W., Steffenson, B., Thomas, W.T.B., Waugh, R., 2015. Barley: a translational model for adaptation to climate change. *New Phytol.* 206, 913–931. doi:10.1111/nph.13266
- de Mendiburu, F., 2010. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package version 1.0–9. Hosted on the Vienna University of Economics and Business website.
- Deswarte, J., Ducheyron, P., Gouache, D., 2012. Céréales d'hiver Un gel tardif modifie la capacité de résistance des plantes face au froid. *Perspect. Agric.* 53–55.
- Eberhart, S.A., Russell, W.A., 1966. Stability Parameters for Comparing Varieties I. *Crop Sci.* 6, 36. doi:10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x
- Fischer, R., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105, 447–461.
- Gouache, D., Bouchon, A.-S., Jouanneau, E., Le Bris, X., 2015. Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France. *Agric. For. Meteorol.* 209–210, 1–10. doi:10.1016/j.agrformet.2015.04.027
- Gourdji, S.M., Sibley, A.M., Lobell, D.B., 2013. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environ. Res. Lett.* 8, 24041.
- Hammer, G.L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M.T., van Oosterom, E., Jordan, D., 2014. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop Pasture Sci.* 65, 614–626.
- Hernandez-Segundo, E., Capettini, F., Trethowan, R., van Ginkel, M., Mejia, A., Carballo, A., Crossa, J., Vargas, M., Balbuena-Melgarejo, A., 2009. Mega-Environment Identification for Barley Based on Twenty-Seven Years of Global Grain Yield Data. *Crop Sci.* 49, 1705. doi:10.2135/cropsci2008.04.0227
- Hodson, D., White, J., 2007. Use of spatial analyses for global characterization of wheat-based production systems.
- Husson, F., Josse, J., Pagès, J., 2010. Principal component methods - hierarchical clustering - partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data?
- Iizumi, T., Yokozawa, M., Nishimori, M., 2009. Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach. *Agric. For. Meteorol.* 149, 333–348. doi:10.1016/j.agrformet.2008.08.015
- IPCC, 2012. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Kilaer, L.P., Skovgaard, I.M., Østergaard, H., 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: a meta-analysis of field trials. *Field Crops Res.* 114, 361–373.
- Lamprinopoulou, C., Renwick, A., Klerkx, L., Hermans, F., Roep, D., 2014. Application of an integrated systemic framework for analysing agricultural innovation systems and informing innovation policies: Comparing the Dutch and Scottish agrifood sectors. *Agric. Syst.* 129, 40–54.
- Landau, S., Mitchell, R.A.C., Barnett, V., Colls, J.J., Craigan, J., Moore, K.L., Payne, R.W., 1998. Testing winter wheat simulation models' predictions against observed UK grain yields. *Agric. For. Meteorol.* 89, 85–99. doi:10.1016/S0168-1923(97)00069-5

- Landau, S., Mitchell, R.A.C., Barnett, V., Colls, J.J., Craigon, J., Payne, R.W., 2000. A parsimonious, multiple-regression model of wheat yield response to environment. *Agric. For. Meteorol.* 101, 151–166. doi:10.1016/S0168-1923(99)00166-5
- Le Bail, M., Meynard, J.-M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie* 23, 13–27. doi:10.1051/agro:2002029
- Lecomte, C., 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptées à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. INA-PG (AgroParistech), Paris.
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Matson, P.A., Naylor, R.L., Falcon, W.P., 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Res.* 94, 250–256.
- Löffler, C.M., Wei, J., Fast, T., Gogerty, J., Langton, S., Bergman, M., Merrill, B., Cooper, M., 2005. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems. *Crop Sci.* 45, 1708–1716.
- Lorber, A., Wangen, L.E., Kowalski, B.R., 1987. A theoretical foundation for the PLS algorithm. *J. Chemom.* 1, 19–31.
- Luck, J., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K., Chakraborty, S., 2011. Climate change and diseases of food crops: Diseases of food crops. *Plant Pathol.* 60, 113–121. doi:10.1111/j.1365-3059.2010.02414.x
- Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., Michon, C., 2016. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agric. Syst.* doi:10.1016/j.agry.2016.08.002
- Mickelbart, M.V., Hasegawa, P.M., Bailey-Serres, J., 2015. Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability. *Nat. Rev. Genet.* 16, 237–251. doi:10.1038/nrg3901
- Murphy, K.M., Campbell, K.G., Lyon, S.R., Jones, S.S., 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Res.* 102, 172–177. doi:10.1016/j.fcr.2007.03.011
- Podlich, D.W., Cooper, M., Basford, K.E., 1999. Computer simulation of a selection strategy to accommodate genotype-environment interactions in a wheat recurrent selection programme. *Plant Breed.* 118, 17–28. doi:10.1046/j.1439-0523.1999.118001017.x
- R Core Team, 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reynolds, M.P., Ortiz, R., others, 2010. Adapting crops to climate change: a summary. *Clim. Change Crop Prod.* CAB Int. 1–8.
- Rodriguez, D., Sadras, V.O., 2007. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 287. doi:10.1071/AR06135
- Rötter, R.P., Carter, T.R., Olesen, J.E., Porter, J.R., 2011. Crop-climate models need an overhaul. *Nat. Clim. Change* 1, 175–177. doi:10.1038/nclimate1152
- Setimela, P., Chitalu, Z., Jonazi, J., Mambo, A., Hodson, D., Bänziger, M., 2005. Environmental classification of maize-testing sites in the SADC region and its implication for collaborative maize breeding strategies in the subcontinent. *Euphytica* 145, 123–132. doi:10.1007/s10681-005-0625-4
- Shukla, G., 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity* 29, 237–245.
- Soltani, A., Bakker, M., Veldkamp, A., Stoorvogel, J., 2016. Comparison of Three Modelling Approaches to Simulate Regional Crop Yield: A Case Study of Winter Wheat Yield in Western Germany. *J. Agric. Sci. Technol.* 18, 191–206.
- Tao, F., Yokozawa, M., Zhang, Z., 2009. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agric. For. Meteorol.* 149, 831–850. doi:10.1016/j.agrformet.2008.11.004
- Thorne, G., Darby, R., Day, W., Lane, P., Welbank, P., Widdowson, F., 1988. Variation between years in growth and nutrient uptake after anthesis of winter wheat on Broadbalk field at Rothamsted, 1969–84.

J. Agric. Sci. 110, 543–559.

Trethowan, R., Van Ginkel, M., Ammar, K., Crossa, J., Payne, T., Cukadar, B., Rajaram, S., Hernandez, E., 2003. Associations among twenty years of international bread wheat yield evaluation environments. *Crop Sci.* 43, 1698–1711.

Wallach, D., Goffinet, B., 1989. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecol. Model.* 44, 299–306.

Wold, S., Martens, H., Wold, H., 1983. The multivariate calibration problem in chemistry solved by the PLS method, in: *Matrix Pencils*. Springer, pp. 286–293.

Zhang, X.Y., Loyce, C., Meynard, J.M., Savary, S., 2006. Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Prot.* 25, 1013–1023. doi:10.1016/j.cropro.2006.01.013



**Quelles stratégies de fertilisation azotée permettent d'atteindre des rendements de l'orge et une qualité brassicole élevés tout en minimisant les pertes d'azote dans une diversité d'environnements ?**

*« If we knew what it was we were doing, it would not be called research, would it? »*

*A.Einstein*



## Résumé

Le premier chapitre a mis en évidence la nécessité d'augmenter les teneurs en protéines et le calibrage des orges brassicoles dans les itinéraires techniques avec recours réduit aux intrants. Différentes voies peuvent être envisagées pour l'atteinte de ces objectifs. Adapter plus précisément les stratégies de fertilisation azotée, en modifiant les quantités d'azote apportées, le fractionnement et les dates d'apports est un levier majeur pour améliorer la production quantitative et qualitative de l'orge brassicole. Une seule modalité de fertilisation économe en engrais a été analysée dans le réseau expérimental du chapitre 1. D'autres stratégies pourraient potentiellement être adaptées pour l'atteinte de performances élevées en orge brassicole.

Ces stratégies peuvent cependant être coûteuses et complexes à analyser expérimentalement, car les effets de l'application d'azote minéral sur les cultures sont très dépendants des contextes pédoclimatiques, et notamment des conditions d'humidité du sol et de croissance de la culture dans les jours suivants l'apport. L'utilisation d'un modèle de culture pour évaluer *in silico* ces stratégies de fertilisation innovantes permet de pallier ces difficultés et de tester un grand nombre de modalités. De plus, les modèles de culture peuvent fournir des estimations des impacts environnementaux des pratiques testées, alors qu'ils sont très difficiles à mesurer ; il est alors possible de directement prendre en compte les pollutions environnementales liées à l'azote dans les stratégies de fertilisation azotée à recommander.

Ce chapitre se focalise sur les deux questions suivantes :

- Quelles stratégies de fertilisation azotée permettent de répondre aux critères brassicoles et d'atteindre un rendement élevé en orge, tout en minimisant les pertes d'azote vers l'environnement, quelle que soit l'année ?
- Les stratégies de fertilisation maximisant le rendement et les critères brassicoles sont-elles à adapter en fonction des environnements de production ?

Le rendement calibré, la probabilité d'atteindre une teneur en protéines favorable à la filière et les pertes en azote de 45 stratégies de fertilisation ont été estimés par le modèle de culture Azodyn-Orge. Les performances agronomiques et environnementales de ces stratégies ont été étudiées pour 25 années climatiques et les 35 principaux départements producteurs d'orge brassicole en France. Les stratégies optimales au sens de *Pareto*, c'est-à-dire qui ne pouvaient pas être améliorées sur un des trois critères analysés sans en détériorer un autre, ont été identifiées. Cette analyse a été effectuée soit sur l'ensemble des 25 années climatiques, soit sur les 25% des années avec les rendements les plus faibles (années à fortes contraintes climatiques), soit enfin sur les années où les conditions climatiques n'étaient pas favorables à une valorisation de l'azote en début de cycle.

Aucune des stratégies de fertilisation analysée ne permet d'optimiser simultanément les trois critères étudiés. La stratégie de fertilisation actuellement recommandée maximise la probabilité de respecter l'intervalle de teneur en protéines, mais aboutit à un rendement plus faible et à des pertes d'azote environnementales plus élevées, par rapport à d'autres stratégies analysées. En cas de conditions climatiques défavorables pour l'apport d'azote le plus précoce (~20% des situations), ce différentiel de performance s'accroît par rapport aux autres stratégies étudiées.

Décaler et réduire les apports azotés, par rapport à la stratégie de fertilisation actuellement recommandée permet d'atteindre un meilleur compromis entre les trois critères étudiés et notamment de largement réduire les pertes environnementales d'azote. Différentes modalités de réduction et de décalage des apports ont été identifiées. Au sein de ces stratégies, celles maximisant les performances agronomiques diffèrent suivant les groupes de départements considérés.

Les travaux présentés permettent d'envisager une réduction des intrants tout en minimisant la perte de production quantitative et qualitative pour la production d'orge brassicole.

**Messages clés :**

- La stratégie de fertilisation actuellement recommandée en orge brassicole entraîne de fortes pertes d'azote vers l'environnement
- Décaler le premier et le second apport d'azote, par rapport à la stratégie classique, permet d'atteindre un meilleur compromis entre rendement calibré, perte en azote et teneur en protéines
- Des stratégies de fertilisation azotée innovantes, améliorant les trois critères, ont été identifiées et se caractérisent globalement par des apports en azote réduits et plus tardifs par rapport à la stratégie actuellement recommandée.
- Les stratégies de fertilisation innovantes identifiées diffèrent partiellement suivant les environnements de production.

**Mots clés :** azote, front de *Pareto*, environnement cible, teneur en protéine, calibrage, modèle de culture, évaluation multi-critère

## **Model-based design of nitrogen management strategies to reduce N losses and achieve high yields and grain quality in the French barley belt**

D. Beillouin<sup>1,2\*</sup>, R. Trepos<sup>3</sup>, A. Gauffreteau<sup>1</sup>, M-H. Jeuffroy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>2</sup> Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, 59242 Cappelle-en-Pévèle, France

<sup>3</sup> MIAT Auzeville BP 52627 31326 Castanet-Tolosan, France

\*Corresponding author: PH: (33) 130 81 59 06, E-mail: [damien.beillouin@inra.fr](mailto:damien.beillouin@inra.fr)

### **Abstract**

Nitrogen fertilizer applications are essential to achieve high yield and malting specifications in barley, but may also have a deleterious effect on the environment. Process-based models are powerful tools for analyzing the impact of nitrogen management plans on various objectives across a wide range of pedoclimatic conditions. We aimed to identify the most favorable nitrogen management plans, resulting in the production of high yields of high-quality malting barley, with low N losses, in various areas within the French barley belt.

We compared 45 N fertilization strategies (including that currently recommended) differing in terms of the amount of N, splitting and application dates, in 35 French *départements* (equivalent to a county) over 25 years. The N fertilization strategies providing the best compromise between calibrated yield, grain protein content and N losses were identified by considering *Pareto* optimal solutions over the 25 years, and, more particularly, for the seven years with the lowest yields and for years in which climatic conditions were unfavorable for efficient use of the early N supply. The current recommended N fertilization strategy for barley resulted in a high probability of satisfying malting grain protein content requirements, but also to higher N losses, and lower yields than the other strategies tested. A new set of N strategies provided a better compromise between the three outputs studied. Some strategies that were robust to climatic conditions and region resulted in much lower N losses to the environment, but a slightly lower calibrated yield. By contrast, depending on the region considered, other strategies performed better for all three studied outputs simultaneously. These strategies involved the later application of smaller amounts of N.

These results constitute a first step towards the design of more sustainable farming practices, and could be used to identify the best genotype and management characteristics for low-nitrogen systems.

### **Highlights**

- The N fertilization strategies currently recommended maximize barley grain protein content but result in high N losses
- Postponing the first and second N applications leads to similar or higher calibrated yields and achievement of the required grain protein content for malting
- The strategies optimizing calibrated yield, and grain protein content and minimizing N losses differed between environments

### **Keywords**

Nitrogen;

Grain protein content;

Grain retention fraction;

Yield;

Azodyn crop model;

N use efficiency;

Pareto-based ranking

## 1. Introduction

French barley production is heavily dependent on the use of synthetic inputs, particularly nitrogen fertilizers. The amount of nitrogen applied to barley (both winter and spring varieties) was 129 kg.ha<sup>-1</sup> in 2014 (Agreste, 2017). Worldwide, more than half the N applied to crops is lost to the environment (Lassaletta *et al.*, 2014; Raun and Johnson, 1999) and these losses are a threat to both human health and ecosystems (e.g. Erisman *et al.*, 2013; Steffen *et al.*, 2015). New N fertilization strategies are therefore required to reduce the impact of N-fertilizer use on the environment. These N fertilization strategies should also make it possible to achieve a high grain yield and adequate grain quality (Bouraoui and Grizzetti, 2014; Godfray *et al.*, 2010; Tilman, 1999), to maintain the farmer's income despite the interannual variation of climatic conditions.

In malting barley, in addition to high yields, specific quality criteria must be met to optimize industrial processes (Fox *et al.*, 2003). Barley grains are considered suitable for the French malting and brewing industry if they have a protein content of 9.5% to 11.5% (of dry weight), and if more than 90% of the harvested grains are more than 2.5 mm large. The price paid to farmers is much lower for grain not meeting these requirements. Thus, N fertilizer applications on malting barley crops must aim to strike a balance between yield maximization and optimizing the proportion of grains of the desired size, the probability of grain protein content being in the malting range and the minimization of N losses (N leaching and N gaseous emission). The direct maximization of calibrated yield (weight of grains >2.5 mm large) may also be of potential interest, as farmers receive premium prices on the basis of this indicator.

Late applications of N fertilizer generally increase yield (Delogu *et al.*, 1998), but are not recommended for malting barley, to ensure that grain protein content is not too high (Baethgen *et al.*, 1995). Conversely, early N fertilizer applications generally results in greater loss of N to the environment, due to low rates of crop growth, as demonstrated for wheat (Limaux *et al.*, 1999). Gaseous emissions after N application are much smaller if crop N demand is high (Cassman *et al.*, 2002; Crews and Peoples, 2004; Meynard *et al.*, 2002), which is not the case early in the crop cycle.

Moreover, weather conditions in the days following nitrogen application have a strong impact on nitrogen use efficiency, crop growth, grain yield and grain quality (Tremblay and Bélec, 2006). High N losses also occur if N is applied to soil that is not sufficiently moist (Campbell *et al.*, 1995), or if no rainfall occurs shortly after N application (Addiscott and Powlson, 1992). However, weather conditions can be erratic, making it difficult to calculate the optimal dates and doses for nitrogen fertilizer applications. The French barley belt is subject to high levels of interannual and interregional climatic variability, which may affect production (CHAPTER 4). When trying to identify the best N fertilization strategies for stable grain yield and quality, it is important to take this climatic variability into account. It is therefore highly challenging to determine the optimal management for N fertilizer applications for malting barley.

Dynamic crop models can be helpful tools to compare and rank many nitrogen fertilization strategies involving different splitting patterns and amounts of nitrogen (*Houlès et al., 2004; Jeuffroy et al., 2001; Ten Berge and Riethoven, 1997*). Such models have been widely used to identify N fertilization strategies reaching high yield (e.g. *Kersebaum et al., 2005; Shaffer, 2002*), high protein content (*Meynard et al., 2002*) or low N leaching (*Cannavo et al., 2008; Hyttiäinen et al., 2011; Wolf et al., 2005*). One of the principal advantages of such models is that they can be used to test much larger numbers of environment-by-management situations than could ever be assessed in multi-environment trial networks (*Semenov and Halford, 2009*). Models can also be used to estimate environmental outcomes that are difficult or costly to measure experimentally (*Mary et al., 1999*), such as N leaching and losses of gaseous N. A dynamic crop model for malting barley has recently been assessed (Azodyn-barley, CHAPTER 4). This model predicts yield, grain protein content, grain size and N losses to the environment in various conditions of N availability.

Based on the outputs of the models, various methods have been proposed for the simultaneous analysis of several criteria. Synthetic indicators taking several criteria into account, such as crop gross margin, can be calculated (*Antoniadou and Wallach, 2000; Makowski and Wallach, 2001*). *Makowski and Wallach (2001)* and *Houlès et al. (2004)* considered impact on the environment by establishing a penalty function for gross margin based on soil mineral nitrogen content at harvest. *Booltink et al. (2001)* suggested that scenarios leading to a high probability of nitrogen loss to the environment should be removed from the scenarios analyzed, before the calculation of gross margin. However, in multi-objective optimization problems, interactions often occur between targets, and it is difficult to identify a single solution optimizing all objectives. The Pareto-based ranking approach is a powerful method for the combined evaluation of objectives without *a priori* weighting. This method also makes it possible to retain among the selected strategies solutions between which the designer (decision-maker) must choose, according to his or her preferences.

Thus, based on the results obtained for a dynamic barley crop model, this work aimed i) to rank N fertilization strategies according the trade-off between calibrated yield, the proportion of grains of appropriate size for industrial use and N losses, and ii) to determine whether the most favorable N fertilization strategies differ between among environments within the French barley belt.



## 2. Materials and methods

### 2.1. Range and characterization of the studied environments

The study was conducted on the 35 main barley-producing *départements* (French geographic administrative units, equivalent to a county) in France. The soil inputs for Azodyn-barley (% clay, % CaCO<sub>3</sub> and % organic N in the ploughed layer, maximum rooting depth, and water content at field capacity) were extracted for each *177 epartment*, from the European soil database (ESBD-<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets>- Hiederer, 2013). In all *départements*, soil mineral nitrogen at initialization of the model (end of winter) was set to 20 kg N.ha<sup>-1</sup>. Crop N status (characterized by the nitrogen nutrition index) was set to 1 (no N deficiency), and initial barley biomass was set to 100 g.m<sup>-2</sup>, based on the mean measurements for a previous set of field trials.

We took climate variability into account, by analyzing climate data for a period of 25 years (from 1989 to 2013). Climate inputs (minimum and maximum temperature, incident radiation, rainfall and evapotranspiration) were obtained by the daily interpolation of weather data supplied by the Joint Research Center (European commission, DG, JRC, <https://ec.europa.eu/jrc/en>) over France, on a regular 25 km grid.

The mean agronomic and environmental performances of the N fertilization strategies were then calculated for each of the main CPs of the French malting barley belt. French malting barley is produced in three main groups of *départements*, referred to hereafter as geographical cluster (CP-). Each CP is characterized by a similar frequency of occurrence of climatic factors impacting barley yields (CHAPTER 4). Briefly, CP1 corresponds to the northern part of the malting belt, and is characterized by favorable growing conditions (e.g. a small number of days with frost during winter and a low probability of heat stress during grain filling) and high yields (mean of 109% the national yield over the 1989-2013 period). CPs 2 and 3 are located in the southern part of the malting belt and are characterized by more frequent stresses (e.g. frost during winter, water stress during winter and stem elongation, and heat stress during grain filling). These stresses are more severe in CP 3 than in CP 2. Mean yield was 98% the national yield in CP 2 and 94% of the national yield in CP 3 for the 1989-2013 period.

### 2.2. Set of N fertilization strategies considered

We considered 45 N fertilization strategies (Table 5.1) differing in the amounts, dates and splitting of nitrogen fertilizer applications. We choose five amounts of total N fertilizer applied, corresponding to 0.7, 0.8, 0.9, 1 and 1.1 times the mean total N rate (hereafter referred to as the reference amount) applied in each *177 epartment* for the years 1994, 2001 and 2006 (Agreste, 2017). We defined nine strategies for the splitting of N fertilizer applications, which were coded with letters according to the number and target dates of N application (Table 5.1). The N splitting strategy currently recommended by the French agricultural technical institutes was coded “AC”. The target dates for N fertilizer application were based on *177 epartment1771* stages, as estimated for each *177 epartment* and year. Dates for the “end-of-

winter” were estimated, from the weather database, as the date on which mean daily temperature began to increase steadily. Dates for the beginning of stem elongation (BSE) were estimated in cumulative thermal units (*Robert, personal communication*). We assumed that N fertilizer was applied on the first day with favorable weather conditions for N valorization after each target date for N application. We considered days on which the soil was sufficiently moist to have favorable conditions for high levels of N valorization: cumulative rainfall over the five days preceding N application greater than cumulative potential evapotranspiration, or more than 10 mm of rainfall in the three days following N fertilizer application. The actual date of N fertilizer application could therefore be delayed with respect to the target date, due to unfavorable conditions for high N use efficiency.

**Table 5.1.** Rate (kg N ha<sup>-1</sup>) and splitting for the 45 N fertilization strategies. Splitting is coded with letters from A to E, depending on the number and target dates of N applications. The amount of N applied was calculated relative to the reference amount (mean N rate observed in each *178epartment* for the years 1994, 2001 and 2006; Agreste, 1994, 2001, 2006). A variation factor (X), taking values of 0.7, 0.8, 0.9, 1 and 1.1, was applied to the reference amount of N to obtain various amounts of total N applied for each *178epartment*. BSE = beginning of stem elongation.

N fertilization strategy	Target date for N application				
	A	B	C	D	E
	End-of-winter	End-of-winter	BSE	BSE	BSE
X_AC	50		TOTAL-50		
X_AD	50			TOTAL-50	
X_BD		50		TOTAL-50	
X_BE		50			TOTAL-50
X_CE			50		TOTAL-50
X_ACD	50		TOTAL-90	40	
X_ACE	50		TOTAL-90		40
X_BCD		50	TOTAL-90	40	
X_BCE		50	TOTAL-90		40

The interval between two consecutive N applications was never less than 15 days, to the plant has taken up most of the available N from (*Recous and Machet, 1999*). For splitting regimes involving three N applications, the amount of N fertilizer applied at the third date was set to 40 kg N ha<sup>-1</sup>, a compromise between the minimum rate that farmers would be likely to apply, and the rate preventing grain protein content from reaching excessively high levels. The amount of N for the second application was then calculated as the difference between the total amount and the amounts supplied during the other two applications. In some environments, N fertilization strategies including three applications were considered unrealistic, as at least one N of the applications would involve a rate below 40 kg N ha<sup>-1</sup>. These strategies were, therefore, not analyzed. We considered N fertilizer in the form of a solution of 50% urea and 50% ammonium nitrate, a widely used form of N fertilizer in France (*Unifa, 2016*).

We did not consider genotypic variation, and the simulations were based on a high-yield genotype (maximum yield: 11.5 t.ha<sup>-1</sup>, maximum thousand-kernel weight: 55 g).

### 2.3. Calculation of the variables studied

The Azodyn crop model is a one-day step process-based model developed for wheat (David *et al.*, 2004, 2005; Jeuffroy and Recous, 1999) and recently adapted for malting barley (CHAPITRE 3).

We analyzed the impact of the N fertilization strategies on the calibrated yield, grain protein content and N losses (N gaseous emission and N leaching) estimated by the Azodyn-Barley crop model. The probability of grains having a grain protein content in the interval suitable for malting was calculated using the commercial malting threshold (optimal value between 9.5% and 11.5% - Incograin, 2014), with a tolerance of slightly lower or higher values (1%). N losses were calculated from the end of winter to harvest, as the sum of N leaching below the rooting zone and non-recovered supply fertilizer. N strategies were considered favorable if they maximized calibrated yield and the proportion of years for which grain protein content requirements for malting were fulfilled, with minimal N losses.

### 2.4. Identification and analysis of favorable N fertilization strategies

We integrated the risk aversion of farmers into the analysis, by considering agronomic and environmental performances for three sets (denoted  $Z$ ) of situations: i) all years, ii) the 25% of years with the lowest yields, and iii) the years with unfavorable climatic conditions at the time of early N applications. For each of these sets of situations, we identified the set of strategies for which a single output could not be improved without compromising the other two (non-dominated strategies). This set of strategies are referred to as *Pareto* optimal solutions. More precisely, for the comparison of two strategies  $y_1$  and  $y_2$  among  $Z_i$ ,  $y_1$  is said to be dominated by  $y_2$  (denoted  $y_2 > y_1$ ) if, for each criterion,  $y_2$  performs at least as well as  $y_1$ . Then,  $y_1$  is a *Pareto* optimal solution if there is no  $y_1$  such that  $y_2 > y_1$ .

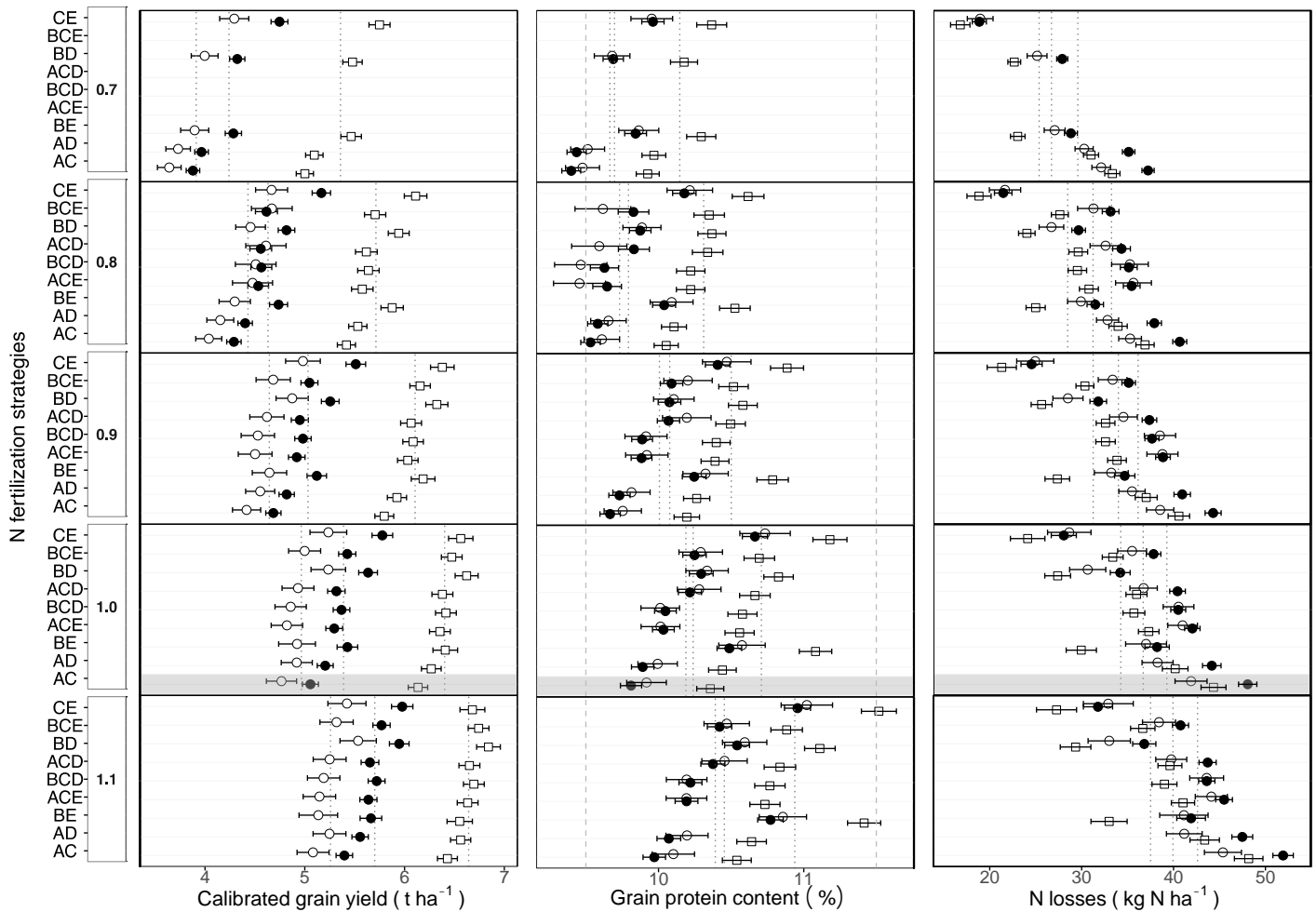
The set of strategies belonging simultaneously to the *Pareto* optimal solutions for both the three sets of situations and the three CPs of the malting barley belt was analyzed in more detail. The nitrogen nutrition index (NNI) trajectory over the crop cycle simulated by the Azodyn-Barley crop model was also analyzed, with a view to identifying possible similarities in NNI trajectory common to the best strategies.

### 3. Results

#### 3.1. Mean performance of the N fertilization strategies

For all N strategies and *départements*, the mean simulated calibrated yield ranged from 3.6 to 6.8 t ha<sup>-1</sup> over the 25 years considered (Figure 5.1). CP 1 had a higher simulated mean calibrated yield (6.1 t ha<sup>-1</sup>) than CP 2 (5.1 t ha<sup>-1</sup>) and CP 3 (4.7 t ha<sup>-1</sup>). For all situations considered, mean calibrated yield increased with N supply: 4.5, 5.0, 5.3, 5.6 and 5.9 t ha<sup>-1</sup> for 0.7, 0.8, 0.9, 1 and 1.1 times the reference N rate, respectively. The ranking of N-splitting strategies depending on the amount of applied N. For example, strategy “BE” ranked 6<sup>th</sup> in terms of calibrated yield for the nine splitting strategies for 1.1 times the reference N rate, and 3<sup>rd</sup> for the nine splitting strategies for 0.9 times the reference N rate. Some strategies with low N levels reached calibrated yields very similar to those for strategies with higher N rates of N applied earlier. In CP 3, for example, strategy 1.0\_AC gave a calibrated yield of 4.8 t ha<sup>-1</sup>, whereas strategies 0.9\_BD, 0.9\_CE and 0.8\_CE gave calibrated yields of 4.9, 5.0 and 4.7 t ha<sup>-1</sup>, respectively. The reference strategy, 1.0\_AC, had a mean calibrated yield (6.1, 5.0 and 4.8 t ha<sup>-1</sup> for CPs 1, 2 and 3, respectively) that ranked 22<sup>nd</sup>, 20<sup>th</sup> and 22<sup>nd</sup> of the 45 N strategies for CPs 1, 2 and 3, respectively. In CPs 1, 2 and 3, we found that 12, 10 and 12 strategies, respectively reached a higher calibrated yield with an amount of N similar to or lower than that of the reference strategy.

Over all N strategies and *départements*, mean grain protein content ranged from 9.4% to 11.5% for the 25 years considered (Figure 5.1). Simulated grain protein content was higher in CP 1 (10.6%) than in CP 2 (10.1%) and CP 3 (10.1%). The correlations between mean grain protein content and calibrated yield were positive and high for the 45 N strategies (coefficient of correlation > 0.75 for all three CPs). As for calibrated grain yield, some strategies with later applications of lower rates of N achieved the same grain protein content as strategies with larger amounts of N applied earlier. For example, in CP 3, strategies 1.0\_AC, 0.7\_CE and 0.8\_BD all reached a grain protein content of 10.4%. The reference strategy, 1.0\_AC, had a mean grain protein content (10.4%, 9.8% and 9.9 % for CPs 1, 2 and 3, respectively) ranked 13<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> of the 45 N strategies for CPs 1, 2 and 3, respectively. All strategies with higher mean grain protein contents were based on lower total amounts of applied N than the reference strategy.



**Figure 5.1.** Mean simulated values and standard errors of the 45 N fertilization strategies over the 25 years if climate data, for calibrated grain yield ( $\text{t ha}^{-1}$ ), grain protein content (%) and N losses ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) in the 3 geographic clusters (squares: CP 1, black circles: CP 2, white circles: CP 3). Splitting strategies are coded with letters (Table 5.1). N rate relative to the current total rate is indicated in the white boxes on the left. The reference N fertilization strategy (AC 1.0) is highlighted in gray.

For all N strategies and environments, mean N losses over the 25 years considered ranged from 17 to 52  $\text{kg N ha}^{-1}$  (Figure 5.1). Simulated N losses were slightly lower in CP 1 (32  $\text{kg N ha}^{-1}$ ) than in CP 2 (37  $\text{kg N ha}^{-1}$ ) and CP 3 (34  $\text{kg N ha}^{-1}$ ). The correlations between mean N losses and calibrated yield or grain protein content were very weak, for all 45 N strategies (coefficient of correlation  $< 0.15$  for both variables, in all three CPs). The reference strategy, 1.0\_AC, had a mean N loss (44, 48 and 42  $\text{kg N ha}^{-1}$  for CPs 1, 2 and 3, respectively) ranked 40<sup>th</sup>, 40<sup>th</sup> and 38<sup>th</sup> of the 45 N strategies for CPs 1,2 and 3, respectively.

### 3.2. Impact of climatic conditions on the implementation of N fertilization strategies

Over all environments, N applications were postponed by at least 10 days, in 8.4% to 33.3% of years, according to the target date for N application and the CPs (Table 5.2). Early N applications (target dates

A, B and C) were postponed in 11.7 % to 17.7 % of years over the three CPs. Late N applications (D and E) were delayed more frequently than early N applications. N applications were delayed more frequently in CP 3 than in CPs 1 and 2. For example, the application planned for date C was postponed by more than 10 days in 17.6% and 15.2% of years for CPs 1 and 2, respectively, and for 24.6% of years for CP 3.

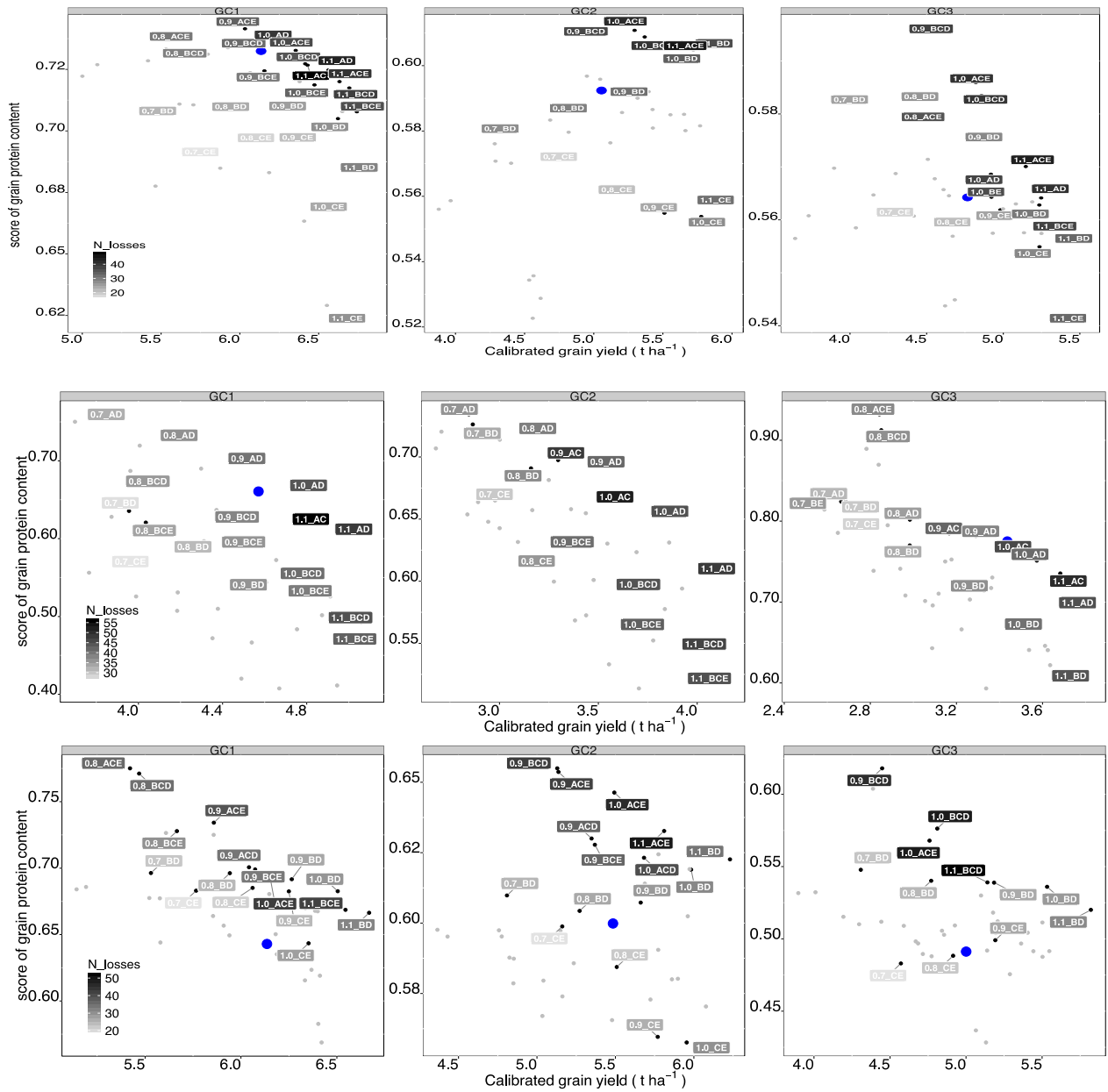
**Table 5.2.** Proportion of years (of the 25 considered) with N application postponed by at least 10 days relative to the target N supply date, in the three subregions studied. Letters refers to the date of N supply (see Table 5.1). BSE: beginning of stem elongation. Calculation made with Azodyn crop model.

<b>Target date for N application</b>	<b>All environments</b>	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>
A: End of winter	17.7	18.8	17.0	18.0
B: End of winter +10 days	11.7	8.4	12.0	16.0
C: BSE	17.5	17.6	15.2	24.6
D: BSE +15 days	26.0	25.6	26.3	26.0
E: BSE +25 days	28.9	27.2	28.4	33.3
<b>Mean</b>	<b>20.3</b>	<b>19.5</b>	<b>19.8</b>	<b>23.6</b>

### 3.3. Favorable N fertilization strategies in the three CPs of the French barley belt

For the 25 years considered, we identified 24, 14 and 19 optimal solutions for CPs 1,2 and 3, respectively (Figure 5.2a). The amounts of N supplied in these optimal strategies was highly variable (between 0.7 and 1.1 times the reference N amount). The reference strategy was not among the optimal solutions identified for any of the three CPs. Overall, 14 optimal N fertilization strategies were common to the three CPs (splitting strategies ACE, BD, CE and BCD).

Some of the strategies in CPs 1 and 2 achieved both a high absolute calibrated yield and a high score for grain protein content (Figure 5.2). However, in CP 3, the optimal solutions with a high calibrated yield had a relatively low score for grain protein content (Figure 5.2). In each CP, estimated N losses were highly variable for some strategies with relatively similar calibrated yields and grain protein contents. For example, in CP 1, N strategies 1.1.0\_AC and 0.9\_BD had calibrated yields differing by less than 0.2 t ha<sup>-1</sup> and a grain protein score of 0.01 units, but with mean N losses of 48.2 and 25.6 kg N ha<sup>-1</sup>, respectively.



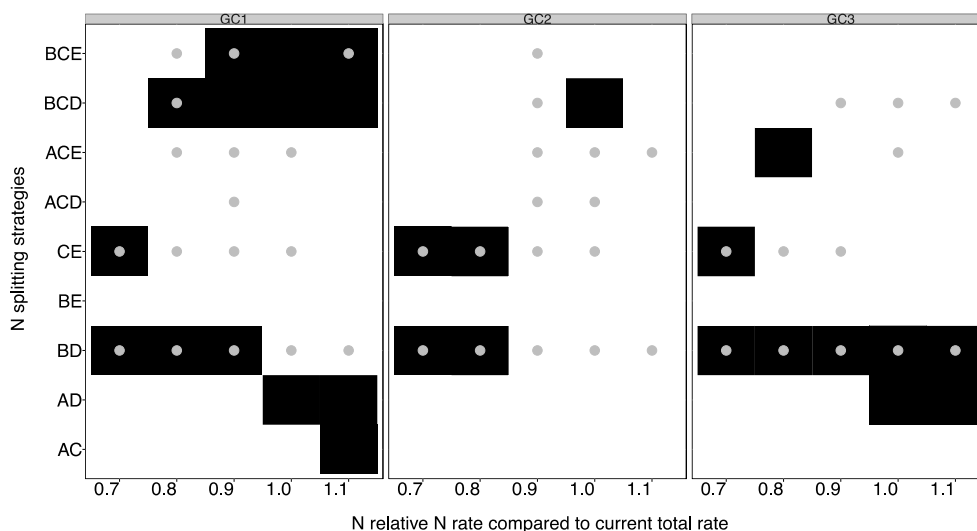
**Figure 5.2.** Pareto optimal solutions (Strategies with labels) taking into account the calibrated yield and score of grain protein and N losses content for each geographical cluster (GC) based on a) mean value of these variables over 25 years, b) mean value of the variables for the 25% lowest yielding years, c) mean value of the variables when climatic conditions are unfavorable to early N supply. Colors represent N losses (dark grey for high N losses and lightgray for low N losses). Labels refers to the splitting strategies (see Table 5.1). Gray points represent non-optimal fertilization strategies. Blue points indicate the reference strategy, when not optimal.

For the 25% of years with the lowest yields, the set of optimal strategies included 18, 16 and 17 N application strategies for CPs 1, 2 and 3, respectively (Figure 5.2b). Only eight optimal N fertilization strategies were common to all three CPs. The relative rates of N fertilizer application were between 0.7 and 1.1 times the reference amount of N for these optimal strategies. AC and AD splitting solutions were the most frequently retained in the *Pareto* solution set. In CP 1, there was a strong interaction between the total amount of N and N splitting. The later the N was applied, the lower the amount of N was required for inclusion among the *Pareto* optimal solutions.

For situations with unfavorable climatic conditions for early N applications, the best strategies achieved a similar yield and a slightly higher score for grain protein content than those retained for the 25-year mean (Figure 5.2). The set of optimal strategies for this subset of years consisted of 16, 19 and 12 strategies for CPs 1, 2 and 3, respectively (Figure 5.2). Contrary to the optimal strategies for the 25% of years with the lowest yields, the AC and AD splitting strategies were not retained for this subset of years.

The intersection of optimal solutions for the seven years with the lowest yields and the years with unfavorable climatic conditions for early N application contained eight N strategies for CP 1, five for CP 2 and three for CP 3 (Figure 5.2).

**Figure 5.3.** Pareto Optimal N fertilization strategies allowing to reach simultaneously high calibrated yield, targeted grain protein content and low N losses over the 25 years and over the 25% lowest yielding years (black square) and for situations where climatic conditions are unfavorable to early N supply (gray points) for each geographical cluster (GC). Y-axis refers to different splitting strategies described in Table 5.1.





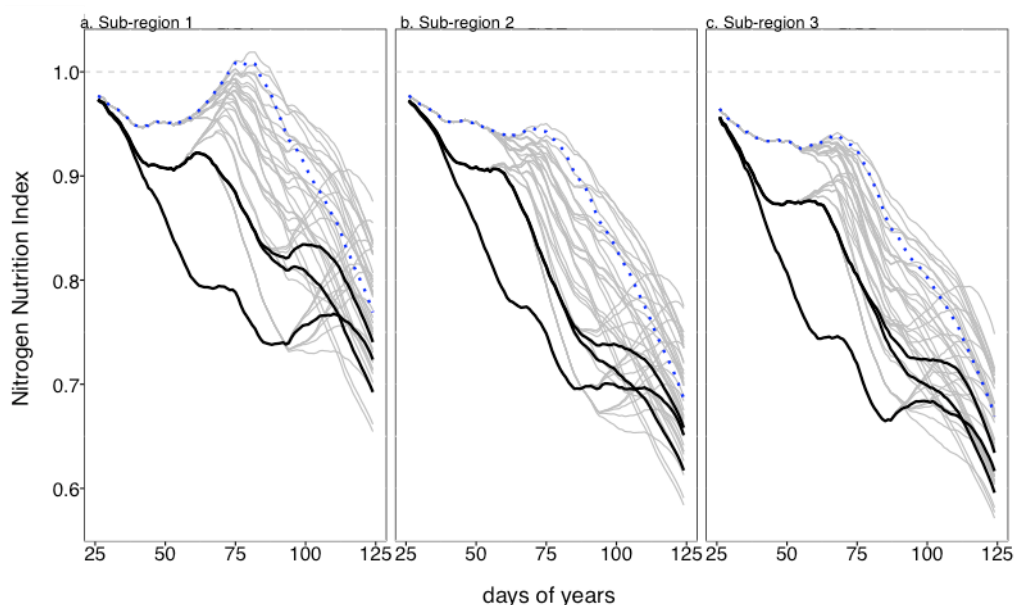
Finally, seven, four and six strategies were present in the intersection of optimal solutions for the three sets of years, for CPs 1, 2 and 3, respectively (Figure 5.3). In this set of optimal strategies, the CE and BD splitting strategies, in association with relatively low rates of N application (0.7 and 0.8 times the reference amount of N), were retained for all three CPs. These strategies gave much lower N losses than the other strategies (Table 5.3). However, their agronomic performance was also poor. The strategies with a high agronomic performance and lower levels of N application relative to the reference strategy identified differed between CPs (Figure 5.3). For example, in CP 2, strategy 0.8\_CE gave a high calibrated yield, a high probability of achieving a grain protein content in the required range and low N losses.

**Table 5.3.** Mean agronomic and environmental performances over the 25 years for the best N fertilization strategies identified through Pareto optimal solutions. N fertilization strategies are coded with number indicating the relative dose of N supplied relatively to currently recommended N dose and splitting strategies (see Table 5.1). The performance of the reference strategy (1.0\_AC) is also indicated. The strategies shown in bold resulted in a calibrated yield and/or probability of achieving malting quality at least as high as for the reference strategy.

CP	N fertilization strategies	Calibrated yield (t.ha <sup>-1</sup> )	Probability of achieving	N losses (kg N ha <sup>-1</sup> )
			satisfactory malting quality	
1	1.0_AC	6.1	0.73	44.4
	0.7_BD	5.5	0.71	22.7
	0.8_BD	5.9	0.71	24.0
	0.7_CE	5.8	0.69	16.8
	<b>0.8_BCE</b>	<b>5.7</b>	<b>0.73</b>	<b>29.5</b>
	<b>0.9_BCE</b>	<b>6.2</b>	<b>0.72</b>	<b>30.4</b>
	<b>1.1_BCE</b>	<b>6.7</b>	<b>0.71</b>	<b>36.7</b>
2	1.0_AC	5.1	0.59	48.1
	0.7_CE	4.8	0.57	18.9
	<b>0.8_CE</b>	<b>5.2</b>	<b>0.57</b>	<b>21.5</b>
	0.7_BD	4.3	0.58	27.9
	<b>0.8_BD</b>	<b>4.8</b>	<b>0.59</b>	<b>29.7</b>
3	1.0_AC	4.8	0.56	41.9
	<b>0.7_CE</b>	<b>4.3</b>	<b>0.56</b>	<b>19.0</b>
	<b>0.7_BD</b>	<b>4.0</b>	<b>0.58</b>	<b>25.1</b>
	<b>0.8_BD</b>	<b>4.5</b>	<b>0.58</b>	<b>26.7</b>
	<b>0.9_BD</b>	<b>4.9</b>	<b>0.58</b>	<b>28.5</b>
	<b>1.0_BD</b>	<b>5.2</b>	<b>0.56</b>	<b>30.7</b>
	<b>1.1_BD</b>	<b>5.5</b>	<b>0.56</b>	<b>33.0</b>

### 3.4. Nitrogen nutrition index trajectory of the most favorable N strategies

The 45 N fertilization strategies tested resulted in diverse nitrogen nutrition index trajectories (Fig. 4). The nitrogen nutrition index changed from 1 at the “end of winter” (initial value chosen for all simulations) to a value below 0.9 for CP 1, and 0.8 for CPs 2 and 3 at flowering. Three main patterns of NNI trajectory were observed in the first part of the crop cycle: i) NNI decreased rapidly after the end of winter, ii) NNI stabilized just below 1 during the 60 days following the end of winter, iii) the NNI remained above 1 during this period. Most of the favorable N fertilization strategies common to all three sets of years considered for the optimization of agronomic and environmental performances had NNI trajectories in which NNI remained low during the first part of the growing season (Figure 5.4). Various NNI trajectories were possible in the second part of the crop cycle. Early N deficiency did not seem to prevent the achievement of high quantitative and qualitative malting quality.



**Figure 5.4.** Mean simulated nitrogen nutrition index (NNI) from the end of winter to flowering, for the 45 nitrogen fertilization strategies and three CPs considered. Strategies 0.7\_CE, 0.7\_BD, and 0.8\_BD, are represented by black lines. The reference strategy (1.0\_AC) is plotted as blue dots. For description of the strategies see Table 5.1.

## 4. Discussion

### 4.1. Relevance of Azodyn crop models for shaping N fertilization strategies

The mean simulated yield of the currently recommended strategy (1.0\_AC) over the barley belt and the 25-year period considered was similar to that observed in 2015 (6.5 vs. 6.7 t ha<sup>-1</sup> respectively). Similarly, the mean grain protein content simulated by Azodyn-Barley similar to the observed value for cv. Esterel in 2014 (9.9% vs. 9.9%) and in 2015 (9.9% vs. 10.1% - Malteurs de France 2014, 2015). The yields predicted by the model for the three CPs and for the period 1989 to 2013 (7.0, 6.5 and 6.4 t ha<sup>-1</sup> for CPs 1, 2 and 3, respectively) respected the observed rankings (7.4, 6.4 and 5.9 t ha<sup>-1</sup> for CPs 1, 2 and 3, respectively). These results confirmed the capacity of the model to predict quantitative and qualitative barley production in a consistent manner.

We used the model to rank N fertilization strategies according to their agronomic and environmental performances. This model has already been shown to rank environments differing in terms of N stress in a precise manner (CHAPTER 3) and has been shown to be useful for decision support for the management of N fertilization (David *et al.* 2004). Moreover, in this study, the estimates of quantitative and qualitative production discrepancies between two contrasting strategies (1.0\_AC and 0.7\_BD) were similar to those reported in a previous study (CHAPTER 1), based on results for a different set of environments: a simulated yield decrease of 12.3% vs. 17.0% observed, and a grain protein content decrease of 3.8% vs. 7.8% observed.

The results of this study provide food for thought concerning the improvement of N fertilizer management for malting barley. We analyzed agronomic and environmental performances over large geographic regions only (three CPs, each including 6 to 19 French *départements*). Pedoclimatic conditions may vary considerably at the local level (within *départements*), with major effects on quantitative and qualitative production (e.g. Le Bail and Meynard, 2003 for spring barley in France). It may be difficult to obtain precise predictions of local agronomic performance, because the Azodyn crop model has been shown to be sensitive to pedoclimatic conditions for the prediction of grain protein content (David *et al.* 2004). The best N fertilization strategies identified here must, therefore, be tested and adapted to the different environmental conditions of farms, to ensure a satisfactory agronomic performance. Many authors have highlighted the importance of adapting farming practices to the field, climate and cropping system, to ensure that the system is sustainable (e.g. Meynard *et al.*, 2002).

### 4.2. Identification of the best N fertilization strategies for winter malting barley

It appears to be challenging to reach high calibrated yield and high probability of achieving satisfactory malting quality simultaneously, whilst substantially reduce N losses. None of the N fertilization strategies considered simultaneously satisfied all three criteria. For example, the highest yielding strategies were often associated with high N losses (Figure 5.2). Farmers and advisers therefore need to

find a suitable compromise between these criteria. The *Pareto* method, which presents trade-offs between the tested strategies (*deVoil et al., 2006*), allows the designer (or decision-maker) to determine which strategy is the best choice for his or her preferences. This method also makes it possible to present the performance of all the tested strategies visually, which is known to facilitate decision-making.

We facilitated analyses of the performances of the N fertilization strategies, by including an analysis of strategy robustness in various climatic conditions. This made it possible to take into account the risks associated with a particular N strategy. In this study, we considered the performances of strategies in the 25% of years with the lowest yields and in situations in which climatic conditions were unfavorable for early N application, to provide an indication of the robustness of this approach. We found that most of the best strategies over the entire 25-year period were not retained in either of these two situations (Figure 5.3). These strategies thus have agronomic and environmental performances that are unstable, varying with climatic conditions.

Our findings suggest that the N fertilization strategy currently recommended (1.0\_AC) is likely to result in the grain protein content requirements for malting being met. However, this strategy resulted in high N losses (Table 5.3) and ranked among the 10 worst strategies for this variable in all three CPs. The early N application in this strategy may lead to a low N use efficiency and high N losses due to the low growth rate of the crop, as demonstrated for wheat by *Limaux et al., 1999*. Moreover, the yield was rather low, as for other strategies in which the last application of N fertilizer occurred early in the crop cycle. A reduction of sink size, due to a decrease in the number of grains per square meter caused by N deficiency at flowering (*Jeuffroy and Bouchard 1999; Prystupa et al., 2004*), and greater source limitation during grain filling than for strategies in which N was applied later may account for the relatively low yields. Other strategies in which N was applied late tended to result in a higher NNI at flowering and higher yields.

Most the 45 N fertilization strategies tested did not result in *Pareto* optimal solutions, or had inconsistent performances, varying with climatic conditions or CP. However, a small set of N fertilization strategies (0.7\_CE, 0.7\_BD, 0.8\_BD) seemed to be robust to the different situations tested (Figure 5.2). These strategies had the following features in common, differentiating them from 1.0\_AC: i) much lower N losses, ii) a higher or lower grain protein content score, depending on the CP considered, iii) a lower calibrated yield (Table 5.3). These strategies would, therefore, probably not be adopted by farmers, even if agronomic performances were higher than the reference strategy in cases of climatic conditions unfavorable for early N application (Figure 5.2). Several other strategies resulted in a mean agronomic performance at least as good as that of the reference strategy over the 25 years considered, the 25% of years with the lowest yields and years with unfavorable early climatic conditions, but these strategies differed between CPs (0.9\_BCE and 1.1\_BCE in CP 1, 0.8\_CE in CP 2; 0.9\_BD, 1.0\_BD and 1.1\_BD in CP 3). Furthermore, all these strategies resulted in much lower

environmental N losses than the reference strategy. Thus, these strategies are of great potential interest for improving the sustainability of malting barley production in the French barley belt, whilst maintaining agronomic performance. They may also be of interest for the development of low-input malting barley production.

### 4.3. Future prospects for optimizing N fertilization strategies

Our results suggest that postponing the first and second N applications by 10 days or more relative to the reference strategy (e.g a BD rather than an AC splitting strategy) provides the best compromise between calibrated yield, probability meeting grain protein content criteria, and losses of N to the environment. This finding can be explained by a higher N use efficiency, due to the higher rate of biomass growth just after N application, resulting in lower N losses and higher yields. Thus, later N application made it possible to reduce the amount of N applied, as already reported for wheat (Loyce, personal communication) whilst maintaining the capacity to satisfy malting grain protein requirements. However, this recommendation goes against the current practices of cereal farmers, who tend to apply N fertilizer early in the growing seasons, to maximize the chances of rainfall after fertilizer application, even if conditions are unfavorable for high N use efficiency (Ravier *et al.*, 2016).

A global adaptation of the management system may be required to optimize the N strategy fully. For example, Loyce *et al.* (2012) highlighted the strong interaction between biomass at the end-of-winter and N fertilizer management. These authors demonstrated that sowing density had to be reduced to optimize N fertilization strategies and to ensure the agronomic consistency of a management system with lower levels of N fertilization. This lower sowing density results in a lower biomass and crop N requirement at the end of winter, making it possible to postpone the first N application. These authors also showed that the adjustment of genotype characteristics to N fertilization strategy was of key importance for the achievement of a high level of agronomic performance (Loyce *et al.*, 2012). In a study of a process-based crop model, CHAPTER 6 confirmed that calibrated yield and the probability of achieving grain protein content requirements for malting could be improved by up to 134 and 118%, respectively, through the adaptation of varietal characteristics in malting barley.

The amount of N fertilizer applied could be adapted more closely to plant demand during the crop cycle. In this study, we did not consider variations of N application as a function of plant N status. A new fertilization method with no *a priori* calculation of the total amount of N to apply, but a simple adjustment of N supply to crop demand are currently being developed for wheat (Ravier, 2017). This method seems to give a high agronomic performance and requires lower rates of N application (Ravier, 2017). It is, therefore, also of potential interest for application in malting barley production. This method is based on a minimum NNI trajectory with no impact on yield. The NNI trajectory defined by Ravier *et al.*, (2017) involves NNI values  $\geq 0.7$  at the flag leaf (Z37), increasing to  $\geq 0.8$  at flowering (Z60). Our results suggest that this NNI trajectory would be difficult to apply to malting barley, due to

the very different objectives for this crop, particularly for grain protein content. For example, our simulations showed that the best N fertilization strategies had a mean NNI below 0.8 at flowering for the optimization of barley malting performances, whereas overran NNI greater than 0.9 is recommended for wheat (*Ravier et al., 2017*). Precise tools for the monitoring of N fertilization during the crop cycle are still needed for malting barley.

### **Conclusion**

We used model simulations to analyze various N fertilization strategies differing in terms of splitting, date and amount of N applied, with the aim of simultaneously optimizing calibrated yield and grain protein content, and minimizing N losses. The N fertilization strategies currently recommended resulted in much greater N losses than the other strategies tested. We identified a set of N strategies providing a better compromise (*Pareto* optimal solutions) between the three outputs studied. Some of these strategies were robust in the face of different climatic conditions and CPs, resulting in much lower N losses to the environment, but also slightly lower calibrated yields. Other strategies, differing between the regions considered, gave higher values of calibrated yield, a higher probability of achieving grain protein requirements and lower environmental N losses. Overall, these strategies were characterized by the later application of smaller amounts of N. The results of this innovative study therefore suggest possible favorable N fertilization strategies for multicriteria assessment for winter barley in France that could be used in the design of new genotypic and management ideotypes adapted to low nitrogen input levels.

### **Acknowledgments**

This work was supported by a grant from the French Ministry of Agriculture (CASDAR Eco2malt).

## References

- Addiscott, T., Powlson, D., 1992. Partitioning losses of nitrogen fertilizer between leaching and denitrification. *J. Agric. Sci.* 118, 101–107.
- Agreste, 2013. Enquête Pratiques culturales 2011 Les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures Indicateurs de fréquence de traitement 39.
- Antoniadou, T., Wallach, D., 2000. Evaluating decision rules for nitrogen fertilization. *Biometrics* 56, 420–426.
- Baethgen, W.E., Christianson, C.B., Lamothe, A.G., 1995. Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barley. *Field Crops Res.* 43, 87–99. doi:10.1016/0378-4290(95)00034-N
- Booltink, H., Van Alphen, B., Batchelor, W., Paz, J., Stoorvogel, J.J., Vargas, R., 2001. Tools for optimizing management of spatially-variable fields. *Agric. Syst.* 70, 445–476.
- Bouraoui, F., Grizzetti, B., 2014. Modelling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture. *Sci. Total Environ.* 468–469, 1267–1277. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.07.066
- Campbell, C., Jame, Y., Akinremi, O., Cabrera, M., 1995. Adapting the potentially mineralizable N concept for the prediction of fertilizer N requirements. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 42, 61–75.
- Cannavo, P., Recous, S., Parnaudeau, V., Reau, R., 2008. Modeling N Dynamics to Assess Environmental Impacts of Cropped Soils, in: *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 131–174.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO J. Hum. Environ.* 31, 132–140. doi:10.1579/0044-7447-31.2.132
- Clivot, H., Mary, B., Valé, M., Cohan, J.-P., Champolivier, L., Piraux, F., Laurent, F., Justes, E., 2017. Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biol. Biochem.* 111, 44–59. doi:10.1016/j.soilbio.2017.03.010
- Crews, T.E., Peoples, M.B., 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agric. Ecosyst. Environ.* 102, 279–297. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.018
- David, C., Jeuffroy, M.H., Laurent, F., Mangin, M., Meynard, J.M., 2005. The assessment of Azodyn-Org model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *Eur. J. Agron.* 23, 225–242.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *Eur. J. Agron.* 21, 249–266.
- 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. doi:10.1016/S1161-0301(98)00019-7
- deVoil, P., Rossing, W.A.H., Hammer, G.L., 2006. Exploring profit – Sustainability trade-offs in cropping systems using evolutionary algorithms. *Environ. Model. Softw.* 21, 1368–1374. doi:10.1016/j.envsoft.2005.04.016
- Erisman, J.W., Galloway, J.N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N.B., Petrescu, A.M.R., Leach, A.M., de Vries, W., 2013. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20130116–20130116. doi:10.1098/rstb.2013.0116
- Fox, G.P., Panozzo, J.F., Li, C.D., Lance, R.C.M., Inkerman, P.A., Henry, R.J., 2003. Molecular basis of barley quality. *Crop Pasture Sci.* 54, 1081–1101.
- Groot, J.C.J., Rossing, W.A.H., 2011. Model-aided learning for adaptive management of natural resources: an evolutionary design perspective: Model-aided learning for adaptive NRM. *Methods Ecol. Evol.* 2, 643–650. doi:10.1111/j.2041-210X.2011.00114.x
- Hiederer, R., 2013. Mapping soil properties for Europe—spatial representation of soil database attributes. *Publ. Off. Eur. Union EUR26082EN Sci. Tech. Res. Ser. Luxemb.*
- Houlès, V., Mary, B., Guérif, M., Makowski, D., Justes, E., 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie* 24, 339–349.



- Hyytiäinen, K., Niemi, J.K., Koikkalainen, K., Palosuo, T., Salo, T., 2011. Adaptive optimization of crop production and nitrogen leaching abatement under yield uncertainty. *Agric. Syst.* 104, 634–644.
- Incograin, 2014. Addendum technique N°IV pour la vente des orges de brasseries.
- Jeuffroy, M., Bouchard, C., Meynard, J., Recous, S., 2001. Azodyn: a tool to adapt N-fertilisation strategies to farmers' objectives, in: *Abstr. of the 11th Nitrogen Workshop, Reims.* pp. 465–466.
- Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Sci.* 39:1385-1393.
- 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.
- Justes, E., Meynard, J., Mary, B., Plénet, D., 1997. Diagnosis using stem base extract: JUBIL method, in: *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Springer, pp. 163–187.
- Kersebaum, K., Lorenz, K., Reuter, H., Schwarz, J., Wegehenkel, M., Wendroth, O., 2005. Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 30, 59–67.
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., Garnier, J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9, 105011.
- Le Bail, M., Meynard, J.-M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie* 23, 13–27. doi:10.1051/agro:2002029
- Limaux, F., 1999. Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. PhD Thesis. Institut National Polytechnique de Lorraine
- 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., 2012. 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. doi:10.1016/j.fcr.2011.08.007
- Makowski, D., Wallach, D., 2001. How to improve model-based decision rules for nitrogen fertilization. *Eur. J. Agron.* 15, 197–208.
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 549–566. doi:10.1046/j.1365-2389.1999.00264.x
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. doi:10.1051/agro:2002064
- Peng, S., Garcia, F., Laza, R., Sanico, A., Visperas, R., Cassman, K., 1996. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice. *Field Crops Res.* 47, 243–252.
- Picheny, V., Trepos, R., Casadebaig, P., 2017. Optimization of black-box models with uncertain climatic inputs? Application to sunflower ideotype design. *PLOS ONE* 12, e0176815. doi:10.1371/journal.pone.0176815
- Raun, W.R., Johnson, G.V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91, 357–363.
- Ravier, C., Jeuffroy, M.H., Gate, P., Cohan, J.P., Meynard, J.M., 2017. Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, pp.1-18.
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS-Wagening. J. Life Sci.* 79, 31–40.
- Recous, S., Machet, J.-M., 1999. Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant Soil* 206, 137–149.

- Remy, J., Hebert, J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. CR Acad Agric F.
- Semenov, M.A., Halford, N.G., 2009. Identifying target traits and molecular mechanisms for wheat breeding under a changing climate. *J. Exp. Bot.* 60, 2791–2804.
- Shaffer, M., 2002. Nitrogen modeling for soil management. *J. Soil Water Conserv.* 57, 417–425.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., others, 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855.
- Ten Berge, H., Riethoven, J., 1997. Applications of a simple rice-nitrogen model, in: *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment*. Springer, pp. 793–798.
- Tremblay, N., Bélec, C., 2006. Adapting nitrogen fertilization to unpredictable seasonal conditions with the least impact on the environment. *Horttechnology* 16, 408–412.
- UNIFA, 2017. <http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>).
- Wolf, J., Hack-ten Broeke, M., Rötter, R., 2005. Simulation of nitrogen leaching in sandy soils in The Netherlands with the ANIMO model and the integrated modelling system STONE. *Agric. Ecosyst. Environ.* 105, 523–540.

**Quelles combinaisons de caractéristiques variétales permettent une production quantitative et qualitative élevée en orge brassicole pour des itinéraires techniques avec azote réduit –approche par modélisation**

*« They always say time changes things, but you actually have to change them yourself ».*

*A. Warhol*



Dans le CHAPITRE 1 et dans le CHAPITRE 2, nous avons montré que les performances des génotypes étaient variables suivant les conditions pédoclimatiques. Dans ces chapitres, nous avons évalué expérimentalement les performances agronomiques et les caractéristiques variétales favorables à une production quantitative et qualitative élevée sur un réseau ne comportant que 12 environnements et une seule modalité de réduction de la fertilisation azotée. Une évaluation à plus large échelle permettrait de conforter ces résultats. De même, d'autres caractéristiques variétales, non mesurées au sein du réseau expérimental, pourraient permettre une faible perte de production quantitative et qualitative et à des performances agronomiques élevées en situation de stress azoté.

Etudier les performances de nouveaux génotypes, différant de par leurs combinaisons inédites de caractéristiques, dans d'autres conditions pédoclimatiques et pour des stratégies de fertilisation favorables à la production d'orge brassicole (CHAPITRE 5), permettrait d'identifier les génotypes adaptés aux stratégies à bas niveau d'intrants dans une diversité de zones géographiques. Cette étude viendrait compléter celle du CHAPITRE 4, où nous avons défini des stratégies de fertilisation azotée favorables à la production brassicole avec de faibles impacts environnementaux, mais indépendamment des caractéristiques variétales.

Nous avons focalisé ce chapitre sur les deux questions suivantes :

- Quelles combinaisons de caractéristiques phénotypiques permettent d'atteindre un rendement élevé et de répondre aux critères brassicoles dans la diversité des environnements de production de l'orge brassicole, pour une conduite à faible niveau d'intrant azoté ? Ces génotypes sont-ils différents de ceux présentant de bonnes performances pour des conduites non limitantes en azote ?
- Faut-il adapter les caractéristiques des génotypes aux conditions locales de culture ?

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur 10 caractéristiques génotypiques du modèle de culture Azodyn-orge pour identifier celles impactant le rendement calibré, la teneur en protéine, et les pertes en azote environnementale. Les performances de 500 génotypes virtuels, issus de combinaisons des paramètres impactant les sorties analysées, ont ensuite été évaluées *in silico* au sein de 35 départements X 25 années climatiques et pour 2 stratégies de fertilisation azotée (azote réduit ou non réduit). Les combinaisons de paramètres permettant aux génotypes d'atteindre des performances agronomiques et environnementales élevées ont été identifiées et comparées entre stratégies de fertilisation azotée et entre environnements.

Sur les 10 paramètres du modèle considérés, 6 impactaient les variables analysées. Le rendement et le poids de mille grain maximum génotypique impactaient très peu la variance de ces dernières. Parmi les 500 génotypes virtuels, 22 combinaisons assez diverses permettaient d'atteindre le meilleur compromis entre rendement calibré, teneur en protéines et pertes en azote en situation de faibles intrants azotés. Ces profils génotypiques différaient majoritairement de par leur capacité à produire de la biomasse en sortie-

hiver, leur potentiel de nombre de grains, leur précocité et leur efficacité de conversion du rayonnement photosynthétique.

Seulement 34% des géotypes virtuels *optimaux* identifiés en haut niveau d'azote étaient également *optimaux* en situation d'azote réduit. Ces géotypes étaient principalement ceux maximisant le rendement et minimisant les pertes en azote. Les résultats montrent également que les meilleurs géotypes identifiés localement pour des systèmes à faible niveau d'azote diffèrent des géotypes identifiés au niveau national pour ce type de système.

La comparaison de ces résultats avec ceux du chapitre précédent permet de conclure que l'adaptation simultanée des caractéristiques géotypiques et des stratégies de fertilisation azotée pour des systèmes en bas niveau d'intrants permet d'atteindre les mêmes niveaux de performances quantitatives et qualitatives que des géotypes « standards » en condition de fort recours aux intrants azotés.

**Messages clés:**

- 22 combinaisons de paramètres géotypiques permettant d'atteindre des performances agronomiques et environnementales élevées en situation de faible azote ont été identifiées
- le rendement maximum et le poids de mille grain maximum géotypique n'impactent pas les performances agronomiques dans les situations considérées
- le nombre de grains potentiel, la capacité à remobiliser l'N vers les grains, l'efficacité d'interception du rayonnement et la précocité sont des facteurs importants d'adaptation aux environnements avec stress N
- Seule une minorité des meilleures combinaisons identifiées en haut niveau d'azote permettent d'atteindre les meilleures performances en bas niveau d'azote
- En intrants réduits, les géotypes adaptés localement diffèrent des géotypes identifiés au niveau national
- Adapter à la fois les géotypes et la stratégie de fertilisation azotée permet à l'itinéraire technique à bas niveau d'intrants d'atteindre des performances similaires à celles de la conduite riche en azote

**Mots clés :** géotype, azote, front de *Pareto*, environnements cibles, teneur en protéine, taille des grains, modèle de culture, évaluation multi-critère

## Model based design of genotypic traits for achieving high yields and grain quality in malting barley production for low-N situations

D. Beillouin<sup>1,2\*</sup>, M-H. Jeuffroy<sup>1</sup>, A. Gauffreteau<sup>1</sup>, R. Trépos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>2</sup> Florimond Desprez, 3 Rue Florimond Desprez, 59242 Cappelle-en-Pévèle, France

<sup>3</sup> MIAT Auzeville BP 52627 31326 Castanet-Tolosan, France

\*Corresponding author: PH: (33) 130 81 59 06, E-mail: [damien.beillouin@inra.fr](mailto:damien.beillouin@inra.fr)

### Abstract

High quantitative and qualitative production has to be ensured in the context of a reduction of nitrogen fertilizer. For malting barley, the production has to reach both a high calibrated grain yield (yield of grains larger than 2.5mm) and a grain protein content in the range of 9.5 to 11.5%. Genotypic characteristics are of main importance to reach these targets in the barley area. Crop models can be used to help to select favorable genotypic traits for different N nutrition levels. The aim of this study was to identify the combinations of genotypic characteristics adapted to low nitrogen management for malting barley in the French barley belt.

Through a sensitivity analysis of Azodyn-Barley crop model, we evaluated the impact of a range of 10 parameters on the calibrated yield, the grain protein content and N losses outputs. Combining values of the most impacting parameters on the variance of the considered outputs, we defined 500 virtual genotypes. Their agronomic and environmental performances were then simulated for 25 years and 35 *départements* (french geographical unit) of the French Malting barley belt in both high and low management situations. The combinations of parameters of virtual genotypes allowing to maximize performances were analyzed and compared between management situations and environments.

Six parameters largely impacted the variance of the studied outputs. Among the 500 genotypes defined based on these parameters, 22 allowed to reach *Pareto* optimal solutions considering mean genotypic performances over the low-N management system in all the environments. These genotypes differed mostly from the non-optimal ones by their capacity to produce a high number of grains and high dry matter at the end of winter, their radiation use efficiency and their precocity.

Only 34% of *Pareto* optimal solutions in high-N system were also optimal in low-N system. This subset of genotypes was characterized by a high calibrated yield potential in both N conditions. In low-N system, most of the genotypes adapted locally differed from those identified at a national scale. Adapting both genotype and management allows the low-N management system to reach similar performances than “standard” high-input system.

We discuss the interest of specific breeding for low-N system, and for local adaptation. The combinations of genotypic characteristics allowing high performances are discussed in order to avenue future barley ideotypes adapted to low-N management system.

### **Highlights**

- We identified 22 virtual genotypes allowing to reach high agronomic and environmental performances in low-N system
- Maximum genotypic yield and thousand kernel weight were not main factors for designing high-performing genotypes
- Only 34% of Pareto optimal solutions for high-N system were also optimal in low-N system
- Genotypes adapted locally differed from those identified at a national scale
- Adapting both genotype and management allows the low-N system to reach similar performances than “standard” high-N system

### **Keywords**

Crop model;

Parameter,;

Ideotype;

grain protein content,;

Grain retention fraction,;

*Pareto* optimal solutions



## 1. Introduction

In contrast to past grain yield increases, future grain yield improvements will have to be achieved in the context of a reduction of N-fertilizer use (*Godfray et al., 2010; Tilman, 1999*). Meanwhile, as economic value of most cereal production greatly depends on their grain characteristics, industry requirements will also have to be fulfilled in such conditions. For example, malting barley production with lower N fertilizer inputs will have to maximize yield while reaching a grain protein content in the 9.5%-11.5% range, and a high proportion of grains with large size (*Incograin, 2014*).

Cultivars and technical management are two main interdependent levers to reach these characteristics despite environmental constraints (*Murphy et al., 2007; Loyce et al., 2012*). Until now most studies analyzed independently either genotype or crop management impacts on crop production (*Hammer et al., 2014*). For malting barley, experimental results mentioned traits potentially leading to high performances across low or high management inputs (Bertholdsson, 1999 for grain protein content only, CHAPTER 2 for calibrated yield and grain protein content). Independantly, N fertilization strategies optimizing agronomic performances of malting barley were identified for the French barley belt, but only for one particular genotype (CHAPTER 5). Some authors, however, demonstrated that genotype and management characteristics should be adapted to each other to ensure a high quantitative and qualitative production (*Loyce et al., 2012; Rolland et al., 2003*). Precise identification of genotypic traits for an optimized nitrogen management allowing high quantitative and qualitative performances is still missing. Furthermore, combinations of optimal genotypic and N fertilization management characteristics might also be variable according to the environment. Previous studies based their results only on a limited range of experimental sites. In these studies, the interactions between genotype and environment (IGE) were not considered. In multi-environment trials, however, main effects of genotype and IGE generally explain a similar part of total yield variance (*Jeuffroy et al., 2014; Voltas et al., 2002*). Due to these strong interactions, *Hammer et al. (2002)* stipulated that genotype design has to be adapted to specific agro-environmental conditions. Some authors, on the contrary, observed that some genotypes developed by the international Maize and Wheat improvement Center (CIMMYT) reached the highest yield, compared to other cultivars, in numerous and diverse type of environments (*Braun et al., 1996*). The advantages of a genotype adaptation to particular environments or particular nitrogen management conditions in winter malting barley are still unknown.

In recent decades, crop modeling has become an important tool to evaluate actual or future cultivar performances in various environmental conditions (*Dingkuhn et al., 1991; Martre et al., 2015; Semenov and Stratonovitch, 2013*), to support plant breeding programs (*Boote et al., 2001; Rötter et al., 2015*) and to design new technical management systems. Model-assisted ideotyping can be formulated as an optimization problem of model parameters related to plant traits (*Quilot-Turion et al., 2012; Semenov et al., 2014; Semenov and Stratonovitch, 2013*) or management practices (*Grechi et al., 2012; Michalczyk et al., 2014*). Some authors thus used crop models to search strategies allowing to take advantage of

Genotype x Environment x Management (IGEM) interactions by exploring a complex GEM space (*Hammer and Jordan, 2007; Messina et al., 2006*).

Designing new crop or management ideotypes adapted to target environments often requires to deal with antagonistic criteria while fulfilling industrial requirements (*Letort et al., 2007; Tardieu, 2003*). N fertilization strategies, for example, could have antagonistic effects on yield, grain quality, and environment N losses (*O'Donovan et al., 2011, CHAPTER 4*). Some authors optimized a utility function defined as a linear combination of criteria (*Makowski et al., 1999*). Alternatively, the *Pareto*-based ranking approach is a powerful method for a combined evaluation of objectives without a priori weighing, which has scarcely been used so far (*Groot and Rossing, 2011*). This method furthermore allows to include directly environment performances in multicriteria analysis for ideotype design, that has rarely been done until now.

The aims of this study were to i) identify genotypic traits favorable to ensure high calibrated yield, high probability to fulfill grain protein content malting interval and minimize N losses in various environments and N limiting conditions, ii) test whether or not these genotypic traits are different for various N strategies or environments.

## 2. Material and methods

### 2.1. Calculation of studied outputs

Quantitative, qualitative and environmental performances of barley were estimated through the Azodyn-Barley crop model (CHAPTER 3), implemented on the RECORD platform (Bergez et al., 2013). Azodyn makes use of five climatic inputs: minimal and maximal temperatures ( $T_{min}$  and  $T_{max}$ , °C), global incident radiation ( $R$ , MJ/m<sup>2</sup>), evapotranspiration (ETP, mm, Penman-Monteith) and rainfall ( $R$ , mm). Soil is described by 5 variables (%clay, %CaCO<sub>3</sub> and %organic N in the ploughed layer, maximum rooting depth, and water content at field capacity). Soil mineral Nitrogen at the initialization (end of winter) was set to 20 kg N ha<sup>-1</sup>.

In this study, we focused on three output variables of the model: i) the calibrated yield, measured as the yield of grains larger than 2.5mm, ii) the probability to fulfill grain protein content requirements, thereafter called score of grain protein content, and iii) the N losses toward the environment. The score for grain protein content was defined based on the optimal commercial malting threshold (optimal values between 9.5 and 11.5%; score of 1), with a tolerance for lower or higher values (1%, score between 0 and 1) based on price reduction established by the *Syndicat de Paris du Commerce et des industries (Incograin, 2014)*. N losses were calculated from end of winter to harvest as the sum of N lixiviation below the rooting zone and non-recovered part of applied fertilizer by volatilization (CHAPTER 3).

### 2.2. Set of model parameters considered

In the model, cultivar is currently described using five genotypic parameters: the maximum yield (Yield\_max\_gen –t ha<sup>-1</sup>), the maximum thousand-grain weight (TKW\_max\_gen –g.1000seeds), the capacity of the crop to produce a high number of grains per square meter (alphaNG), the ability of the genotype to produce grains with large size (alphaRF), and the precocity (Earliness\_FLO). Based on previous results (CHAPTER 2) and on literature evidence, we further considered 6 other parameters as possibly genotype-dependent. On the whole, 10 parameters of the Azodyn crop model were analyzed (Table 6.1). These genotypic characteristics described various aspects of crop functioning: phenology, biomass allocation and response curve of physiological processes to nitrogen.

A sensitivity analysis of the 10 plant parameters was performed using the Fast method (*Saltelli et al., 2000*) to rank them in order of importance. Details of the method used for sensitivity analysis can be found in *Chan et al. (1997)* and *Saltelli et al. (2000)*. Ranges of variation of the parameters were estimated based on expertise and a previous field experiment (CHAPTER 2). When the sensitivity index is close to 0, the considered parameter has a small effect on the output variable Y. On the contrary, if the considered parameter has a strong effect on Y, the indices are close to one.

**Table 6.1.** The 10 parameters of AZODYN under study and their range of variation. References refer to studies showing an impact of the considered parameter on yield (for barley or wheat crop).

parameter	unit	Description	Selected references	Initial value	range
Yield_max_gen	t ha <sup>-1</sup>	Maximum reachable yield for each genotype	<i>Chapter 3, Barbottin et al., 2006</i>	93	+/- 13%
TKW_max_gen	g.1000 seeds	Maximum reachable thousand Kernel Weight for each genotype	<i>Chapter 3, Barbottin et al., 2006</i>	42	+/- 17%
Earliness_FLO	days	Preocity at flowering	<i>Chapter 3, Barbottin et al., 2006, Richards 1991, Calderini et al. 1997, Habash et al., 2007; Laperche et al., 2007 Rebetzke and Richards, 1999 on wheat, Bertholdsson and Kolodinska Brantestam, 2009 on barley</i>	*	-7/+7j*
EW_DM	g ha <sup>-1</sup>	Early Vigour- Capacity of the plant to grow in early in the season	<i>Chapter 3, Barbottin et al., 2006 on wheat</i>	115	+/- 33%
alphaNG	-	Capacity of the plant to produce a high number of grain per square meter	<i>Chapter 3</i>	1.05	+/- 17%
alphaRF	-	Capacity of the plant to reach a high retention fraction	<i>Chapter 3</i>	1	+/- 17%
Senesc	-	Capacity of the plant to stay-green after flowering	<i>Distelfeld et al., 2014; Gous et al., 2013, Austin 1999; Silva et al. 2000; Triboi and Triboi-Blondel 2002</i>	1	+/- 10%
REM2	%	Quantity of Nitrogen from flowering translocated in the grains at harvest	<i>Gaju et al., 2014</i>	78	+/- 9%
RUEpot	-	Potential radiation use efficiency	<i>Sinclair et al., 2004</i>	3.7	+/- 14%

\* depending on the site

The sensitivity analysis was performed based on two contrasted Site X N-management situations. The first situation represents a French *département* (administrative geographical unit) in the Northern part of the malting barley belt with the currently recommended N fertilization strategy (North\_N+). The second situation corresponds to a French *département* in the southern part of the malting barley belt with a reduced N fertilization strategy (South\_N+). The soil characteristics used at the two sites are summarized in Table 6.2. Due to short time, simulations were conducted on year 2013 only. A total of 10 000 simulations per site were performed for calculation of the sensitivity indices.

Finally, among the 10 parameters considered, we retained a subset of parameters that largely impacted the studied outputs of the crop model and define a set of 500 virtual genotypes. Each genotype was defined in order to maximize the Euclidian distance of the value for each retained parameter compared to the others genotypes (latin hypercube sampling -*Stein, 1987*).

**Table 6.2.** Characteristics of the two sites (North\_N+ and South\_N-) used for the sensitivity analysis. Climatic values are calculated from end-of –winter to harvest.

variable	unit	North_N+	South_N-
Tmoy	°C	8.17	9.63
Radiation	MJ/m <sup>2</sup>	11 770	14 090
ETP	mm	312	348
Rainfall	mm	220	386
Clay	%	256	236
CaCO <sub>3</sub>	%	4	264
Norg	%	1.02	1.67
Max. rooting depth	mm	1200	700
Water content at field capacity	mm	170	114
Nsupply (kg N.ha <sup>-1</sup> )	kg N	134	94

### 2.3. Set of environments and managements considered for ideotype assessment

We assessed the performances of the 500 virtual genotypes on 875 environments (*département* by Year combinations). The present analysis was performed on 35 French *départements* and over 25 years (from 1989 to 2013).

We also summed up the performances of the genotypes for three main regions with similar impacts of climatic conditions on yield, thereafter called geographical clusters (GC), previously identified (CHAPTER 4). Briefly, GC1 corresponds to the northern part of the malting belt and is characterized by favorable growing conditions (e.g. low number of days with frost during winter and low probability of heat stress during grain filling) and leads to high yield (mean of 109% of the national yield over the 1989-2013 period). GC2 and GC3 were located in the southern part of the malting belt and were characterized by more frequent stress (e.g. frost during winter, water stress during winter and stem elongation, and heat stress during grain filling) increasing from GC2 to GC3. Mean yield of GC2 and GC3 were 98% and 94% of the national yield over the 1989-2013 period, respectively.

We analyzed the performances of the genotypes for the currently recommended Nitrogen fertilization strategy, thereafter called High-N system. It consisted in a first N supply at the end of winter (when temperature increases after winter) and a second one at beginning of stem elongation. Total N amount was set, by *département*, to the mean observed value applied for years 1996, 2001 and 2006 (years with national survey available), ranging from 69 to 148 kg N ha<sup>-1</sup>. The splitting was 50 kg N ha<sup>-1</sup> for the first N supply, and the rest for the second N supply. We also studied a second N fertilization management strategy, thereafter called low-N system. This strategy was identified as an innovative N fertilization strategy allowing to reach an *Pareto* optimal performance (among 45 tested strategies) in various French environments considering the calibrated yield, probability of reaching malting grain protein interval and environmental N losses (CHAPTER 5). It consisted in a 30% reduction of the reference N rate for the first and the second N supply and delayed N application (at end-of winter +10 days and 1-cm ear stage + 15 days).

#### **2.4. Identification and characterization of best performing genotypes for each management system and the different environments**

First, we analyzed the mean performances of the genotypes over the 25 years in the low-N and high-N systems over the whole barley belt. We then identified the set of genotypes leading to performances that cannot be improved for one of the output criteria without compromising any of the other outputs criteria. This set of genotypes represents the *Pareto* optimal solution (denoted  $P(Z)$ , also called non-dominated strategies). More precisely, for the comparison of the two performance  $y_1$  and  $y_2$  based on the three studied outputs,  $y_1$  is said to be dominated by  $y_2$  (noted  $y_2 > y_1$ ) if for each criterion,  $y_2$  has equal or better performance than  $y_1$ . Thus,  $y_1$  belongs to the *Pareto* optimal solution ( $P(Z)$ ) if there is no  $y_1$  such as  $y_2 > y_1$ .

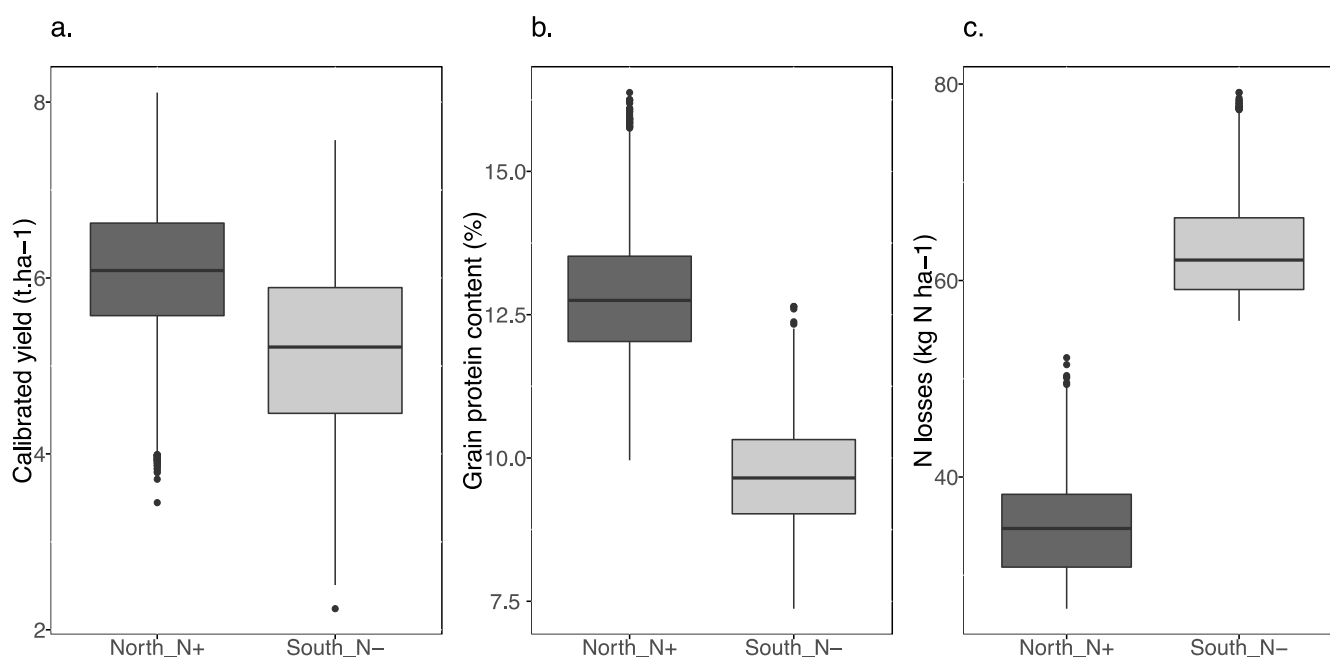
For each management system, based on their agronomic and environmental performance, genotypes belonging to the *Pareto* solutions were then clustered into groups with an ascendant hierarchical classification (AHC). We used the HCPC function of the FactoMiner R package (Husson *et al.*, 2010), based on the Ward criterion and Euclidian distance. The number of partitions ( $Q$ ) of the AHC was set to that yielding the highest relative loss of inertia:  $\frac{\Delta(Q)}{\Delta(Q+1)}$  with  $\Delta(Q)$  the between inertia for the  $Q$  cluster. Groups of genotypes were finally characterized by their median value for each the genotypic parameters considered.

We reproduce the same method for analyzing the set of genotype belonging to the *Pareto* optimal solution for each of the geographical cluster in the low-N system. Quantitative and qualitative performances of genotypes belonging to the *Pareto* optimal solutions were compared when identified on the 875 environments or identified in each geographical cluster.

### 3. Results

#### 3.1. Identification of genotypic traits impacting genotypic performance through the sensitivity analysis

Considering the 10 parameters ranges, the calibrated yield ranged from 2.2 to 8.1 t ha<sup>-1</sup>, the grain protein content from 7.4 to 16.4%, and the N losses from 27 to 151 kg N ha<sup>-1</sup> (Figure 6.1). Large variations of agronomic and environmental performances were observed between the two studied sites. The calibrated yield and the grain protein content were smaller in the site with less N fertilizer applied compared to site with the recommended N amount. The higher N losses observed for South\_N- sites compared to North\_N+ could be explained by a higher soil N organic content, leading to a high N mineralization rate, combined with high rainfall and relative low soil depth which could have favored N losses through lixiviation.



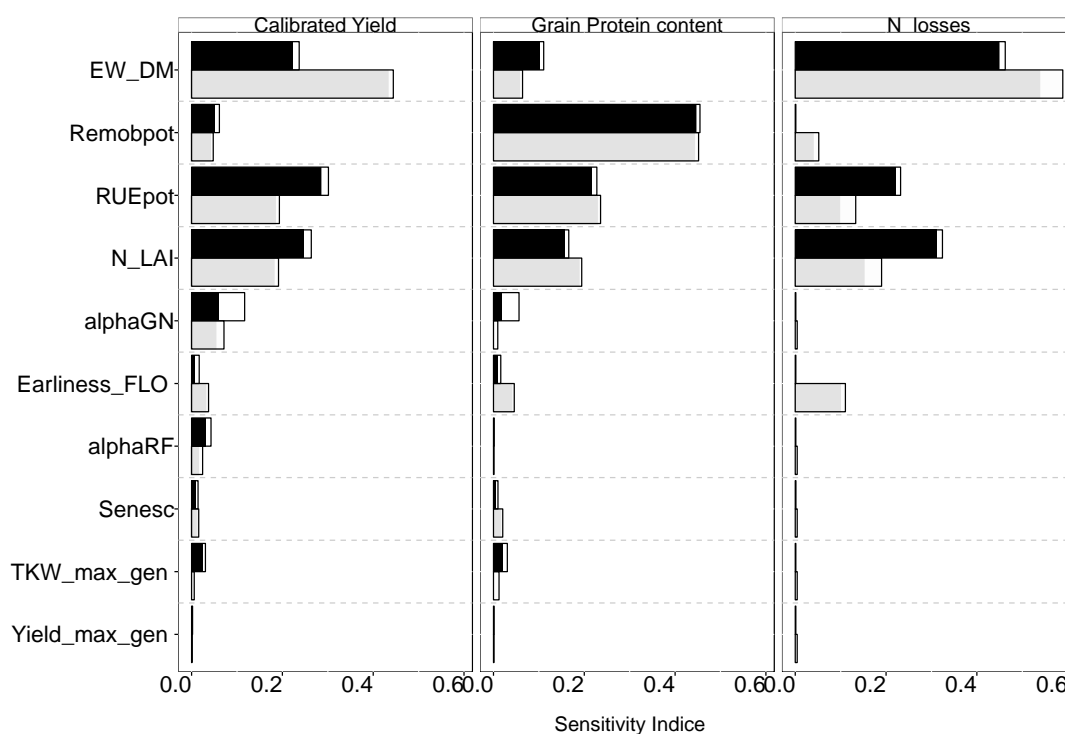
**Figure 6.1.** Calibrated yield (a.), grain protein content (b.) and N losses (c.) for the two contrasted conditions (North\_N+ and South\_N-). Results are from a the sensitivity analysis of the Azodyn-barley crop model performed 10 000 simulations.

For the calibrated yield, three parameters reached a high value of sensitivity indices: the dry matter at end-of-winter (EW\_DM), the radiation use efficiency (RUEpot), and the impacts of N stress on leaf area index (N\_LAI) (Figure 6.2). About 60% of yield variance was taken by the set of these three parameters. Large variation in the contribution of EW\_DM was observed between the two sites

(sensitivity indices ranging from 0.24 to 0.44). The potential grain number production (alphaGN) showed sensitivity indices around 0.1 in both sites. The other parameters did not seem to impact the calibrated yield variance in both studied situations. In many cases, the first-order indices represented an important fraction of the total indices.

The main factor explaining the variance of the grain protein content was the proportion of N translocated to the grains (Remobpot) (Figure 6.2). The effect was large in both situations. The parameters largely affecting the calibrated grain yield also showed a large impact on the grain protein content variance. The dry matter at end-of-winter had, however, a lower contribution on this variable than on the calibrated yield.

For N losses, three factors related to biomass accumulation explained the variance in both situations: EW\_DM, RUE, N\_LAI (Figure 6.2). For the South\_N- site, the date of flowering also contributed to the variance of N losses.



**Figure 6.2.** Sensitivity indices for the calibrated yield, grain protein content and N losses for 10 parameters of the Azodyn-Barley crop model. Main effects of the parameter are presented by the filled bars. Interactions and non-linear effects are presented by empty bars. The sensitivity analysis was performed based on two contrasted conditions (Black: North\_N+, Gray: South\_N).

On the whole, among the 10 parameters and for the studied range of values, 3 of them had a very low contribution to the variance of the three outputs (Yield\_max\_gen and TKW\_max\_gen and Senesc), 2 of them impacted largely the three outputs (RUEpot and N\_LAI), 3 impacted specifically one or two outputs (Remobpot for the grain protein content; EW\_EW and alphaGN for the grain yield and the N losses), and 2 parameters impacted the outputs depending on the site (Earliness\_FLO and alphaRF). We



thus focused the following study on the 6 determinant parameters impacting variance of the considered outputs (EW\_DM, RUE, N\_LAI, NRemobpot, Earliness\_FLO, alpha\_GN).

### 3.2. Performances of the set of optimal genotypes identified for low-N system and comparison with high-N system

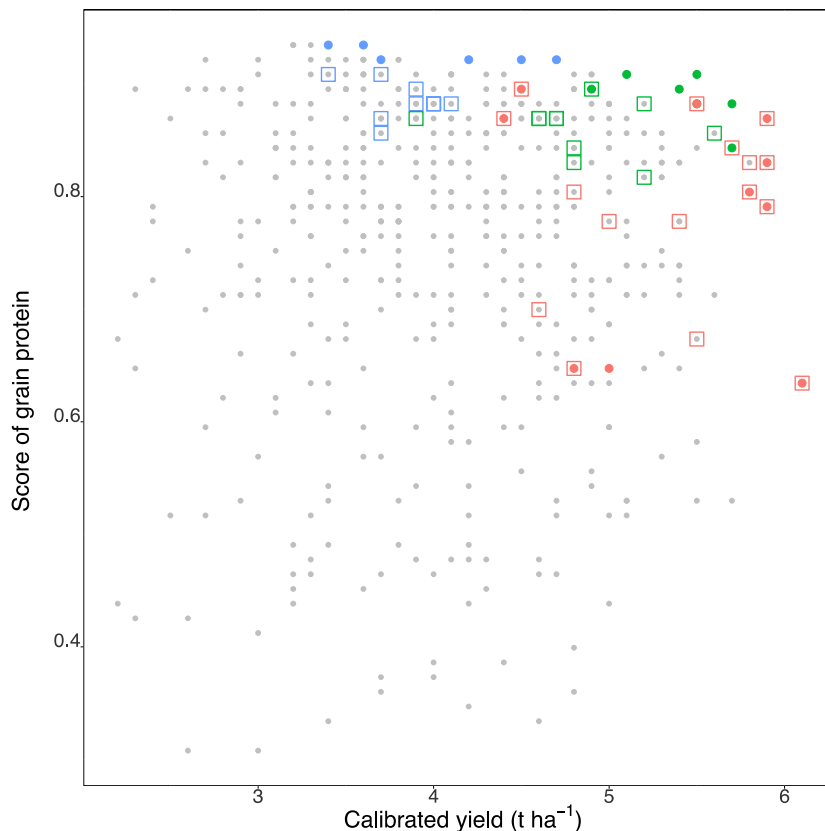
In the low-N system and taking into account the mean values for each of the 500 virtual genotypes over 25 years, the mean calibrated yield ranged from 2.2 to 6.0 t ha<sup>-1</sup>, the score of grain protein content from less than 0.1 to 0.86, and N losses from 47 to 62 kg N ha<sup>-1</sup>. Genotypic Pearson correlations between calibrated yield and score of grain protein content was null (cor = 0.0, P-value = 0.20). On the contrary, the correlation between calibrated yield and N losses was high (cor = -0.73, P-value <0.001). Finally, correlation between score of grain protein content and N losses was significant but low (cor = -0.15, P-value <0.001).

The set of *Pareto* optimal solutions for low-N system was composed of 22 genotypes. Among this set of genotypes, the median value of the calibrated yield, the score of grain protein content and the N losses were 124, 116 and 92% times the mean values observed over the 500 genotypes (Table 6.3). By clustering the set of *Pareto* optimal genotypes on their mean performances in the low-N system, three profiles of genotypes were distinguished. Six genotypes had a higher score of grain protein content and N losses, but a lower calibrated yield compared to the median value of the set of optimal solutions (blue points, **Figure 6.3**, Table 6.3). Ten genotypes had lower scores of grain protein content and lower N losses compared to the group median (red points, **Figure 6.3**, Table 6.3). Finally, 6 genotypes reached both an equal or high score of grain protein and calibrated yield (green points, **Figure 6.3**) compared to the *Pareto* set of genotypes.

Considering high-N conditions, 33 genotypes presented optimal compromise between the three studied criteria. This suggested that this management more frequently allows to identify best genotypes compared to low-N system. By clustering the genotypes over their mean performances in high-N system, three groups were also determined. Eight genotypes had a high score of grain protein content and high N losses (blue squares), 9 genotypes had intermediate performances for the three criteria (green squares), and 16 had lower score of grain protein content and N losses and higher calibrated yield (red squares). We noticed that the number of genotypes reaching low score of grain protein content, low N losses and high calibrated yield (red group) was high among the *Pareto* optimal solutions, for both high and low N conditions.

Only 34% of genotypes in the *Pareto* optimal solutions for high-N conditions were also identified in the optimal solutions for low-N system. None of the genotypes with high score of grain protein content in low-N system (blue points) were in the *Pareto* optimal solution in high-N system. Similarly, most genotypes (4 genotypes out of 6) with intermediate characteristics (green points) in low-N system were not in the *Pareto* optimal solutions in high-N system. On the contrary, most (9 genotypes out of 10) of

the genotypes with high yields and low N losses in low-N system (red points) were in the Pareto optimal solutions in high-N system.



**Figure 6.3.** Calibrated yield and score of grain protein content of the 500 virtual genotypes in the low-N management system. Filled points and empty squares represent the set of *Pareto* optimal solutions for the low-N system and high-N system respectively.

Blue points (square) represent genotypes with higher score of grain protein content, higher N losses and lower calibrated yield compared to the group mean in low-N (high N) system. Red points (square) represent genotypes with lower score of grain protein content and higher N losses compared to the group mean in low-nitrogen (high nitrogen) system. Green points (square) represent genotypes with intermediate score of grain protein content, calibrated yield and N losses.

**Table 6.3.** Performance and characteristics of genotypes retained in the *Pareto* optimal solutions for the low-N system. The median value over the 500 genotypes and the ratio (%) between median value of each group and the 500 genotypes are presented. Description of the variables and units are available in **Table 6.1**

Group	Number of genotypes	Calibrated yield	Score of grain protein	N losses	EW_DM	Earliness_F LO	Remobpot	alphaGN	N_LAI	RUEpot
All genotypes	500	4,1	0,61	54,1	112,5	121	0,775	1,15	1	3,65
<b>Pareto solution</b>	<b>22</b>	<b>124</b>	<b>116</b>	<b>92</b>	<b>104</b>	<b>98</b>	<b>97</b>	<b>104</b>	<b>99</b>	<b>103</b>
red group	10	138	104	90	94	99	103	110	104	104
green group	6	134	118	93	118	99	96	104	99	95
blue group	6	96	122	101	86	98	99	101	98	103

### 3.3. Genotypic characteristics allowing to reach high performance in low-N system

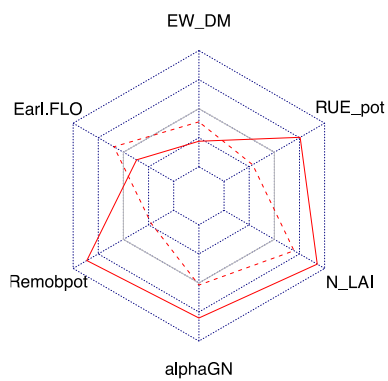
The three groups of performances in low-N system largely differed according to their median values for most of the 6 genotypic characteristics (Table 6.3). The groups also differed on the median values compared to the 500 genotypes.

The “red” group had a higher median potential grain number production and radiation use efficiency, both compared to the median value of the 500 genotypes and the *Pareto* optimal solutions. Surprisingly, this group also highlighted a higher sensitivity to N stresses (N\_LAI parameter). The capacity to produce dry matter at the end-of-winter was lower than the 500-genotype median and intermediate compared to the two other groups of *Pareto* optimal solutions. Among this group, different sub-profiles of genotypes leading to a high calibrated yield existed (Figure 6.4a). A relative low (resp. high) RUEpot associated with late (reps. early) flowering; a relative low (resp. high) grain number associated to a low (resp. high) sensitivity to N stress and a lower (resp. higher) N remobilization to the grains. These two profiles corresponded to a strategy maximizing yield, but with potentially lower retention fraction (proportion of grain > 2.5 mm) and a strategy with a slightly lower yield but with higher retention fraction. As noticed earlier (Figure 6.3), these sub-profiles were similar between high and low N situations.

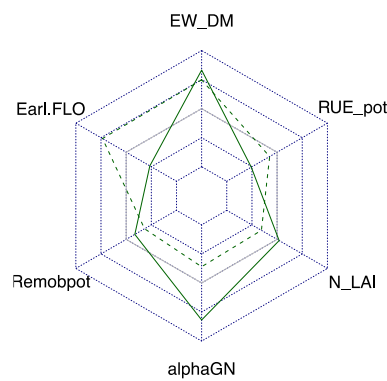
The “green” group had a high median value for the capacity of produce dry matter at the end of winter, and an intermediate value of grain number potential compared to the *Pareto* optimal solutions. Its potential of radiation use efficiency and grain N remobilization were, on the contrary, lower than the 500-genotype mean value and the *Pareto* optimal solution. Among this group, two main sub-profiles existed (Figure 6.4b): a relative low (resp. high) grain number potential associated with lower (reps. higher) sensitivity to N-stress, and an earlier (resp. later) flowering. These sub-profiles were different from the ones adapted to high-N system (Figure 6.4c). In this system, genotypes had lower dry matter at the end of winter, and a slightly higher N remobilization capacity.

The “blue” group showed values of characteristics close to the 500-genotype mean, except a lower dry mater at the end of winter. Compared to the *Pareto* optimal solutions, the group had a relative low potential of dry matter production. Very different sub-profiles coexisted in this group. We did not detail precisely the genotypic characteristics of these sub-groups due to their very low yield (and thus low probability to be interesting for farmers).

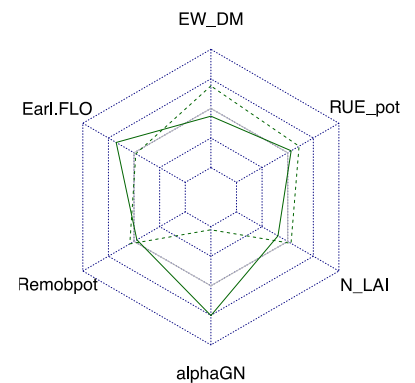
a.



b.

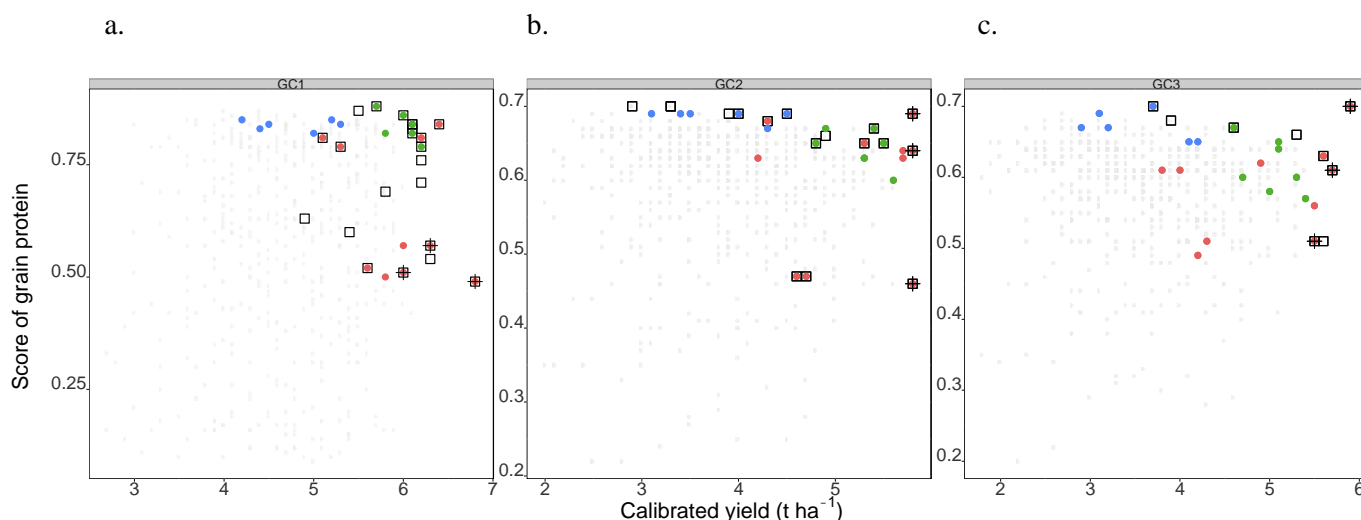


c.



**Figure 6.4.** Profiles of genotypes for group “red” in low-N system (a), for group “green” in low-N system and group “green” in high-N system. Groups were determined with a hierarchical clustering based on genotypic characteristics. Values of each genotypic characteristic were normalized.

### 3.4. Performances of the set of optimal genotypes identified at the national scale and locally for low-N system



**Figure 6. 5.** Calibrated yield and score of grain protein content of the 500 virtual genotypes in the low-N management system for each geographical cluster (a=GC1, b=GC2 and c=GC3). Filled points (resp. empty square) represent the set of *Pareto* optimal solutions for the low-N system in each geographical cluster (resp. for the whole set of environments). Colors refer to the group of performances defined on the low-N system over the whole environments. Genotypes retained in the *Pareto* optimal solutions for the three GC are presented with a black cross.

As expected, the maximum calibrated yield and score of grain protein content largely varied among GC. For example, GC1 had the highest simulated calibrated yield (max= 6.8 t ha<sup>-1</sup>), whereas GC2 and GC3 both reached a maximum of 5.9 t ha<sup>-1</sup>. Scores of grain protein content reached a maximum of 0.80, 0.69 and 0.70 for GC1 to GC3.

The set of optimal *Pareto* solutions was composed of 23, 20 and 22 genotypes respectively for GC1, GC2 and GC3. Among the set of optimal solutions, only 13 (57%), 8 (40%) and 7 (32%) strategies, for GC1 to GC3 respectively, were identified as optimal for all environments. Three strategies were in the *Pareto* optimal solutions taking into account all environments and each geographical cluster (strategies with black cross). These strategies reached a high-calibrated yield in all these situations, but either low or high score of grain protein content depending on the GC (

Figure 6. 5). On the contrary, four genotypes retained in optimal solutions for the 875 environments were not present in any of the set of genotypes retained for the three GC.

More precisely, among the 6 genotypes of the ‘green’ group defined based on the 875 environments, 5 genotypes reached the *Pareto* frontiers for GC1, and only 1 genotype for both GC2 and GC3.

## 4. Discussion

### 4.1. Method used

We chose a two-step *in silico* approach in order to determine favorable combinations of genotypic characteristics for low-N management system. First, we performed a sensitivity analysis in a subset of environments to hierarchize and screen most impacting parameters of the model for the three considered variables. This allowed to limit the number of virtual genotypes simulated, and thus time calculation for the second step (we used 10 cores to parallelize simulations and one simulation takes about 1 sec). Indeed, not all the model parameters showed a large impact on the studied outputs. This could be explained by compensatory effects between traits (e.g. grain size and grain number, light-saturated photosynthesis and leaf surface area). Moreover, complex traits such as grain yield and grain protein content are inherently determined at the canopy level (*Martre et al., 2015a*), individual plant traits thus not always impacted such integrative output variables. Then, we simulated over 25 years and the whole French barley belt the performances of the different virtual ideotypes based on a subset of parameters defined in the first step. From these results, we identified combinations of parameter values allowing to reach precise range of outputs. This two-step approach was already used by *Génard et al. (2016)* and *Quilot-Turion et al. (2016)*, but with a second step consisting in running optimization algorithms.

The sensitivity analysis was performed based on two contrasted sites differing in terms of climatic conditions (belonging to different groups of combination of climatic factors impacting yield, see CHAPTER 4) and N management (Table 6.2). However, due to time constraints, only one year (2013), has been included for now in the sensitivity analysis. Several authors have demonstrated a large impact of the pedoclimatic conditions on the results of a sensitivity analyses (*Asseng et al., 2002*; *Barbottin, 2004*). Yet, until recently, the uncertainty associated with climate (site) and weather (year) variability was rarely considered in this type of study. Concerning the method, we used a FAST algorithm, an efficient method for sensitivity analysis (*Makowski et al., 2006*). However, we also computed Sobol sensitivity indices (*Sobol, 1993*). This second method showed very similar results compared to the FAST method. Another important feature of our study was the choice of the bounds of each parameter. Contrary to *Makowski et al. (2006)*, the bounds were chosen to be realistic. As results, the agronomic performances were maintained in plausible ranges (Figure 6.1).

Concerning the second step, we defined 500 virtual genotypes by combining values of 6 parameters. The set of genotypes was defined based on a function maximizing the minimum distance between each pair of genotypes based on the Euclidian distance based on the 6 genotypic characteristics. However, the 500 genotypes created could seem insufficient to fully explore the 6 dimensions space. For example, some particular genotypes reached very different performances than the others (Figure 6.3). A second version of this study including more virtual genotypes will possibly be produced.

Other methods are currently used for searching favorable ideotypes. For example, *Semenov and Stratonovitch (2013)* used an iterative process called evolutionary algorithm with self-adaptation (EA-SA). The performance of virtual genotypes, defined by randomly perturbing parameters, are then assessed, and best genotypes are selected in a second iteration of the process. Depending on the number of iterations and genotypes simulated, this method could be more efficient to explore the GEM space (*Picheny et al., 2017b*).

#### **4.2. Genotypic characteristics that did not impact the performance of barley**

Among the 10 parameters considered as potentially impacting barley performances, the sensitivity analyses showed that 4 of them were not of main importance for predicting calibrated yield, grain protein content and N losses with the model.

The maximum genotypic yield did not largely impact the variance of the three outputs of the model. This finding is contradictory to *Makowski et al. (2006)*: they showed that this parameter explained 77% of total variance of the yield for the Azodyn-wheat model (sensitivity performed with Fast method, but very different bounds and sets of parameters). They explained the large effect of this variable by the favorable climatic and N fertilization they chose (total amount applied = 240 kg N ha<sup>-1</sup>). On the contrary, in our study, the total N applied amounted to 92 and 135 kg N ha<sup>-1</sup> respectively for the reduced and non-reduced fertilization. Indeed, we deliberately chose to set the amount of fertilizer equal or -30% to the observed total amount applied in the *département* considered. Moreover, N was applied early in the crop cycle (approx. Zadock 23 and 30) compared to *Makowski et al. (2006)*'s study. In our case, this low and earlier N application could have prevented the crop to reach its potential yield. The mean calibrated yield amounted to 5.1 and 6.0 t ha<sup>-1</sup> for each of the two sites considered (compared to the maximum genotypic yield ranging from 8.0 to 10.5 t ha<sup>-1</sup>). This also could explain the low importance of the maximum thousand-kernel weight observed in our study. Non-potential conditions are frequently observed in field conditions. Indeed, in farmer fields, abiotic stress factors frequently constrain growth and productivity of major crop species such as cereals (*Araus et al., 2008*). Yield potential are thus rarely reached in multi-site trials: for example in the multi-site experiment of CHAPTER 1, observed yield were for all site except one below 85% of the maximum yield observed on the experiment. This finding thus suggests that factors determining maximum yield are not of main importance to reach a high quantitative and qualitative production in real situations.

The parameter linking the thousand-kernel weight and the retention fraction (alphaNG) did not seem to impact largely the calibrated yield. In the CHAPTER 3, however, we demonstrated that this genotypic parameter allowed to significantly improve the prediction of the retention fraction. This opposite result could be explained by a greater importance of factors impacting yield than retention fraction. Furthermore, variation of retention fraction could have been more mediated by the thousand-kernel weight than the alphaNG parameter. This hypothesis is corroborated with *Sharma and Anderson (2004)*

results. These authors successfully predicted the screening (% of grain with a size < 2mm) based only on the thousand-kernel weight. Further investigations could be needed to precisely determine genotypic effects on the grain size that are not mediated by the thousand-kernel weight.

In our study, changing the senescence parameter by 10% in two contrasted N conditions did not impact the three considered outputs. Depending on the environment, this corresponded to maximum leaf area index prolonged by a maximum of approx. 7 days. *Bogard et al. (2010)* stipulated that post-anthesis leaf senescence might be an interesting candidate as a physiological process affecting both grain protein content and grain yield. In sorghum, for example *Borrell et al. (2001)* found that stay-green phenotypes result from the ability to maintain post-anthesis N uptake under drought conditions and produce higher grain yield under stressed environments. Similarly, *Spano et al. (2003)* found that stay-green genotypes have a prolonged photosynthetic capacity and a higher yield. Finally, *Curci et al. (2017)* findings strongly support that, when nitrogen is limited, a premature leaf senescence occurs affecting the rate and duration of protein accumulation in the seeds.

#### **4.3. Combination of genotypic traits allowing to reach high agronomic performances in low-N system**

Over the 500 genotypes defined with the 6 parameters retained after the sensitivity analyses, no correlation was observed between the score of grain protein content and calibrated yield ( $cor = 0.0$ ), indicating that both criteria could possibly and simultaneously be optimized. Moreover, a strong and negative correlation was observed between calibrated grain yield and N losses. This latter correlation could be explained by the fact that high plant growth rate led generally to high N use efficiency when fertilizer is applied (*Limaux et al., 1999*). A high growth rate also favors high biomass at flowering, which is significantly correlated to grain yield (*Whan et al., 1991*). Finally, these correlations mean that genotypes having high performances on the three criteria could thus be identified.

Contrary to *Barbottin et al. (2006)*, we found that the capacity of genotype to produce biomass at the end-of-winter was of main importance to explain yield variation and, in a lesser extent, grain protein content variation. This finding is coherent with the results of CHAPTER 2, where N uptake at the end-of-winter was an important factor explaining the ratio of grain protein content between high and low-N systems. Similarly, improved growth rate in the pre-anthesis period has been shown to increase grain number per  $m^2$  (*Austin et al., 1980*), and increase carbohydrate sources for grain filling period (*Shearman et al., 2005*). Moreover, *Rebetzke et al. (2004)* analysed that a rapid leaf area development early in the season has potential to increase weed competitiveness, water use efficiency and grain yield of winter cereal. Correlation of this factor and the yield of wheat grown in Mediterranean environments has also been demonstrated (*Botwright et al., 2002*; *Turner and Nicolas, 1998*; *Whan et al., 1991*). Finally, *Pang et al. (2014)* demonstrated that wheat genotypes with high early vigour accumulate more nitrogen



and have higher photosynthetic nitrogen use efficiency during early growth. In low-N system, we confirmed that genotypes belonging to the “green” group highlighted higher capacity of biomass accumulation at the end-of-winter compared to both the 500-genotype mean and the *Pareto* optimal solution. Genotype with high yield, however, could have a relative low value of this variable if combined, for example, with a high radiation use efficiency (“red” group in low-N system).

In our study, we found that the main factor impacting grain protein content was the proportion of N at flowering translocated to the grains at harvest. This finding is coherent with *Makowski et al. (2006)* study. The nitrogen remobilized from the vegetative parts is indeed the main source of nitrogen for the grains (*Barbottin et al., 2005; Simpson et al., 1983*). This source accounts for 60 to 92% of the nitrogen accumulated in the grains at maturity (*Barbottin et al., 2005; Papakosta and Gagianas, 1991*). *Barbottin et al. (2005)* for wheat however demonstrated that, in both environments with or without limiting factor during the grain filling period, the nitrogen remobilization could be estimated from the N at flowering from a single linear relationship, regardless of genotype. This finding could indicate that it would be difficult for breeders to produce genotypes with higher N remobilization efficiency. The sub-profile for “red” group could thus be difficult to achieve by breeders. However, the median value of this parameter for two sub-profiles for “green” groups in low-N system was close to the median value of the 500 genotypes. This latter corresponds to a N remobilization of 78%, a similar value was found in CHAPTER 4 for barley. Moreover, for malting barley, a high N remobilization could be interesting only if genotypes have also a high potential for dry matter accumulation, in order to avoid exceeding the 11.5% grain protein content threshold.

The radiation use efficiency was a main factor impacting the three studied outputs in the sensitivity analysis and differentiating groups of performances in low-N system. Photosynthetic capacity and efficiency has been stated as a bottlenecks to raising productivity and there is strong evidence that increasing photosynthesis will increase crop yields provided that other constraints do not become limiting (*Parry et al., 2011; Sinclair et al., 2004*). Experimentally, no increase in crop yield has been obtained as a result of breeding efforts based on genotypes with high leaf photosynthetic rates (*Ford et al., 1983; Moss and Musgrave, 1971*). Few studies show clear associations between genetic improvements in yield and increased photosynthetic rate (*Evans, 1993*). However, recent bioengineering research have demonstrated increased leaf carbon dioxide uptake and plant dry matter productivity by about 15% in fluctuating light by modifying mechanisms of photosynthesis (*Kromdijk et al., 2016*). In our study, it does not seem to be necessary to increase RUE for reaching high agronomic performances (ie. “green” group of performance). In our study, the N\_LAI parameter, which accounts for a biomass and leaf area index reduction according to N stress, showed a median value close for the three groups of performances in the low-N system (ranged from 98 to 104%). Even if this factor largely impacted the calibrated yield output (Figure 6.2), high calibrated yield can be achieved with relative high sensitivity to N stress, depending on other parameters (in particular alphaNG).

Precocity at flowering did not largely impact the results of the sensitivity analysis for the calibrated yield and the grain protein content. Complementarily, previous experimental results (CHAPTER 2) showed that this factor was not significantly related to the relative calibrated yield loss and relative grain protein content loss between high-N and low-N systems. The second part of the present study analysis, however, showed that, for some particular profiles, this factor seemed to have a more important role (“green” groups). In other studies, the timing of flowering has been shown to be a major trait related to the adaptation of cultivars to particular areas, thus determining crop performance under prevalent field conditions (*Araus et al., 2008; Passioura, 1996*). Extending the phase of stem elongation has been proposed as a tool to further improve yield potential in small-grain cereals (*Borràs-Gelonch et al., 2010; Miralles and Richards, 2000*).

On the contrary, *Tao et al. (2017)* found that Barley ideotypes adapted to future climatic conditions should have a shorter pre-anthesis duration. Similarly, *Bertholdsson (1999)* stated that late heading cultivars tend to have more stable grain protein content. Profiles of “green” group in our study, either presented early or late heading dates.

Our study demonstrated that various combinations of traits allowed to reach *Pareto* optimal solutions in low-N system. Some of these profiles, however, should be difficult to breed. For example, one sub-profile of “red” group cumulates very high values for the potential grain number, the proportion of N at flowering remobilized in the grains, and the radiation use efficiency. This profile would probably be difficult to achieve in reality. *Picheny et al. (2017a)* proposed to use a metric of feasibility, accounting for correlations between traits based on field observations to root numerical experiments in biological reality. In our study, « green » profiles have combination of parameters closer to the observed one (i.e. closer to the median value of the 500-genotypes). Without this metric, these profiles seemed thus more easily achievable. Moreover, among *Pareto* optimal solutions, these genotypes presented both high calibrated yield and score of grain protein content. These genotypes are thus the more interesting genotypes to develop for farmers. For breeders, main efforts to develop these genotypes, according to our results, will have to focus on the capacity to produce high dry matter at the end of winter, the potential grain number and the precocity. Different combinations of target value for these characteristics are possible depending on the value of other characteristics.

#### **4.4. Are the genotypes allowing to reach high performances different between environments?**

Most studies analyzing favorable traits to adapt plant to some particular contexts were based on a few numbers of tested conditions. For example, the study of *Quilot-Turion et al. (2012)* to design peach genotypes has been performed under a constant environment (year 2009 in Avignon, France), as the ones carried out by *Letort et al., (2007) et Qi et al., (2010)*. Similarly, *Tao et al. (2017)* designed future

barley ideotypes based on only two contrasted environments. In our study, we based our analysis on the mean performance reached by the genotypes in the 875 environments representative of the French Barley belt. We furthermore studied if the genotypes identified reached high agronomic and environmental performances in different subsets of the whole barley belt. Only three genotypes were common in the *Pareto* optimal solution for the three geographical clusters. These genotypes were characterized by a high calibrated yield. This finding is coherent with the analysis of *Braun et al. (1996)*. They found that some highest yield cultivars developed by the international Maize and Wheat improvement center reached the highest yield compared to other cultivars in numerous and diverse meta-environments. In our study, most of the genotypes identified at the national scale were not retained in the *Pareto* optimal solution for the different regions considered. For example, genotypes reaching a very high grain protein score were mainly different between subregions and all the environments. Similarly, *Hammer et al. (2014)* showed that geographic subregions that have frequencies of major environment types substantially different from that of the entire production region show greatest advantage for specific adaptation. They concluded that the specific adaptation approach confers higher yield and lower risk to get low agronomic performances.

*Hammer et al. (2014)* advised that specific adaptation based on environment type, rather than on location, would likely be more useful. Our study was based on groups of *départements* with similar climatic factors impacting yield. However, the number of *départements* in each GC differed. GC with the largest number of *départements* have thus a larger contribution to the mean values calculated at the national scale. For the barley belt, a previous work characterized the climatic factors impacting yield. It could therefore be interesting to analyze barley specific characteristics adapted to these constraints.

#### **4.5. Are the genotypes allowing to reach high performances different between high and low N management systems?**

In general, approaches to crop yield improvement continue to separate G (i.e. plant breeding) and M (i.e. agronomic) approaches (*Hammer et al., 2014*). Plant breeders search for superior genotypes that have improved performance across the whole target population of environments in the production system (*Cooper and Hammer 1996; Jordan et al. 2006*). Most studies analyzing favorable traits to adapt plants to some particular contexts were based on climatic conditions rather than management choice (e.g *Rötter et al., 2015; Semenov and Stratonovitch, 2013; Tao et al., 2017*). In our study, we compared genotypes adapted to various environments for either low or high N conditions. Our results confirmed previous experimental findings (CHAPTER 1): the best genotypes in high-N system performed quite well under low-N system. However, specifically adapted genotypes reach higher performances in low-N system. This finding tends to be particularly true for genotypes reaching very high score of grain protein content.

In another study (CHAPTER 5), the performances of a “standard” genotype have been evaluated through the same model in the same set of environments and for the same N fertilization strategy. Comparison of results between these two studies could allow to estimate potential gain of genotype adaptation to low-N system. The mean calibrated yield increased by 0.5 t ha<sup>-1</sup> (6.0 vs. 5.5), 0.7 t ha<sup>-1</sup> (5.0 vs. 4.3) and 1.0 t ha<sup>-1</sup> (5.0 vs.4.0) for the mean value of the “green” group vs. the standard genotype and for GC1, GC2 and GC3 respectively. The mean score of grain protein content increased by 0.08 (0.79 vs. 0.71), 0.08 (0.66 vs. 0.58) and 0.03 (0.61 vs.0.58) for the mean value of the “green” group vs. the standard genotype and for the three respectively. Finally, our results showed that adapting both genotypes and N fertilization management characteristics for low-N system allows to reach similar results as standard genotypes in high-N system. The mean difference of calibrated yield was -0.1 t ha<sup>-1</sup>, -0.1 t ha<sup>-1</sup> and +0.2 t ha<sup>-1</sup> for the mean value of the “green” group vs. the standard genotype and for the three GC. The mean difference of score of grain protein was +0.6, +0.6 t ha<sup>-1</sup> and +0.6 t ha<sup>-1</sup> for the mean value of the “green” group vs. the standard genotype and for the three GC.

## **Conclusion**

We identified the malting barley genotypic characteristics for high quantitative and qualitative agronomic and environmental performances in low-N system of the French barley belt. Our results showed that these genotypic characteristics differ between low-N and high N systems, except for high-yielding genotypes. Diverse combinations of genotypic characteristics allowed to reach optimal agronomic and environmental solutions. Main genotypic traits differing among genotypes were their capacity to produce a high number of grains and high dry matter at the end of winter, their radiation use efficiency and their precocity. Our results showed that the maximum genotypic yield and thousand-kernel weight were not main factors to explain high agronomic performances. Best performing genotypes at a national scale were not always optimal for different sub-regions of the barley belt. Thanks to comparison with previous results (CHAPTER 4), we concluded that adapting both genotype and management allows the low-N management system to reach similar performances compared to “standard” high-input system.



### Literature

- Araus, J.L., Slafer, G.A., Royo, C., Serret, M.D., 2008. Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 27, 377–412. doi:10.1080/07352680802467736
- Asseng, S., Bar-Tal, A., Bowden, J., Keating, B., Van Herwaarden, A., Palta, J., Huth, N., Probert, M., 2002. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat. *Eur. J. Agron.* 16, 25–42. doi:10.1016/S1161-0301(01)00116-2
- Austin, R., Bingham, J., Blackwell, R., Evans, L., Ford, M., Morgan, C., Taylor, M., 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.* 94, 675–689.
- Barbottin, A., 2004. Utilisation d'un modele de culture pour evaluer le comportement des genotypes: Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilite du rendement et de la teneur en proteines du ble tendre. *life Sciences. INAPG, Paris.*
- Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.-H., 2005. Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Wheat. *Crop Sci.* 45, 1141. doi:10.2135/cropsci2003.0361
- Bergez, J.-E., Chabrier, P., Gary, C., Jeuffroy, M.H., Makowski, D., Quesnel, G., Ramat, E., Raynal, H., Rousse, N., Wallach, D., Debaeke, P., Durand, P., Duru, M., Dury, J., Faverdin, P., Gascuel-Oudou, C., Garcia, F., 2013. An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems. *Environ. Model. Softw.* 39, 39–49. doi:10.1016/j.envsoft.2012.03.011
- Bertholdsson, N., 1999. Characterization of malting barley cultivars with more or less stable grain protein content under varying environmental conditions. *Eur. J. Agron.* 10, 1–8. doi:10.1016/S1161-0301(98)00043-4
- Bogard, M., Allard, V., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Machet, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Martre, P., Le Gouis, J., 2010. Deviation from the grain protein concentration–grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat. *J. Exp. Bot.* 61, 4303–4312.
- Boote, K.J., Kropff, M.J., Bindraban, P.S., 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agric. Syst.* 70, 395–420. doi:10.1016/S0308-521X(01)00053-1
- Borràs-Gelonch, G., Slafer, G.A., Casas, A.M., van Eeuwijk, F., Romagosa, I., 2010. Genetic control of pre-heading phases and other traits related to development in a double-haploid barley (*Hordeum vulgare* L.) population. *Field Crops Res.* 119, 36–47. doi:10.1016/j.fcr.2010.06.013
- Borrell, A., Hammer, G., Oosterom, E., 2001. Stay-green: A consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling? *Ann. Appl. Biol.* 138, 91–95. doi:10.1111/j.1744-7348.2001.tb00088.x
- Botwright, T., Condon, A., Rebetzke, G., Richards, R., 2002. Field evaluation of early vigour for genetic improvement of grain yield in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 53, 1137–1145.
- Braun, H.-J., Rajaram, S., van Ginkel, M., 1996. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92, 175–183. doi:10.1007/BF00022843
- Chan, K., Saltelli, A., Tarantola, S., 1997. Sensitivity analysis of model output: variance-based methods make the difference, in: *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation.* IEEE Computer Society, pp. 261–268.
- Curci, P.L., Aiese Cigliano, R., Zuluaga, D.L., Janni, M., Sanseverino, W., Sonnante, G., 2017. Transcriptomic response of durum wheat to nitrogen starvation. *Sci. Rep.* 7. doi:10.1038/s41598-017-01377-0
- Dingkuhn, M., De Vries, F.P., De Datta, S., Van Laar, H., 1991. Concepts for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. *Direct Seeded Flooded Rice Trop. Manila Philipp. Int. Rice Res. Inst.* 17–38.
- Ford, D.M., Shibles, R., Green, D.E., 1983. Growth and Yield of Soybean Lines Selected for Divergent Leaf Photosynthetic Ability1. *Crop Sci.* 23, 517. doi:10.2135/cropsci1983.0011183X002300030018x

- Génard, M., Memmah, M.-M., Quilot-Turion, B., Vercambre, G., Baldazzi, V., Le Bot, J., Bertin, N., Gautier, H., Lescourret, F., Pagès, L., 2016. Process-based simulation models are essential tools for virtual profiling and design of ideotypes: example of fruit and root, in: *Crop Systems Biology*. Springer, pp. 83–104.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science* 327, 812–818.
- Grechi, I., Tixier, P., Rhino, B., Malezieux, E., Ratnadass, A., 2012. An individual-based modeling approach to assess trap cropping management of *Helicoverpa zea* in tomato field in Martinique.
- Groot, J.C.J., Rossing, W.A.H., 2011. Model-aided learning for adaptive management of natural resources: an evolutionary design perspective: Model-aided learning for adaptive NRM. *Methods Ecol. Evol.* 2, 643–650. doi:10.1111/j.2041-210X.2011.00114.x
- Hammer, G.L., Jordan, D., 2007. An integrated systems approach to crop improvement. *Drought Front. Rice* 189.
- Hammer, G.L., Kropff, M.J., Sinclair, T.R., Porter, J.R., 2002. Future contributions of crop modelling—from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Eur. J. Agron.* 18, 15–31. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00093-X
- Hammer, G.L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M.T., van Oosterom, E., Jordan, D., 2014. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop Pasture Sci.* 65, 614–626.
- Husson, F., Josse, J., Pagès, J., 2010. Principal component methods - hierarchical clustering - partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data?
- Incograin, 2014. Addendum technique N°IV pour la vente des orges de brasseries.
- Jeuffroy, M.-H., Casadebaig, P., Debaeke, P., Loyce, C., Meynard, J.-M., 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 121–137. doi:10.1007/s13593-013-0170-9
- Kromdijk, J., Głowacka, K., Leonelli, L., Gabilly, S.T., Iwai, M., Niyogi, K.K., Long, S.P., 2016. Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science* 354, 857–861. doi:10.1126/science.aai8878
- Letort, V., Mahe, P., Cournède, P.-H., De Reffye, P., Courtois, B., 2007. Quantitative genetics and functional–structural plant growth models: simulation of quantitative trait loci detection for model parameters and application to potential yield optimization. *Ann. Bot.* 101, 1243–1254.
- Limaux, F., 1999. Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine.
- 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., Heddad, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2012. 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. doi:10.1016/j.fcr.2011.08.007
- Makowski, D., Naud, C., Jeuffroy, M.-H., Barbottin, A., Monod, H., 2006. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91, 1142–1147. doi:10.1016/j.ress.2005.11.015
- Makowski, D., Wallach, D., Meynard, J.-M., 1999. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agron. J.* 91, 377–385.
- Martre, P., He, J., Le Gouis, J., Semenov, M.A., 2015a. *In silico* system analysis of physiological traits determining grain yield and protein concentration for wheat as influenced by climate and crop management. *J. Exp. Bot.* 66, 3581–3598. doi:10.1093/jxb/erv049
- Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J.W., Rötter, R.P., Boote, K.J., Ruane, A.C., Thorburn, P.J., Cammarano, D., 2015b. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Glob. Change Biol.* 21, 911–925.
- Michalczyk, A., Kersebaum, K.C., Roelcke, M., Hartmann, T., Yue, S.-C., Chen, X.-P., Zhang, F.-S., 2014.



- Model-based optimisation of nitrogen and water management for wheat–maize systems in the North China Plain. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 98, 203–222.
- Miralles, D., Richards, R., 2000. Responses of leaf and tiller emergence and primordium initiation in wheat and barley to interchanged photoperiod. *Ann. Bot.* 85, 655–663.
- Moss, D.N., Musgrave, R.B., 1971. Photosynthesis and crop production. *Adv. Agron.* 23, 317–336.
- Murphy, K.M., Campbell, K.G., Lyon, S.R., Jones, S.S., 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Res.* 102, 172–177. doi:10.1016/j.fcr.2007.03.011
- O'Donovan, J.T., Turkington, T.K., Edney, M.J., Clayton, G.W., McKenzie, R.H., Juskiw, P.E., Lafond, G.P., Grant, C.A., Brandt, S., Harker, K.N., Johnson, E.N., May, W.E., 2011. Seeding Rate, Nitrogen Rate, and Cultivar Effects on Malting Barley Production. *Agron. J.* 103, 709. doi:10.2134/agronj2010.0490
- Pang, J., Palta, J.A., Rebetzke, G.J., Milroy, S.P., 2014. Wheat genotypes with high early vigour accumulate more nitrogen and have higher photosynthetic nitrogen use efficiency during early growth. *Funct. Plant Biol.* 41, 215. doi:10.1071/FP13143
- Papakosta, D.K., Gagianas, A., 1991. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling. *Agron. J.* 83, 864–870.
- Parry, M.A.J., Reynolds, M., Salvucci, M.E., Raines, C., Andralojc, P.J., Zhu, X.-G., Price, G.D., Condon, A.G., Furbank, R.T., 2011. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *J. Exp. Bot.* 62, 453–467. doi:10.1093/jxb/erq304
- Passioura, J., 1996. Drought and drought tolerance, in: *Drought Tolerance in Higher Plants: Genetical, Physiological and Molecular Biological Analysis*. Springer, pp. 1–5.
- Picheny, V., Casadebaig, P., Trépos, R., Faivre, R., Da Silva, D., Vincourt, P., Costes, E., 2017a. Using numerical plant models and phenotypic correlation space to design achievable ideotypes: Phenotypic correlations in ideotype design. *Plant Cell Environ.* doi:10.1111/pce.13001
- Picheny, V., Casadebaig, P., Trépos, R., Faivre, R., Da Silva, D., Vincourt, P., Costes, E., 2016. Finding realistic and efficient plant phenotypes using numerical models. *ArXiv Prepr. ArXiv160303238*.
- Picheny, V., Trépos, R., Casadebaig, P., 2017b. Optimization of black-box models with uncertain climatic inputs? Application to sunflower ideotype design. *PLOS ONE* 12, e0176815. doi:10.1371/journal.pone.0176815
- Qi, R., Ma, Y., Hu, B., de Reffye, P., Cournède, P.-H., 2010. Optimization of source–sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: A case study on maize. *Comput. Electron. Agric.* 71, 96–105. doi:10.1016/j.compag.2009.12.008
- Quilot-Turion, B., Génard, M., Valsesia, P., Memmah, M.-M., 2016. Optimization of allelic combinations controlling parameters of a peach quality model. *Front. Plant Sci.* 7.
- Quilot-Turion, B., Ould-Sidi, M.-M., Kadrani, A., Hilgert, N., Génard, M., Lescouret, F., 2012. Optimization of parameters of the “Virtual Fruit” model to design peach genotype for sustainable production systems. *Eur. J. Agron.* 42, 34–48. doi:10.1016/j.eja.2011.11.008
- Rolland, B., Bouchard, C., Loyce, C., Meynard, J.-M., Guyomard, H., Lonne, P., Doussinault, G., 2003. Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre: une alternative pour concilier économie et environnement. *Courr. Environ. INRA* 49, 47–62.
- Rötter, R., Tao, F., Höhn, J., Palosuo, T., 2015. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. *J. Exp. Bot.* erv098.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., 2000. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Stat. Sci.* 377–395.
- Semenov, M., Stratonovitch, P., Alghabari, F., Gooding, M., 2014. Adapting wheat in Europe for climate change. *J. Cereal Sci.* 59, 245–256.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2013. Designing high-yielding wheat ideotypes for a changing climate. *Food Energy Secur.* 2, 185–196.
- Sharma, D., Anderson, W., 2004. Small grain screenings in wheat: interactions of cultivars with season, site, and management practices. *Aust. J. Agric. Res.* 55, 797–809.

- Shearman, V., Sylvester-Bradley, R., Scott, R., Foulkes, M., 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Sci.* 45, 175–185.
- Simpson, R.L., Good, R.E., Leck, M.A., Whigham, D.F., 1983. The ecology of freshwater tidal wetlands. *BioScience* 33, 255–259.
- Sinclair, T.R., Purcell, L.C., Sneller, C.H., 2004. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends Plant Sci.* 9, 70–75.
- Sobol, I.M., 1993. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Math. Model. Comput. Exp.* 1, 407–414.
- Spano, G., Di Fonzo, N., Perrotta, C., Platani, C., Ronga, G., Lawlor, D., Napier, J., Shewry, P., 2003. Physiological characterization of “stay green” mutants in durum wheat. *J. Exp. Bot.* 54, 1415–1420.
- Stein, M., 1987. Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling. *Technometrics* 29, 143. doi:10.2307/1269769
- Tao, F., Rötter, R.P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C., Mínguez, M.I., Semenov, M.A., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Cammarano, D., Hoffmann, H., others, 2017. Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *Eur. J. Agron.* 82, 144–162.
- Tardieu, F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends Plant Sci.* 8, 9–14. doi:10.1016/S1360-1385(02)00008-0
- Tilman, D., 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 5995–6000.
- Turner, N.C., Nicolas, M.E., 1998. Early vigour: a yield-positive characteristic for wheat in drought-prone mediterranean-type environments. *Crop Improv. Stress Toler.* RK Behl DP Singh GP Lodhi Pp 47–62.
- Voltas, J., van Eeuwijk, F., Igartua, E., del Moral, L.G., Molina-Cano, J.L., Romagosa, I., 2002. Genotype by environment interaction and adaptation in barley breeding: basic concepts and methods of analysis. *Barley Sci. Recent Adv. Mol. Biol. Agron. Yield Qual.* 205–241.
- Whan, B., Carlton, G., Anderson, W., 1991. Potential for increasing early vigour and total biomass in spring wheat. I. Identification of genetic improvements. *Aust. J. Agric. Res.* 42, 347–361.



## Discussion Générale

*“It is paradoxical, yet true, to say, that  
the more we know, the more ignorant we become in the absolute sense,  
for it is only through enlightenment that we become conscious of our limitations.”*

*Nikola Tesla*



## **1. Quelles caractéristiques des itinéraires techniques avec intrants réduits en orge brassicole ?**

### **1.1. Pourquoi développer des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en orge brassicole ?**

Historiquement, l'augmentation des rendements des céréales a été obtenue grâce à une amélioration conjointe des pratiques agronomiques et des caractéristiques variétales (*Cooper et al., 2004*). Plus précisément, cette évolution est expliquée par l'augmentation du rayonnement intercepté (grâce à un allongement du cycle et des dates de semis plus précoces) et la réduction des facteurs limitants de la production (grâce à une utilisation croissante d'intrants). L'utilisation intensive des intrants a cependant entraîné des impacts négatifs sur l'environnement (*MEA, 2005; Tilman, 1999*). Dans le cas de l'orge brassicole, par exemple, les résultats de simulations (CHAPITRE 5) montrent que les stratégies de fertilisation actuelles entraînent de fortes pertes en azote (moyenne simulée de 40 à 48 kg N ha<sup>-1</sup> par an sur 25 années pour les 3 zones géographiques définies dans l'étude).

Développer des méthodes de production plus respectueuses de l'environnement est devenu une priorité de l'agriculture française. Réduire l'utilisation des engrais de synthèse est reconnu comme l'un des principaux leviers pour diminuer la contribution de l'agriculture française à la production de gaz à effet de serre (*Pellerin et al., 2013*) et à la pollution des eaux par les nitrates (*Billen et al., 2013*). Cependant, maintenir un niveau de production suffisant tant quantitatif que qualitatif tout en réduisant la fertilisation azotée nécessite une reconception cohérente et en profondeur des itinéraires techniques.

La production de connaissances en agronomie pour développer des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants a été limitée à quelques espèces majeures. Pour le blé, des recherches ont été menées pour mettre au point ces types de conduites (*Meynard, 1985, Loyce et al., 2012*) et les adapter localement (*Rolland et al., 2003; Limaux et al., 1999*, en Lorraine ; *Saulas et Meynard, 1998*, en Île-de-France ; *Loyce et al., 2008*, en Champagne ; *Viaux, 1999* en Normandie et Picardie ; *Nolot, 2002* en Midi toulousain). Pour l'orge, les recherches sont nettement moins avancées, malgré la mise en place d'un réseau d'acteurs, organisé sur la base du volontariat depuis 2003 et travaillant sur cette problématique (réseau « orge rustique »). Les travaux produits par ce réseau portent sur la capacité des variétés diffusées auprès des agriculteurs à atteindre des performances élevées en bas niveau d'intrants, et sur l'adaptation de l'itinéraire technique pour ce type de conduite. Cependant, une synthèse nationale et une diffusion des résultats n'ont pas encore été effectuées et le travail porte essentiellement sur les critères de performances quantitatifs en orge fourragère. Au début de ce travail, les connaissances actionnables pour mettre en œuvre des itinéraires techniques avec recours réduit aux intrants garantissant des performances agronomiques (rendement et qualité des grains) élevées étaient assez fragmentaires et/ou peu diffusées en orge brassicole. Par conséquent,

les connaissances sur les stratégies de fertilisation (date, dose, fractionnement) étaient encore insuffisamment développées pour qu'elles puissent être appliquées sur le terrain en garantissant des performances agronomiques élevées pour cette espèce et ce type de valorisation.

Comme cela a été démontré par *Loyce et al., 2012*, les caractéristiques des génotypes doivent également être adaptées à l'itinéraire technique pour permettre des performances agronomiques élevées. Certains acteurs de la filière orge brassicole sont demandeurs de ce type de connaissances pour réduire les intrants, comme le démontrent différents programmes financés par les FSOV<sup>15</sup> ou le projet Eco2malt, dans lequel s'insère ce travail de recherche. Des évolutions des pratiques des acteurs de la création et du conseil variétal se mettent progressivement en place pour répondre à cet objectif. Par exemple, l'évaluation variétale à l'inscription prend désormais de façon explicite la préservation de l'environnement dans l'évaluation des variétés (VATE<sup>16</sup>). En revanche, les connaissances précises sur les caractéristiques variétales adaptées à une production d'orge brassicole en condition d'intrants réduits étaient encore faiblement développées au début du projet.

L'expérimentation mise en place au début de la thèse, et détaillée dans le CHAPITRE 1, a montré que, dans les situations étudiées, les critères de qualité brassicole étaient respectés dans un plus faible nombre de situations lorsque l'azote et les fongicides étaient réduits. En effet, sur les 12 sites expérimentaux et pour les conduites économes en intrants, la moyenne des teneurs en protéines était inférieure au seuil de 9.5 % pour 19 % des génotypes (vs. 1% pour le haut niveau d'intrants). Les résultats expérimentaux montrent qu'un travail important est nécessaire pour augmenter les teneurs en protéines en orge de brasserie dans les situations d'intrants réduits. Les génotypes testés, cependant, n'étaient pas spécifiquement sélectionnés, et donc *a priori* peu adaptés, pour ce type de conduite. Le calibrage était faible dans les deux itinéraires techniques, mais présentait plus régulièrement des valeurs en dessous du seuil brassicole pour les situations à bas niveau d'intrants (16 génotypes sur 20 vs. 8 pour la conduite « intensive »). Finalement, le rendement était inférieur de 17 % dans les situations « intrants réduits » par rapport aux situations « intensives ».

En conclusion de cette expérimentation, nous retenons que les génotypes testés (sélectionnés en haut niveau d'intrants) ne permettaient pas d'atteindre, dans une conduite à bas niveau d'intrants, une production et une qualité brassicole suffisantes dans une diversité de milieux. Nous avons alors envisagé plusieurs pistes de travail pour améliorer ces performances : travailler spécifiquement sur les stratégies de fertilisation azotée, sur les caractéristiques génotypiques et combiner les deux.

---

<sup>15</sup> Fonds de soutien à l'obtention végétale- <http://www.fsov.org/index.html>

<sup>16</sup> Etudes permettent d'évaluer les performances agronomiques, technologiques et environnementales des variétés candidates à l'inscription en les comparant à des variétés de référence déjà largement cultivées sur le territoire

## 1.2. Quelles stratégies de fertilisation en orge brassicole pour réduire les impacts environnementaux et maintenir la production ?

Nos résultats montrent qu'adapter les stratégies de fertilisation est un levier majeur pour réduire les pertes environnementales en azote et maintenir la production (quantité et qualité). Les dates et doses d'azote, entre autres, doivent être ajustées simultanément pour maintenir les performances agronomiques. Les fortes baisses de production quantitative et qualitative dans notre réseau expérimental peuvent en partie s'expliquer par le fait que la quantité d'intrants de synthèse apportée a été diminuée, alors que les dates d'apport n'ont pas été modifiées et la densité de semis a été maintenue à 280-300 plantes/m<sup>2</sup>, à la demande des sélectionneurs membres du projet. Le décalage des apports d'azote par rapport aux pratiques courantes n'a pas été réalisé pour des raisons techniques (difficulté opérationnelle de la part des expérimentateurs/agriculteurs en charge des essais d'effectuer deux passages d'apport d'azote pour de faibles surfaces). La conduite culturale testée n'a donc pas permis de diminuer les besoins en azote précoces, et ainsi de réduire la compétition entre les plantes pour les ressources azotées. Cela a probablement impacté la production quantitative et qualitative dans nos essais. Les caractéristiques, non cohérentes, de notre conduite « bas niveau d'intrants » expliquent en partie les différences de production observées entre notre réseau et le réseau « orge rustique » : sur la période 2011-2016, les écarts annuels de rendement entre itinéraires techniques avec fort recours vs. faible recours aux intrants variaient, en moyenne pour 9 variétés fourragères, de 2 à 10 quintaux (contre 15.2 à 16.4 quintaux de perte observée entre les deux itinéraires techniques sur notre réseau). Notre analyse *in silico* des stratégies de fertilisation azotée a permis d'explorer un plus grand nombre de stratégies différant par les dates d'apport, le fractionnement, et les doses totales apportées. Dans le CHAPITRE 5, nous avons identifié 4 à 6 stratégies, différentes de celle pratiquée dans nos essais, qui permettent d'obtenir un meilleur compromis (au sens de *Pareto*) entre rendement calibré, probabilité de respecter l'intervalle de teneur en protéines et pertes en azote environnemental. La majorité de ces stratégies permettent en plus de réduire la dose totale d'azote apportée.

Un point commun entre la majorité des stratégies de fertilisation optimales, identifiées *in silico*, est que lorsque la fertilisation azotée est réduite, retarder les apports d'azote est indispensable pour maintenir la production quantitative et qualitative. Deux éléments peuvent expliquer ces résultats. Les apports précoces sont généralement moins bien valorisés que les apports plus tardifs (*Limaux, 1999*), car la vitesse de croissance des plantes au moment de l'apport limite le potentiel d'absorption de ces dernières. La vitesse de croissance s'accroît jusqu'à floraison. Pour une même quantité d'azote apportée, une plus grande proportion sera donc valorisée par la plante en cas d'apport plus tardif. De plus, des INN faibles ou des carences en début de cycle, ne semblent pas impacter négativement le potentiel de production, si ces dernières sont levées avant floraison.

Ce type de résultat avait déjà été démontré en blé (*Jeuffroy and Bouchard, 1999 ; Ravier, 2017*). De plus, le bénéfice du décalage des apports d'azote en cas de fertilisation réduite avait déjà été mis en évidence par *Loyce et al. (2012)* dans le cas du blé. Similairement, *Ravier (2017)* a également montré, sur cette espèce, que la fertilisation peut-être réduite sans impacter la production quantitative. Les stratégies de fertilisation utilisées par ces auteurs étaient caractérisées par des apports plus tardifs par rapport aux pratiques habituelles. Finalement, les résultats expérimentaux de *Madani et al. (2010)* montrent que l'augmentation de l'azote disponible après floraison entraîne une augmentation de la demande en matière sèche des grains et de la biomasse accumulée dans les grains. Retarder les apports d'azote va cependant à l'encontre des tendances actuelles des agriculteurs. En effet, depuis plusieurs années, la fréquence élevée d'épisodes de sécheresse au printemps a conduit ces derniers à anticiper les apports d'engrais azotés. Un épisode pluvieux avant la date d'apparition du stade épi 1 cm est devenu un facteur prédominant de déclenchement des apports d'azote sur blé (*Ravier, 2017*). Ainsi, les agriculteurs préfèrent augmenter le risque de baisse de l'efficacité d'utilisation de l'engrais et d'augmentation des pertes environnementales pour éviter des carences en début de cycle, liées à la sécheresse. Sous réserve de vérifier, dans les conditions agricoles, que des carences précoces sont également non préjudiciables au rendement sur orge, une communication vers les agriculteurs sur les faibles impacts des carences azotées précoces sur la production, comme démontré par *Ravier, 2017* apparaît donc indispensable à effectuer.

Les résultats expérimentaux et de modélisation suggèrent également qu'il est important d'adapter les caractéristiques de la fertilisation azotée au contexte pédoclimatique. En effet, les effets de la fertilisation sur les stress ressentis par la plante varient en fonction du type de sol et du climat, comme le suggèrent les variations inter-sites des différences d'INN observées à floraison dans notre réseau expérimental entre les deux stratégies de fertilisations azotées: de -0.25 à + 0.10 suivant les environnements. Les stratégies de fertilisation azotées simulées, optimales au sens de *Pareto*, variaient également selon les zones géographiques considérées (CHAPITRE 5), comme déjà mentionné par *Meynard et al. (2002)*. Nos résultats montrent également qu'il est difficile de recommander des stratégies de fertilisation azotée permettant simultanément une production quantitative et qualitative élevée, qui soient valides sur de larges zones géographiques, et qu'une adaptation locale est nécessaire.

Des expérimentations locales sur le terrain seront donc nécessaires pour préciser les caractéristiques des stratégies intéressantes pour la production d'orge brassicole. Les performances des stratégies ont en effet été étudiées par modèle en prenant, comme données d'entrée, les caractéristiques de sol et de climat moyennes à l'échelle des départements. Des adaptations locales, intra-département, des stratégies peuvent être nécessaires. De plus l'interaction entre stratégie de fertilisation et densité de



semis n'a pas été prise en compte dans le modèle, mais souligné comme un facteur important par Loyce *et al.* (2012). Le retour d'expérience des réseaux blé et orge rustiques confirme que l'ajustement des modalités de l'itinéraire (densité de semis, date et dose d'apport d'azote) doit être adapté aux différents contextes pédoclimatiques.

D'autres éléments de la stratégie de fertilisation azotée et d'autres éléments de la conduite technique pourraient être ajustés pour permettre une meilleure cohérence de l'itinéraire technique et plus grande efficacité de l'utilisation de l'azote.

Les stratégies de fertilisation, étudiées dans ce travail de thèse, se basent sur un calcul et un mode de raisonnement de la fertilisation du type *méthode du bilan*. Le rendement objectif, élément clé de cette méthode, peut parfois être difficile à estimer précisément (Ravier *et al.*, 2016). La dose d'azote calculée, a priori optimale, ne permet cependant pas simultanément d'optimiser la nutrition azotée de la plante et de minimiser les pertes environnementales (Makowski *et al.*, 1999 ; Ravier, 2017). Des méthodes de fertilisation, sans calcul prévisionnel de dose, ont été développées sur blé (Ravier, 2017) et pourraient être appliquées pour l'orge brassicole. Cela nécessiterait néanmoins d'identifier les seuils d'INN à atteindre ou à ne pas dépasser pour maximiser la production quantitative et qualitative en orge brassicole tout en minimisant les pertes azotées (un travail important et complémentaire du chapitre 5 serait donc nécessaire).

Les travaux sur blé rustique ont montré que divers éléments de l'itinéraire technique doivent être ajustés simultanément pour permettre une production quantitative et qualitative élevée lorsque les intrants sont réduits. Par exemple, les itinéraires techniques en bas niveau d'intrants en blé, proposés par Meynard (1985), puis par Loyce *et al.* (2012), se basent simultanément sur un changement de variété, une diminution de la densité de semis, associée à un décalage et une réduction des apports d'azote. Ces modifications permettent alors de supprimer le régulateur de croissance et de réduire fortement les fongicides. De même, dans le réseau « orge rustique », pour l'itinéraire avec intrants réduits, la densité de semis est généralement réduite de 20 à 35 % par rapport aux pratiques courantes, 1 fongicide (au lieu de 2 généralement), et 0 ou 1 régulateur de croissance (au lieu de 1 ou 2 généralement) sont appliqués et l'azote est réduit de 20 unités avec des apports plus tardifs (B. Chevalier, comm pers). Les stratégies de fertilisation étudiées dans le cadre de cette thèse n'ont pas pris en compte l'impact d'une diminution des densités de semis (le modèle ne simulant pas directement cet élément de l'itinéraire technique - Azodyn étant initialisé à la sortie de l'hiver). Il serait donc possible d'améliorer la pertinence (et les peut-être les performances) des stratégies de fertilisation azotée proposées.

### **1.3. Quelles variétés sont favorables à des performances agronomiques élevées en conditions d'intrants N réduits ?**

#### *1.3.1 Quelle diversité génétique mobiliser pour identifier les variétés et caractéristiques variétales adaptées au stress azoté ?*

La sélection et le développement de génotypes adaptés à certains environnements (ou certains itinéraires techniques) requièrent l'existence d'une diversité génétique suffisante et une analyse précise de cette dernière (Donald, 1968 ; Mohammadi et Prasanna, 2003). Le nombre de génotypes analysés et la diversité de leur origine sont importants à considérer lors des analyses de la diversité des réponses génotypiques aux stress.

Le nombre de génotypes analysés dans cette étude est relativement restreint. En effet, dès le début du projet, nous avons pour objectif, en plus d'analyser les performances agronomiques globales mesurées à la récolte (Rendement, calibrage et teneur en protéine), de déterminer précisément les différentes caractéristiques physiologiques et/ou morphologiques des plantes favorables aux performances agronomiques élevées en conditions d'intrants réduits. Les mesures des caractéristiques variétales en cours de culture sont chronophages et coûteuses (prélèvement, comptage, broyage et analyse au laboratoire) et limitent, de fait, les effectifs de génotypes sur lesquels ces mesures peuvent être déployées. En effet, comme l'a montré Lecomte (2005) dans le cadre des essais variétaux, des contraintes organisationnelles dans la mise en œuvre des réseaux expérimentaux et le coût de ces réseaux limitent le nombre de génotypes et le nombre de sites testés. Dans cette thèse, l'analyse de la diversité des performances de production s'est basée sur 4 variétés inscrites au catalogue officiel et 16 génotypes en dernière phase d'évaluation par les sélectionneurs avant une potentielle demande d'inscription au catalogue. Par rapport aux études habituelles sur l'analyse de la diversité génétique, travailler sur 20 génotypes peut paraître réducteur et insuffisant. Par exemple, Munoz-Amatriain et al. (2014) ont analysé plus de 2 400 accessions d'orge pour étudier leur diversité génétique afin de faciliter leur utilisation ultérieure dans des programmes de sélection. Ces auteurs n'ont cependant pas mené d'expérimentation au champ pour caractériser le comportement et les performances des accessions, mais ont étudié la diversité des caractéristiques génétiques (par. ex. le déséquilibre de liaison, qui détermine le degré de diversité génétique). Cette étude, selon les auteurs, pourrait servir à développer des variétés adaptées à certaines contraintes du milieu. En revanche, ce type d'étude, ne permet pas d'analyser précisément le niveau de performances des génotypes en conditions agricoles. Dans la littérature scientifique, l'analyse détaillée des performances agronomiques, basée sur une expérimentation au champ, implique généralement un nombre beaucoup plus restreint de génotypes que les études portant sur la caractérisation génétique : 1 génotype testé sur 3 années et un site pour Delogu et al. (1998), 24 génotypes testés sur 2 années et un site pour Le Gouis et al. (1999), 7 génotypes testés sur

6 années et un site pour *Vargas et al. (1999)*. Les expérimentations impliquant un nombre élevé à la fois de génotypes et de sites expérimentaux sont plus rares.

Pour les céréales, les performances dépendent à la fois de l'effet génotypique et des réponses différentielles des génotypes aux environnements (*Jeuffroy et al., 2014 ; Voltas et al., 2002*). Prendre en compte la diversité des performances des génotypes dans plusieurs milieux est important, c'est pourquoi elles sont généralement évaluées dans des réseaux expérimentaux multi-locaux et pluri-annuels (*Lecomte, 2005*). Les réseaux expérimentaux ne permettent cependant d'explorer qu'une petite partie de la diversité des environnements cibles (*Target population of environments*). Dans notre cas, les performances des génotypes ont été testées sur 14 environnements (dont deux n'ont pas été retenus pour l'analyse pour des raisons agronomiques). Nous pouvons, *a posteriori*, grâce à la caractérisation et à une classification des environnements de production, réalisée dans le CHAPITRE 4, resituer les 12 sites expérimentaux dans 2 des 3 groupes de départements caractérisant la zone française de production d'orge brassicole (*geographical clusters*). Concernant les conditions climatiques testées, les essais ont été menés sur deux années (2013-2014 et 2014-2015). Les deux années expérimentales ont été caractérisées par des semis réalisés en bonnes conditions, de faibles pressions de maladies et de verse et des récoltes précoces (pour 2014-2015). La très faible pression maladie a rendu impossible l'analyse de la diversité des réponses variétales à ce facteur. L'analyse des performances variétales par modélisation (CHAPITRE 6) a permis de compléter le travail expérimental en explorant une gamme beaucoup plus large d'environnements (35 départements X 25 Années).

Les génotypes testés dans l'expérimentation provenaient d'une sélection effectuée dans des milieux avec recours intensifs en intrants. De plus, contrairement à *Laperche et al. (2007)*, pour leur étude sur l'analyse de la diversité de réponse des génotypes à l'azote, les génotypes testés sur notre réseau expérimental n'ont pas été spécifiquement développés pour leurs caractéristiques de sensibilité variée à l'azote (ou au bas niveau d'intrants). Ce type de population n'était pas disponible chez les sélectionneurs membres du projet. Les génotypes ont été choisis, par contre pour leur diversité de comportement potentiel vis-à-vis d'une réduction des intrants à partir de l'expertise des sélectionneurs impliqués dans le projet « Eco2malt ». Les 4 variétés inscrites provenaient de 3 obtenteurs (Florimond-Desprez pour Champie, KWS-Momont pour Casino, et Secobra pour Esterel et Isocel), tandis que les 16 génotypes étaient issus des deux premiers uniquement. Les résultats du CHAPITRE 1 ont montré que, malgré la diversité génétique limitée qui a été explorée, il existait déjà une diversité importante des performances quantitatives et qualitatives des génotypes d'orge d'hiver 6-rangs brassicole aux itinéraires techniques avec recours réduit aux intrants. De plus, ce

pool de géotypes a permis d'identifier des caractéristiques variétales significativement corrélées à une faible perte de production quantitative et qualitative en situation de stress azoté.

D'autres types de ressources génétiques auraient pu être mobilisées et étudiées lors de l'expérimentation. En effet, notre étude était basée sur des variétés issues d'une sélection traditionnelle de lignées pures. Or, des variétés hybrides d'orge ont également été inscrites ces dernières années en France pour une destination brassicole et sont en cours de validation technologique pour tester leur aptitude à répondre aux contraintes industrielles des malteurs et des brasseurs (CTPS, 2016). Les hybrides sont déjà développés en orge fourragère : elles représentaient en 2013 un peu moins de 10 % des surfaces cultivées (Drillaud-Marteau, 2014). L'avantage de l'hybride résulte dans le fait qu'il réunit, à différents *loci*, les allèles favorables dominants présents chez les parents d'adaptation à différentes conditions environnementales, par exemple de résistance à différentes souches de maladies (Gallais, 2015). Les hybrides peuvent ainsi présenter des rendements supérieurs à ceux des lignées (Arvalis, 2016, par exemple pour l'orge fourragère) en itinéraire technique classique. L'intérêt des hybrides pour la résistance aux stress azotés a encore été peu étudié. Pour le blé, les hybrides ont également été développés depuis plus de 20 ans, mais leurs performances n'ont pas suffi à convaincre les producteurs, par rapport au surcoût de la semence, puisqu'en 2012, les blés hybrides occupaient seulement 4 % des surfaces nationales et 7 % des surfaces de blé issu des semences certifiées (Agreste, 2015). Pour comparaison, les variétés de blé rustiques représentaient 16 % des surfaces de blé tendre en 2004 (Bonneuil et al., 2006). La volonté de développer des hybrides tient en partie aussi au fait de l'augmentation de la part du bénéfice collectif qui revient au semencier, par rapport aux variétés lignées (Lemaire, 2009). L'intérêt spécifique des hybrides vis-à-vis d'une réduction de la fertilisation azotée pourrait être analysé en orge.

Enfin, étudier la diversité génétique cultivée et sélectionnée depuis des dizaines d'années pour des systèmes de production intensifs présente certaines limites. Différents auteurs ont observé une importante érosion de la diversité génétique cultivée en blé au XX<sup>e</sup> siècle (Bonnin et al., 2014 ; Shah et al., 2017). Cette érosion réduit potentiellement les voies d'adaptation des variétés créées à partir de ce pool génétique à de nouvelles contraintes biotiques ou abiotiques, d'autant plus pour les espèces allogames. L'introgession de caractéristiques issues de variétés sauvages ou disponibles dans les centres de ressources génétiques permet de pallier cette réduction de diversité génétique (Abbo et al., 2014). L'étude de la diversité génétique sauvage pour améliorer les espèces cultivées est, selon certains auteurs, au cœur des nouveaux enjeux de l'amélioration des plantes (Moreta et al., 2013). De nouvelles caractéristiques potentiellement intéressantes de résistance aux stress biotiques ou abiotiques peuvent être introgressées dans les variétés cultivées à partir de variétés dites « sauvages » (Ellis et al., 2000; Nevo and Chen, 2010). Cependant, le croisement entre variété

sauvage et variété cultivée est souvent fortement défavorable à l'obtention de bonnes performances agronomiques pour les descendants (Zhang *et al.*, 1999). Ainsi, les programmes actuels n'ont que peu recours à ce type de matériel, mais favorisent plutôt les croisements entre matériels élite d'origines différentes pour éviter de perdre fortement en production quantitative et qualitative (Gallais, 2013).

### 1.3.2 Une adaptation spécifique des caractéristiques génotypiques aux environnements avec stress azoté est-elle nécessaire ?

Dans nos travaux, les comparaisons entre les performances des génotypes pour les différents itinéraires techniques permettent de juger de l'intérêt d'une adaptation spécifique de ces derniers aux milieux considérés. Notre étude est originale sur ce point, car nous avons analysé l'intérêt d'une sélection indirecte (sélectionner dans un itinéraire technique pour conclure sur un autre) pour répondre à la fois aux critères de production quantitatif (rendement) et qualitatif (teneur en protéine et calibrage). Les précédentes études se focalisaient sur le rendement uniquement (Atlin and Frey, 1989 ; Calhoun *et al.*, 1994 ; Ceccarelli *et al.*, 1992 ; Sinebo, 2005) ou sur le rendement et la teneur en protéines en blé (Le Campion *et al.*, 2014).

Nos résultats montrent qu'en orge brassicole, les progrès génétiques réalisés pour chacun des critères étudiés en situation de haut niveau d'intrants bénéficient également aux itinéraires techniques moins consommateurs d'intrants. En effet, les résultats du CHAPITRE 1 montrent que les performances quantitatives et qualitatives de l'orge brassicole entre itinéraire technique stressé et non stressé pour l'azote sont fortement corrélées (corrélations de 0.74, 0.82 et 0.81 entre les deux itinéraires techniques pour la capacité à répondre au seuil de teneur en protéines, au calibrage et pour le rendement respectivement). Le CHAPITRE 6 confirme ces résultats. Les génotypes identifiés sur le Front de *Pareto* en conditions peu stressées en azote obtiennent globalement des performances élevées en situations de stress azoté plus prononcés. Sur d'autres céréales, des auteurs ont également trouvé ce même type de résultats (Gallais et Coque, 2005). Contrairement aux stress maladies, la capacité à absorber de l'azote est un facteur important qui différencie les variétés même en conditions de haut niveau d'intrants. Une sélection basée sur ce type de milieu aura tendance à favoriser les génotypes ayant une forte capacité d'absorption de l'azote.

Une sélection des génotypes directement en situation de stress azoté peut cependant se justifier. D'abord, nous montrons qu'identifier les génotypes en haut niveau d'intrants ne permet pas, pour certains critères, de repérer l'ensemble des meilleurs génotypes en bas niveau d'intrants. Dans le CHAPITRE 1, nous avons observé une corrélation très faible ( $cor=-0.2$ ) entre pertes relatives de rendement entre les deux itinéraires techniques et le rendement en haut niveau d'intrants. Cela signifie que des génotypes avec des rendements inférieurs à la moyenne en haut niveau d'azote

peuvent présenter des rendements supérieurs à la moyenne en condition d'azote réduit (génotypes 8, 15, 16 et 4). Ces 4 génotypes semblent donc spécifiquement adaptés aux conditions d'azote réduit pour ce critère. Ces résultats se confirment dans le CHAPITRE 6, où les génotypes d'un des deux groupes du front de *Pareto* avec fort rendement (groupe « vert ») sont différents entre situation stressée en azote et non stressée en azote. Dans le CHAPITRE 2, nous montrons également que la perte relative de teneur en protéine entre bas et haut niveaux d'azote est faiblement corrélée à la teneur en protéine en haut niveau d'azote. Ces résultats se confirment également dans le CHAPITRE 6, où les génotypes du groupe du front de *Pareto* avec fort score en teneur en protéines (groupe « bleu ») sont différents entre situation stressée et non stressée en azote. Au final, ces résultats suggèrent que les génotypes identifiés en haut niveau d'azote ne permettent pas tous d'optimiser les performances en faible niveau d'azote. Sur la base d'une expérimentation en blé de 2 années comprenant plus de 250 lignées, *Brancourt-Hulmel et al. (2005)* concluaient également que l'efficacité de la sélection indirecte d'un itinéraire technique avec fort recours à l'azote pour des itinéraires avec recours réduit à l'azote variait de 0.15 à 0.99 suivant les environnements considérés. La sélection indirecte était donc systématiquement moins efficace qu'une sélection directe. Ceci pourrait amener à un progrès génétique plus lent dans les systèmes avec recours réduit aux intrants si les génotypes sont sélectionnés en haut niveau d'intrants.

Enfin, en orge brassicole, différents critères de qualité en plus du rendement doivent être optimisés simultanément. Dans L'ARTICLE 1, nous montrons que, parmi les 6 variétés avec des performances supérieures à la moyenne sur ces trois critères en haut niveau d'intrants, seule une répond à ces objectifs en situation d'intrants réduits. Dans le CHAPITRE 6, seuls 34 % des génotypes identifiés sur le Front de *Pareto* en haut niveau d'intrants étaient également présents sur le Front de *Pareto* en condition d'azote réduit.

### *1.3.3 Quelles pistes sont envisageables pour améliorer les performances variétales en situation de stress azoté ?*

Pour les agriculteurs et les sélectionneurs, plusieurs solutions sont envisageables pour identifier les variétés adaptées aux conditions d'intrants réduits en orge brassicole.

Une sélection directe dans les situations d'intrants réduits permettrait d'éviter l'élimination de ressources génétiques, moins productives en haut niveau d'intrants, potentiellement intéressantes pour les agriculteurs et pour ce type de milieu. Cette méthode pourrait cependant, entraîner un surcoût financier et en main-d'œuvre important pour les sélectionneurs pour mettre en place ces essais et les analyser, en plus des essais conduits en haut niveau d'intrants. Peu d'études se focalisent sur les caractéristiques variétales intéressantes à sélectionner pour des situations de stress azoté. Le CHAPITRE 6 fournit des pistes sur les caractéristiques variétales intéressantes pour ce type de milieu. Nous montrons que des combinaisons particulières de caractéristiques génotypiques,

dont certaines s'éloignent relativement peu des valeurs des géotypes actuels (caractérisés par les paramètres du modèle Azodyn), permettent d'améliorer les performances des géotypes en situations de stress azotés. Adapter le rendement maximum et le poids de mille grains maximum génotypique ne semblent pas être une piste intéressante pour améliorer les performances dans ce type de milieux, au contraire des caractéristiques de capacité de production de biomasse à la sortie de l'hiver, de potentiel de nombre de grains, de capacité de remobilisation de l'azote, et de précocité. Dans cette étude, la stabilité des performances génotypiques a été analysée en fonction des environnements de production. Nous montrons que les géotypes optimaux (au sens de *Pareto*) identifiés au niveau national ne sont pas, dans la majorité des cas, des géotypes optimisant les performances au niveau local (groupes de *départements*). Cela suggère que les performances des itinéraires techniques pourraient être améliorées si les agriculteurs disposaient de géotypes adaptés spécifiquement aux conditions pédoclimatiques de leur exploitation. Des études complémentaires seront cependant nécessaires pour notamment étudier la stabilité des performances des géotypes, identifiés au CHAPITRE 6, en fonction des conditions pédoclimatiques et des valeurs de leurs caractéristiques pour chacun des paramètres ou par exemple à la ressemblance de leur combinaison de paramètres par rapport aux variétés actuelles.

Une sélection indirecte basée sur des conduites avec recours intensif en intrants permettrait d'éviter des modifications dans les pratiques actuelles des sélectionneurs. Elle pourrait entraîner un progrès génétique sans doute plus lent pour les systèmes extensifs en azote. Cela pourrait réduire l'intérêt, pour les agriculteurs, d'appliquer ce type de système. Cependant, dans les travaux réalisés (CHAPITRE 2), nous avons identifié les caractéristiques variétales mesurées en haut niveau d'intrants, associées à de faibles pertes de production quantitative et qualitative en situation de stress azoté. Cette information pourrait être utilisée par les sélectionneurs pour les aider à trier les géotypes adaptés à la fois en haut et bas niveau d'intrants, à partir d'essais menés en haut niveau d'intrants (*Perlikowski et al., 2013 ; Plaut, 2003*). En effet, avec cette méthode, la connaissance des performances des géotypes en haut niveau d'intrants permettrait d'estimer, à partir des caractéristiques variétales, les pertes de production et donc les performances en situation de stress azotés. Dans la littérature, ces méthodes sont appelées sélection analytique ou physiologique (analytical or physiological breeding) (*Araus., 2008*), mais sont, à notre connaissance, peu pratiquées dans la réalité de la sélection. Pour que les caractéristiques phénotypiques identifiées dans le CHAPITRE 2 soient utiles dans un programme de sélection, elles doivent répondre à un certain nombre de contraintes. La caractéristique doit i) être facilement et rapidement mesurable, ii) présenter une variabilité génétique suffisante mais peu dépendre de l'environnement (faible IGE), iii) être corrélée à de bonnes performances quantitatives ou qualitatives dans une diversité de situations stressées, et iv) ne pas être associée à de mauvaises performances dans les

environnements non stressés. Dans le CHAPITRE 2, l'analyse s'est basée sur des variables physiologiques mesurables directement à partir d'expérimentations en situations non stressées. Pour identifier précisément les corrélations entre ces caractéristiques et la variable étudiée, nous avons :

- i) évité les effets confondants en identifiant par expertise un sous-ensemble de variables impliquées dans les mécanismes de tolérance azoté,
- ii) utilisé une méthode qui prend en compte les corrélations potentielles entre caractéristiques variétales (méthode PLS).

Nous avons choisi d'analyser les pertes relatives de production quantitative et qualitative entre situations stressées et non stressées pour l'azote. La stabilité des caractéristiques variétales favorables à une faible perte de production entre environnements, ainsi que la diversité des performances des génotypes entre environnements ont, par contre, été peu étudiées dans ce chapitre. Ces études complémentaires permettraient d'identifier les caractéristiques variétales spécifiquement adaptées à une faible perte de production en fonction de stress et des conditions pédoclimatiques.

Mener les essais de sélection à la fois en haut niveau d'azote (par ex. au début de sélection) et en bas niveau d'azote (par ex. en fin de programme de sélection) a également été proposé (*Le Campion et al., 2014 ; Ortiz-Monasterio et al. 1997*).

### *1.3.4 Caractéristiques variétales prises en compte pour l'adaptation des génotypes aux conduites à bas niveau d'intrants en orge*

En croisant les résultats des CHAPITRES 2 et 6, certaines caractéristiques variétales ressortent dans les deux études et semblent importantes pour la capacité de tolérance aux stress azotés. La capacité à produire de la biomasse (ou accumuler de l'azote) en sortie hiver permet de limiter la perte de teneur en protéines (CHAPITRE 2) et est également ressortie comme importante à prendre en compte dans le CHAPITRE 6. La capacité des plantes à absorber l'azote a déjà été suggérée comme primordiale à étudier pour améliorer les tolérances variétales aux stress azotés (*Ortiz-Monasterio R. et al., (1997) and Le Gouis et al., (2000)*). Maximiser la valeur de ce paramètre ne semble, par contre, pas être une stratégie intéressante pour maximiser les performances quantitatives et qualitatives de l'orge brassicole. Une forte capacité d'absorption de l'azote des variétés peut favoriser la mise en place d'un nombre de grains élevé qui, dans certaines conditions, peut être défavorable au rendement calibré. Le nombre de grains potentiel génotypique est d'ailleurs ressorti comme important pour les études des CHAPITRES 2 et 6. Ce facteur a également été trouvé comme important à prendre en compte pour caractériser les tolérances variétales aux stress azotés pour d'autres céréales (*Gallais et Coque, 2005*). Les valeurs optimales à atteindre pour cette caractéristique vont également fortement dépendre des valeurs des autres caractéristiques variétales (poids de mille grains par exemple –chapitre 2). La précocité n'est pas ressortie comme variable déterminante des pertes de production (CHAPITRE 2) et, dans l'analyse de sensibilité du modèle, l'effet de cette variable sur les variances des sorties analysées dépendait du site considéré. La



précocité semblait par contre assez importante à prendre en compte dans les profils de génotypes identifiés dans le front de *Pareto* du CHAPITRE 6. Ce chapitre a également permis d'identifier d'autres caractéristiques variétales à prendre en compte (remobilisation, efficacité d'interception du rayonnement) ou qui, d'après nos résultats, semblent avoir moins d'impact sur les variables de production analysées (sénescence, maximum de rendement et de poids d'un grain génotypiques). Des combinaisons particulières des caractéristiques génotypiques importantes ont été proposées (CHAPITRE 6), et révèlent que plusieurs stratégies de combinaisons sont possibles pour créer des génotypes susceptibles d'arriver à des performances quantitatives et qualitatives élevées ?

D'autres caractéristiques variétales non analysées dans ce travail pourraient également avoir un impact sur les tolérances aux stress azotés.

Le potentiel de production et de maintien du nombre de talles en condition de stress azoté pourrait varier suivant les variétés et impacter le rendement et la qualité des grains (notamment la proportion de grains avec une taille supérieure à 2.5 mm). Différentes études ont en effet montré que la nutrition azotée en début de cycle impacte à la fois l'émission de talles et la mortalité de ces dernières (*Alzueta et al., 2012*), avec des conséquences sur le rendement (*del Moral & del Moral, 1995*). Lors de l'expérimentation, la capacité des génotypes à produire et maintenir un nombre élevé de talles en situation de stress azoté a été mesurée sur l'un des sites du réseau expérimental. Une valorisation de ces données pourrait permettre de tester l'existence de différences variétales sur ces critères et d'expliquer une partie des différences de comportement variétal vis-à-vis de carences azotées.

La capacité des variétés à produire un calibrage élevé peut en partie s'expliquer par la capacité des variétés à produire des grains de taille homogène tout au long de l'épi (*De Ruiter, 1999*). Cette caractéristique pourrait impacter la capacité des variétés à maintenir un calibrage élevé en condition de stress azoté. Cette caractéristique a été mesurée dans nos expérimentations. L'analyse de ces données, que nous n'avons pas encore menée à terme, pourrait permettre de caractériser les génotypes plus précisément, et peut-être de repérer des variétés aptes à un calibrage stable dans une diversité de conditions de culture.

Enfin, d'autres caractéristiques seraient importantes à analyser dans le cas d'une conduite technique à bas niveau d'intrants (et non pas à bas niveau d'azote uniquement). Les caractéristiques variétales permettant de diminuer l'impact des pressions maladies sur la perte de rendement n'ont pas été étudiées dans le cadre de ce travail. En effet, les pressions maladies observées sur les essais expérimentaux étaient très faibles, ce qui n'a pas permis d'étudier leurs impacts sur la production. Pour prendre en compte ces facteurs, nous avons mené une analyse sur une base de données nationale regroupant les résultats des essais variétaux en orge en conduites traitée et non traitée contre les maladies (données fournies par le GEVES). Le modèle que nous avons établi à partir des

pressions maladies observées et les caractéristiques génotypiques n'était que très peu prédictif des pertes de rendement des variétés en situation sans fongicide. À l'issue de nos travaux, nous ne pouvons donc pas conseiller des combinaisons pratiques culturales X caractéristiques variétales permettant de réduire l'utilisation de produits phytosanitaires. Cet élément serait pourtant primordial à prendre en compte. En effet, différents auteurs ont montré que l'utilisation de variétés multirésistantes sur blé permet de réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (Jørgensen *et al.*, 2008 ; Loyce *et al.*, 2008) et contribue à la stabilité des rendements malgré une variabilité interannuelle des pressions maladies (McGrann *et al.*, 2014).

#### **1.4. Quelles performances pour des itinéraires techniques où les caractéristiques variétales et de fertilisation azotée sont adaptées au bas niveau d'intrants ?**

Dans ce travail, nous avons analysé dans un premier temps les caractéristiques de la fertilisation azotée adaptées aux stratégies avec recours réduit aux intrants, puis les caractéristiques variétales adaptées pour une stratégie de fertilisation azotée identifiée comme *optimale*. L'analyse comparée des résultats entre les deux études permet de juger de l'intérêt d'une adaptation simultanée de ces deux éléments de l'itinéraire technique pour améliorer les performances en bas niveau d'azote.

La stratégie de fertilisation choisie dans le CHAPITRE 6 (0.7\_BD) pour identifier les caractéristiques variétales favorables aux stress azotés permettait de fortement réduire les pertes en azote environnementales (-48 à 60 % suivant les groupes de départements) par rapport à la stratégie classique (1.0\_AC), mais entraînait également une baisse du rendement calibré (-6 à -10 % suivant les groupes de départements) et du score de teneur en protéines (0 à -4 % suivant les groupes de départements).

Adapter les caractéristiques génotypiques a permis de fortement améliorer les performances agronomiques par rapport à un génotype « standard » sans détériorer les performances environnementales. Au final, le rendement calibré (resp. le score de teneur en protéines) entre un génotype « standard » avec une stratégie de fertilisation classique (1\_AC) et les génotypes optimisés pour une fertilisation azotée réduite variait de -2 à + 4 % (resp. +0 à + 12 %) suivant les groupes de départements considérés.

Nos résultats montrent qu'une production d'orge brassicole avec faible recours aux engrais azotés de synthèse semble possible sans détériorer les performances quantitative et qualitative des productions et en diminuant largement les pertes en azote environnementales. Il reste à vérifier ces propositions en conditions agricoles.

En conclusion, à l'instar des recherches qui ont abouti à la mise au point d'itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en blé, les travaux conduits dans ce travail permettent d'envisager une réduction des intrants tout en minimisant la perte de production quantitative et qualitative en orge brassicole, céréale qui couvre plus de 20 % de la sole céréalière en France.

## **2. Perspectives et futures recherches pour le développement des itinéraires avec recours réduits aux intrants**

### **2.1. Analyse d'autres critères de qualité technologique des orges brassicoles**

L'analyse des performances s'est concentrée dans notre travail, sur les critères de qualité teneur en protéine et calibrage. D'autres critères de qualité technologique pour la brasserie et la malterie (par ex : extrait, protéines solubles, friabilité,...) seront également indispensables à satisfaire dans des itinéraires techniques économes en intrants. Au sein du projet CasDar « Eco2malt », l'Institut Technique de la Brasserie et de la Malterie (IFBM) a réalisé des tests de micromaltage sur une partie des échantillons issus du réseau d'essai multilocal. Les résultats tendent à montrer qu'à teneur en protéine équivalente, l'itinéraire technique bas intrants n'a pas d'effet négatif sur les paramètres de qualité technologique du malt (*IFBM, comm pers*). La baisse de l'extrait de malt, fréquemment observée dans le système à bas niveau d'intrants est fortement liée à la baisse de teneur en protéines totales et à la baisse de protéines solubles dans le moût. De plus, les paramètres de viscosité et de pouvoir diastasique tendent à être impactés par le système de culture, mais restent non significativement différents entre les deux conduites. La baisse non significative du pouvoir diastasique pourrait également être expliquée par la plus faible teneur en protéines des échantillons issus du bas niveau d'intrant. A teneur en protéines équivalentes, une analyse de la qualité technologique des malts en haut niveau d'intrants pourrait donc suffire à prédire leur comportement en bas niveau d'intrants. Les investigations sur la modification de la protéolyse entre les deux conduites restent néanmoins à poursuivre (notamment en condition de pression maladie plus élevée). Ces résultats confirment l'importance de réussir à maintenir le taux de protéines dans les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants dans l'intervalle 9.5-11.5%.

### **2.2. Analyse des performances économiques**

Un frein significatif à l'adoption d'innovations techniques dans les exploitations agricoles est l'aversion aux risques économiques (*Couture et al., 2010 ; Marra et al., 2003*). Une analyse des performances économiques des itinéraires techniques avec recours réduit aux intrants en orge brassicole sera donc indispensable pour qu'ils puissent être adoptés par les agriculteurs, comme réalisé par *Loyce et al. (2012)* en blé sur la base de résultats expérimentaux. Cette analyse économique est cependant complexe à effectuer car elle doit prendre en compte le coût des charges variables et être réalisée pour différents scénarios de prix des matières premières, et de prix de vente des productions, étant donné l'instabilité de ces prix. Pour l'orge brassicole et depuis 2-3 ans, dès la mi-août, les orges hiver brassicoles perdent leur prime de marché, compte tenu des quantités importantes disponibles par rapport aux besoins des malteurs (*Axereal, comm pers*). Du point de vue de l'agriculteur, bien valoriser l'orge produite à bas niveau d'intrants en fourrager pourrait être un objectif secondaire important si les caractéristiques brassicoles ne sont pas respectées, ou l'écart

de valorisation entre orge fourragère et brassicole très faible. Pour le blé, il a été montré que les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants peuvent obtenir des marges nettes supérieures aux itinéraires techniques conventionnels, grâce à la réduction des charges des intrants, alors même que le rendement brut peut être légèrement plus faible (*Loyce et al., 2012*). Actuellement, la façon dont sont généralement évalués ces nouveaux modes de production (majoritairement par le rendement ou la productivité plutôt que par la marge économique) est considérée comme un facteur négatif pour l'adoption de ces techniques (*Ehler, 2006*). Dans une synthèse sur les publications de vulgarisation agricole sur le développement de pratiques agricoles plus durables, *Vanloqueren and Baret (2008)* analysaient que près de la moitié des résultats expérimentaux en céréales se focalisaient sur le rendement brut, et que moins de 10% font une analyse complète en intégrant le coût des intrants et différents scénarios de prix.

### **2.3. Peut-on s'attendre à une adoption des variétés et des itinéraires techniques économes en intrants en orge brassicole ?**

L'absence de recommandation technique pour ces types de systèmes peut freiner le développement et l'adoption de nouvelles techniques (*Meynard et al., 2013*). Par exemple, il a été démontré que la faible adoption des conduites à bas niveau d'intrants en maïs est en partie liée au faible accès à de l'information sur leur gestion technique, qui est elle-même très peu étudiée par la recherche en agronomie (*Meissle et al., 2010 ; Vasileiadis et al., 2013*). Développer de nouvelles connaissances sur les itinéraires techniques et les variétés adaptées aux conduites à bas niveau d'intrants en orge brassicole paraît donc indispensable pour pouvoir les recommander et les mettre en pratique sur le terrain. Cependant, même si les itinéraires techniques économes en intrants démontrent leur intérêt économique et environnemental, un risque de faible adoption de ces derniers n'est pas à exclure, comme dans le cas du blé (*Lamine, 2011 ; Vanloqueren and Baret, 2008*). Cette partie analyse ces facteurs de risques dans le cas de la filière brassicole.

*Lamine et al. (2008)* ont démontré, depuis les années 1960, la construction progressive d'une trajectoire sociotechnique impliquant progressivement l'ensemble des acteurs de la filière blé. Cette dépendance au chemin (ou «*path dependency*», *Cowan et Gunby, 1996*) empêche certains retours en arrière malgré les impasses qui peuvent la caractériser, ou le fait qu'elle empêche l'émergence de certaines innovations techniques, du fait de l'articulation étroite des différents éléments qui la composent. La filière orge brassicole est extrêmement structurée et les différents acteurs (de la création variétale, en passant par la production, le maltage jusqu'au brassage) sont étroitement liés. Des critères stricts de qualité des grains ont été définis par les besoins industriels et s'imposent à tous les acteurs en amont. Chaque année, un colloque sur les orges de brasserie est organisé par *Arvalis-institut du végétal* pour discuter des questions transversales impliquant les différents acteurs de la filière. Une modification des caractéristiques des grains entraînée par exemple par des

changements d'itinéraires techniques (calibrage ou teneur en protéines plus faibles,...) entraînerait des modifications nécessaires dans les processus de collecte, tri, malterie ou de brasserie qu'il est pour l'instant difficile d'évaluer précisément la faisabilité technique et les coûts, ce qui bloque actuellement certaines innovations en culture.

De plus, les critères d'évaluation variétale ne favorisent pas l'émergence de variétés adaptées aux conduites économes en intrants azoté. En effet, pour être inscrites, les variétés doivent dépasser ou égaler les performances des témoins sur un certain nombre de critères agronomiques (ex : teneur en protéines) et technologiques (ex : extrait). La plupart des réseaux d'évaluation variétale du CTPS, des sélectionneurs dont le premier objectif est d'inscrire leur variété au catalogue ou de post-inscription comportent une analyse des performances en situation traitée et non traitée contre les maladies. La résistance variétale aux maladies est devenue un critère déterminant pour l'évaluation variétale (*Maillard et al., 2016*). Il n'y a cependant aucune évaluation variétale pour la tolérance aux carences azotées. Les pratiques actuelles d'évaluation variétale créent donc une situation de blocage et peuvent empêcher l'identification et l'émergence de variétés particulièrement bien adaptées aux itinéraires techniques avec recours réduit à l'azote.

Dans la plupart des cas, l'organisation et la collecte des coopératives ne favorisent pas non plus l'émergence de systèmes de production alternatifs. En céréales, les capacités des silos et le nombre de cellules étant limités, les coopératives cherchent en effet à homogénéiser les variétés cultivées sur une même zone pour limiter les problèmes d'allotement (*Lamine, 2011*). En orge brassicole, le nombre de variétés recommandées au niveau national par la filière est limité. En effet, chaque année, seules quelques variétés (5 en orge d'hiver pour la récolte 2017) sont considérées comme « variétés préférées » pour la production brassicole par l'IFBM, les Brasseurs de France et les Malteurs de France. Au niveau local, seule une ou deux variétés sont collectées par les coopératives. Ainsi un agriculteur souhaitant produire de l'orge brassicole en bas niveau d'intrants sera certainement contraint d'utiliser des variétés identiques à ses voisins, probablement sélectionnées et adaptées pour les systèmes à haut niveau d'intrants. De plus, les conduites à bas niveau d'intrants en orge risquent, comme en blé, de butter sur une réticence des collecteurs qui craignent une réduction des volumes de collecte ou que l'homogénéité des lots affectent leur compétitivité économique (*Lamine et al., 2010*).

Un autre élément de blocage, commun aux différentes espèces, est lié à l'influence des entreprises phytopharmaceutiques et de production d'engrais dans le conseil agricole (*Meynard et al 2013*). *Butault et al. (2010)* signalaient également que la diffusion des variétés « rustiques », multirésistantes aux maladies, à la verse et productives est limitée par le verrouillage lié au conseil technique dominant. En orge, par exemple, différentes coopératives présentes lors du colloque orge

brassicole 2014, réclamaient de « *disposer sur orges de brasserie d'outils de pilotage, permettant de réajuster à la hausse la fertilisation azotée* ».

Finalement, les incertitudes techniques et l'absence d'information précise sur la rentabilité des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en orge brassicole peuvent freiner leur adoption par les agriculteurs. De plus, en cas d'information technique à disposition, la reconversion des itinéraires techniques des agriculteurs pourrait conduire à des pertes les premières années, quand l'agriculteur ne maîtrise pas encore totalement la conduite.

Pour sortir de cette situation de verrouillage sociotechnique, *Vanloqueren and Baret (2008)* ont montré que des forces extérieures aux seuls acteurs de la production sont nécessaires. Par exemple en verger de pommier, la modification des pratiques culturales vers une utilisation moins intensive d'intrants a nécessité une concertation et une implication, sur la durée, de l'ensemble de la chaîne agroalimentaire (*Collet and Mormont, 2003; Vanloqueren and Baret, 2004*). Les innovations pour la conception et la transition de systèmes agricoles plus durables nécessitent en effet que les innovations soient cohérentes et prennent en compte l'ensemble des acteurs de la filière. Pour être adoptées, les innovations devront intégrer des notions de génétique, de processus technologique, l'organisation des acteurs entre eux et des questions institutionnelles (*Meynard et al., 2016*). La persistance des acteurs de la recherche publique peut être primordiale pour le développement des filières de productions alternatives (*Bonneuil and Thomas, 2002*).

Une des voies possibles pour favoriser les innovations radicales est le développement de « niches d'innovation » en dehors du régime sociotechnique dominant (*Geels, 2002*). Ces niches sont caractérisées par des systèmes sociotechniques alternatifs, le plus souvent composées d'acteurs extérieurs (*Kemp et al., 1998*). Le fort accroissement du nombre des brasseries artisanales actuellement en Europe pourrait être une des voies envisageables pour permettre le développement de la production locale d'orge de brasserie en bas niveau d'intrants. Même si ces brasseries artisanales ne représentent qu'une petite part de la production nationale de bière, la production croît exponentiellement. Ce développement s'accompagne également d'un développement de malteries artisanales et d'une recherche de production locale d'orge. Le développement de filières plus durables semble en effet être encouragé par les consommateurs des bières artisanales qui sont à la recherche de produits hautement différenciés et ayant une image plus « durable » (*Aquilani et al., 2015*). Les travaux menés dans ce travail sur la caractérisation des principaux types de facteurs climatiques impactant le rendement et leur fréquence suivant les départements français (CHAPITRE 4), l'identification de caractéristiques de l'itinéraire technique et des génotypes adaptés localement à une réduction de l'utilisation des engrais azotés de synthèse (CHAPITRE 2 et 6) peuvent aider à définir ces filières de production locale.

### **3. Démarche mobilisée pour la conception d'idéotypes**

#### **3.1. La démarche de conception s'est construite au fur et à mesure des travaux de recherche**

Dans le domaine des sciences de la conception, deux types de démarches de conception très contrastés sont définis (*Le Masson et al. 2006*) : la conception innovante et la conception réglée. La conception innovante est un processus d'exploration visant à satisfaire des attentes complètement nouvelles sans fixation *a priori* des concepts et des connaissances à mobiliser. La conception réglée, au contraire, vise à améliorer des produits ou technologies existantes sans changer les objectifs de conception, ni l'identité des objets conçus. La démarche de recherche employée dans cette thèse a emprunté à ces deux archétypes. Cette combinaison de phases de conception réglée et innovante a déjà été observée pour des travaux en agronomie (par ex *Ravier 2017*).

Dans le cadre de cette thèse, le développement et l'utilisation d'un modèle de culture pour explorer des combinaisons inédites et originales de caractéristiques variétales relèvent plutôt d'une démarche de conception réglée. Ce travail avait été défini dès le début du projet de recherche, il est classiquement employé par les agronomes et généticiens (*Casadebaig et al., 2011 ; Jeuffroy et al., 2014*) et ne comporte pas vraiment de phase d'exploration. L'identification et la caractérisation expérimentale des traits génotypiques déterminants du bon comportement en situation culturale nouvelle (BNI dans notre étude) est une démarche classique. De même, les procédures pour adapter et utiliser le modèle pour cet objectif ont été depuis de nombreuses années travaillées et codifiées. L'originalité a résidé dans cette partie en l'application de cette méthode pour l'orge brassicole et l'analyse simultanée de plusieurs critères de qualité en plus du rendement, et dans l'exploration des caractéristiques susceptibles de favoriser la tolérance aux stress azotés.

De nouveaux objectifs pour la caractérisation des génotypes et des environnements de production ont été motivés par l'analyse des premiers résultats expérimentaux, lors des réunions techniques et des comités de pilotage du projet auxquels les partenaires de la filière participaient, ainsi que par une exploration des concepts et connaissances mobilisés. Ces phases relèvent davantage d'une conception innovante. Par exemple, l'étude sur la caractérisation et la classification des environnements de production de l'orge a émergé suite à la volonté de confirmer les résultats expérimentaux dans d'autres contextes pédoclimatiques de la zone de production d'orge brassicole en France, pour pleinement prendre en compte les IGEC, et au besoin de structurer l'analyse des résultats issus des simulations du modèle. Cette étude ne présente pas uniquement une originalité liée à son application à l'orge, mais également liée à la méthode employée : utilisation d'une régression des moindres carrés partiels (PLS), estimation de l'impact sur la production de plusieurs stress simultanément par régression PLS, analyse des regroupements de stress par site-année puis par zone géographique.

De même, la prise en compte de l'itinéraire technique dans la conception d'idéotypes est relativement novatrice. Les travaux sur blé rustique (Loyce *et al.*, 2008) avaient pointé l'importance de l'adaptation des caractéristiques variétales à l'itinéraire technique, et inversement. La démarche de conception d'idéotypes, formalisée par Debaeke *et al.* (2014), mentionnait l'itinéraire technique comme élément à prendre en compte, mais sans donner d'éléments méthodologiques précis pour la réaliser. Dans ce travail de thèse, les éléments de l'itinéraire technique, et plus particulièrement la fertilisation azotée, ont été au cœur de la démarche. Ce levier est en effet apparu primordial à prendre en compte suite au chapitre 1 et à la démonstration de la nécessité d'augmenter la teneur en protéines. Le travail a permis de définir des idéotypes culturels au même titre que des idéotypes variétaux. Face à l'explosion combinatoire des options de fertilisation azotée et d'idéotypes, nous avons choisi une démarche nouvelle pour travailler conjointement sur les idéotypes culturels et variétaux : la sélection de stratégies de fertilisation azotée d'abord, puis l'exploration d'idéotypes variétaux dans deux conduites azotées distinctes.

Enfin, par rapport à la démarche de conception d'idéotypes formalisée par Debaeke *et al.* (2014), les objectifs et contraintes de production n'ont pas été définis dans notre étude uniquement en amont du travail de conception et d'évaluation des idéotypes, mais de façon continue tout au long de la démarche. Par exemple, le rendement calibré comme variable d'intérêt à considérer est apparu à la fin du premier chapitre. À partir des CHAPITRES 5 et 6, nous avons intégré un autre critère dans l'analyse des performances variétales et de l'itinéraire technique : les pertes en azote environnementales. Ce critère est rarement directement pris en compte dans la conception d'idéotypes variétaux, y compris dans les études traitant du bas niveau d'intrants.

### **3.2. Critères de production pris en compte : approche multicritère**

Une des originalités de la conception d'idéotypes variétaux et culturels de notre travail est qu'il est basé sur une évaluation multicritère des performances des génotypes. Nous avons en effet pris en compte non seulement les critères de production quantitatifs (rendement, rendement calibré), mais également qualitatifs (teneur en protéines, calibrage) et environnementaux (perte en azote vers l'environnement). La plupart des travaux d'évaluation se basent sur une évaluation des performances quantitatives uniquement (par ex. Rötter *et al.*, 2015 ; Tao *et al.*, 2017). Nous avons centré les analyses réalisées à partir du CHAPITRE 2, sur un critère peu utilisé dans la littérature et dans les publications techniques : le rendement calibré. En effet c'est un critère important pour les agriculteurs car il détermine le prix payé pour les productions livrées. De plus, ce critère est un meilleur indicateur que le rendement pour identifier les variétés avec de fortes performances en bas niveau d'intrant à partir du haut niveau d'intrants. Le CHAPITRE 2 a montré que des traits génotypiques pouvaient être reliés aux performances variétales pour cette variable. Cette variable



est donc intéressante pour les sélectionneurs qui veulent améliorer les performances en azote réduit à partir d'essais menés en haut niveau d'azote.

La modélisation a permis d'estimer les performances des stratégies de fertilisation ou de génotypes virtuels sur plusieurs années. Nous avons ainsi eu la possibilité d'intégrer des analyses de risque pour les performances des stratégies de fertilisation azotée (CHAPITRE 5). En effet, les agriculteurs prennent généralement en compte le risque d'obtenir de mauvaises performances agronomiques dans leur décision pour appliquer ou non une nouvelle technique (*Picheny et al., 2017, Meynard 1998*). Dans ce travail, nous avons choisi d'analyser les performances des idéotypes sur i) la moyenne des simulations sur 25 ans, ii) la moyenne pour les 25% des années avec les plus faibles rendements et iii) les années où les conditions climatiques ne sont pas favorables à une valorisation de l'azote en début de cycle. Afin de présenter les solutions allant des plus risquées aux moins risquées, au lieu de réaliser des analyses distinctes sur des sous-ensembles de la base de données, nous aurions également pu intégrer un critère de risque directement dans l'analyse globale des solutions *Pareto* optimales (*Jakoby et al., 2014*). Notre démarche, cependant, permet à l'utilisateur des résultats d'évaluer plus précisément les niveaux de risques des différentes stratégies pour différentes conditions climatiques.

### **3.3. Combinaison entre approche expérimentale, modélisation et analyse de base de données pour définir des idéotypes**

Notre approche de conception d'idéotypes a mobilisé une diversité de sources d'information : données expérimentales, base de données nationale et modélisation.

La conception d'idéotypes est généralement majoritairement traitée par l'une ou l'autre de ces voies : par modèle (*Dingkuhn et al., 1991 ; Rötter et al., 2012 ; Tao et al., 2017*) ou par expérimentation (*Donald, 1979 ; Rasmusson, 1987*). Les deux approches sont cependant complémentaires et interdépendantes : par exemple *Semenov et Stratonovitch (2013)* utilisent des informations sur les caractéristiques variétales issues de mesures expérimentales pour définir les gammes de variation des paramètres variétaux à explorer par modélisation. D'autres auteurs le font par expertise (par ex *Tao et al., 2017*). La conception d'idéotypes, menée par l'IRRI, a combiné des étapes de conception et d'évaluation par des approches de modélisation et d'expérimentation (*Peng et al., 2008*). Ces auteurs détaillent la complémentarité et les ajustements et modifications apportées aux idéotypes à chacune des étapes de leur démarche. L'utilisation combinée de modèles et d'expérimentations paraît donc importante pour produire une démarche d'idéotypage à la fois réaliste et favorisant l'exploration. En effet, comme mentionné dans l'état de l'art, une des limites majeures de la conception d'idéotypes par modèle est l'absence de lien direct entre les paramètres du modèle et les caractéristiques morpho-physiologiques (ou génétiques) des plantes. Dans notre travail de thèse, la phase expérimentale a permis d'identifier des pistes pour les caractéristiques

génotypiques favorables à une production à bas niveau d'intrants. Le modèle a permis de valider ou d'infirmer ces pistes dans une diversité plus large de conditions pédoclimatiques. Le modèle a aussi été utilisé afin de tester de nouvelles hypothèses (ex. : influence de la capacité des plantes à maintenir leur activité photosynthétique après floraison). Ces nouvelles hypothèses n'ont pas fait l'objet d'une validation expérimentale, ni les nouvelles combinaisons des caractéristiques variétales identifiées comme favorables à la production d'orge brassicole. Une des solutions envisageables pour valider (au moins partiellement) les résultats du modèle serait de discuter les caractéristiques de l'itinéraire technique et des génotypes identifiées par modèle avec les acteurs impliqués dans le projet.

Dans ce projet, nous avons également eu recours à des bases de données nationales pour aider à la définition des idéotypes. La première utilisation (qui n'a pas abouti dans cette thèse, comme déjà mentionné plus haut) est l'analyse du lien entre caractéristiques variétales et perte de rendement lié aux pressions maladies. La seconde utilisation a été la caractérisation et la classification des environnements de production en orge d'hiver, basée sur l'analyse des rendements annuels départementaux à partir de données climatiques. L'analyse de ces bases de données fournit une information riche tout en réduisant l'effort expérimental et permet de proposer des conclusions sur des larges zones géographiques.

### **3.4. Analyse simultanée des idéotypes variétaux et cultureux dans une diversité de contextes pédoclimatiques**

Dans ce travail, nous avons analysé en parallèle, puis simultanément, les caractéristiques des stratégies de fertilisation azotée et les caractéristiques génotypiques. Les CHAPITRE 1 ET 2 ont en effet étudié les performances génotypiques dans un itinéraire technique avec intrants réduits. Le CHAPITRE 5 a étudié les caractéristiques de fertilisation azotée les plus favorables pour une variété donnée. Le CHAPITRE 6 analyse les caractéristiques variétales optimales dans deux conduites azotées repérées comme intéressantes dans le CHAPITRE 5, et l'intérêt d'une adaptation des caractéristiques variétale à la conduite azotée. L'importance de la prise en compte de cette interdépendance entre conduite azotée et variété a été largement démontrée par les différents travaux sur le blé rustique (*Loyce et al., 2008*), mais est rare dans la littérature. Dans la démarche de conception d'idéotypes, formalisée par *Debaeke et al. (2014)*, l'adaptation des itinéraires techniques est mentionnée comme un élément de contexte, mais ne participe pas à la phase de conception d'idéotypes. Par exemple, différentes études travaillent l'adaptation des caractéristiques variétales au changement climatique sans se préoccuper des changements d'itinéraires techniques souhaitables ou induits par le changement climatique (*Tao et al., 2017*). Ceci est potentiellement dû au fait que la notion d'idéotype a été formalisée par des généticiens, et ce n'est que dans un second temps que les agronomes se sont appropriés cette notion. Du fait de l'évolution de la recherche, les

travaux de ces différentes communautés scientifiques, de plus, étaient jusqu'à récemment assez indépendants.

Dans ce travail, nous avons analysé l'intérêt d'une adaptation locale des idéotypes variétaux et/ cultureaux par rapport à une adaptation globale. Le CHAPITRE 1 a montré que les performances variétales pouvaient être variables suivant les sites et les années. Les variations de performances suivant les environnements ont été plus précisément analysées *in silico* dans les CHAPITRES 5 ET 6, grâce aux simulations réalisées dans une plus large gamme de situations que celles explorées dans les expérimentations. Les résultats confirment que les idéotypes variétaux et cultureaux sont à adapter en fonction des environnements. Cependant, en plus de l'itinéraire technique, d'autres caractéristiques locales, du système de culture ou de l'exploitation peuvent impacter les performances des génotypes. Par exemple, les performances des variétés sont parfois très dépendantes des caractéristiques des systèmes de production de l'exploitation agricole dans laquelle elles sont insérées. Ainsi, une étude sur l'évaluation *ex ante* de différents types variétaux de pois d'hiver a montré que les performances variaient non seulement en fonction des conditions pédoclimatiques de culture, mais également en fonction des conditions de semis, elles-mêmes fonction de l'assolement et des ressources en matériel et en main-d'œuvre de l'exploitation (Jeuffroy *et al.*, 2012). Dans ce travail de thèse, nous n'avons pas analysé ces effets.

### 3.5. Classification des environnements de production

Nous avons caractérisé *a priori* les stress environnementaux impactant la production d'orge d'hiver dans la zone de production française, à partir d'une analyse de l'impact de ces stress sur les rendements moyens annuels départementaux. Elle a servi à structurer l'analyse des sorties du modèle pour identifier les stratégies de fertilisation azotée (CHAPITRE 4) et les caractéristiques variétales (CHAPITRE 5) adaptées à une production brassicole dans différentes régions de France. Cette caractérisation a été originale, car elle prend en compte les impacts des facteurs environnementaux sur la production. La plupart des études à large échelle ne prennent pas du tout en compte l'impact des caractéristiques pédo-climatiques sur la production (Braun *et al.*, 1996 ; Hernandez-Segundo *et al.*, 2009) ou le font à travers des indicateurs de stress calculés par modèle (Chenu *et al.*, 2013). Cette caractérisation n'a, cependant, pas pris en compte l'impact sur la production qualitative (teneur en protéine, calibrage). En effet, même si des méthodes statistiques existent pour prendre en compte l'effet de stress sur plusieurs variables de production simultanément, nous ne disposons pas de ces données observées à l'échelle du bassin de production.

Étant donné la diversité des types de stress impactant la production des céréales en France (voir notamment pour les stress climatiques, Gouache *et al.*, 2015 et Lecomte, 2005), et la difficulté de séparer leur impacts sur la production, nous avons choisi d'étudier l'impact des combinaisons de

stress sur le rendement. Les types de stress considérés n'ont cependant concerné que les variables climatiques. D'autres types de stress ou d'autres indicateurs de stress que ceux utilisés auraient pu être intégrés à l'analyse. Par exemple les stress hydriques (prenant en compte le type de sol) auraient pu être calculés à partir par exemple d'un indicateur estimé par modèle, comme l'ont effectué *Chenu et al. (2013)*. Cela pose cependant la question des données disponibles pour l'initialisation des bilans hydriques et des incertitudes associées aux estimations et l'impact fort de ces incertitudes sur les indicateurs calculés nous a conduit à préférer ne pas les prendre en compte. De même, l'impact des stress azotés aurait été difficile à prendre en compte, car fortement dépendant contenu en N minéral du sol en sortie hiver, de l'historique de gestion des résidus sur la parcelle ou des modalités précises de fertilisation azotée, type de données qui sont à notre connaissance non renseignée au niveau national. De même, nous n'avons pas directement intégré l'effet des pressions maladies dans la caractérisation des facteurs impactant le rendement de l'orge. *Zhang et al. (2006)* ont montré, cependant, que les profils de pression maladie sur blé étaient variables suivant les différentes régions en France. Dans une étude sur blé en France, réalisée par Arvalis-institut du végétal, le risque de pression maladie a été intégré à une classification des environnements de production<sup>17</sup>. Dans le cas de l'orge, cette intégration des pressions maladies pourrait se faire grâce à une analyse des essais variétaux pour l'inscription réalisée par le GEVES. Ces essais ne couvrent cependant pas toute la zone de production de l'orge brassicole et comme mentionné une analyse préliminaire de cette base de données n'a pas permis de relier facilement pression maladie et perte de rendement.

Nous avons choisi d'évaluer l'impact des facteurs climatiques par type d'environnement (combinaisons site X année) plutôt que par zone géographique (à l'instar de *Chapman et al., 2000 ; Chenu et al., 2013*). Nos résultats (CHAPITRE 4) confirment en effet, qu'une zone géographique est caractérisée par des combinaisons de stress très différentes suivant l'année, qu'une combinaison particulière de stress peut se produire sur des sites très éloignés géographiquement et/ou des années différentes. Comme proposé par *Hammer et al., 2014*, la caractérisation des stress par type d'environnements (combinaisons site X année) peut permettre d'identifier les caractéristiques variétales adaptées à des combinaisons de stress cibles plutôt qu'à des zones géographiques cibles. Ce type de travail permettrait de préconiser des profils variétaux complémentaires aux agriculteurs, suivant la fréquence des stress sur leur exploitation (*Hammer et al., 2014*).

---

<sup>17</sup> [http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/kiosque/arvalis-info/2014juin/aci\\_cereales\\_colza\\_varietes\\_juin\\_2014\\_ouest.pdf](http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/kiosque/arvalis-info/2014juin/aci_cereales_colza_varietes_juin_2014_ouest.pdf)

### 3.6. Démarche de modélisation

#### 3.6.1 Pourquoi développer un modèle de culture pour l'orge brassicole ?

Comme mentionné dans l'état de l'art, une évaluation expérimentale précise des performances variétales nécessite généralement d'être effectuée sur plusieurs années et plusieurs sites pour couvrir des conditions climatiques variées, et peut donc être onéreuse. De même, la gamme des caractéristiques variétales testées reste souvent restreinte (*Asseng et al., 2002 ; Hammer et al., 1989 ; Jeuffroy et al., 2006 ; Smith et Gooding, 1999*). Les modèles de culture permettent une évaluation rapide d'un plus grand nombre de géotypes virtuels dans des situations pédoclimatiques souvent plus contrastées. Ils permettent également de tester de nouvelles combinaisons de caractères variétaux non testées expérimentalement (par ex. : *Rötter et al., 2012*).

Des modèles de culture existent pour l'orge incluant des paramètres génotypiques et intégrant l'effet de limitation de la nutrition azotée sur la production (voir par ex. synthèse des performances de ce type de modèles dans *Salo et al., 2016*). Cependant, ces modèles n'incluaient pas une prédiction du calibrage et n'étaient pas adaptés pour de l'orge d'hiver 6 rangs.

À partir d'un modèle blé existant, nous avons choisi de développer et d'évaluer un modèle spécifiquement adapté à l'idéotypage variétal et cultural pour l'orge d'hiver 6 rangs brassicole. Cette démarche se rapproche de celle recommandée par *Sinclair and Seligman, (1996)* qui conseillaient de développer des outils spécifiques aux questions posées.

Développer son propre modèle de culture permet d'orienter son développement et son évaluation vers un objectif précis, et de maîtriser son contenu afin de pouvoir interpréter les interactions dont il rend compte. *Prost et al. (2012)* ont montré que près de 90% des articles scientifiques décrivant des modèles se fixaient comme premier objectif d'améliorer ou de synthétiser les connaissances du fonctionnement des cultures, plutôt que d'être utilisés comme support pour l'action.

Notre objectif était de développer un outil pour la conception et l'évaluation d'idéotypes variétaux en orge brassicole. Azodyn-Barley est un modèle relativement simple (faible nombre de paramètres et d'entrées nécessaires), ce qui permet d'éviter de multiplier les incertitudes sur les valeurs des paramètres, des données d'entrées et les formalismes nécessaires au fonctionnement du modèle. Certains auteurs ont, en effet, démontré qu'il était important de faire correspondre les données d'entrée nécessaires au modèle avec leur disponibilité, leur facilité et précision de mesure sur le terrain (*Brooks et al., 2001*). Dans ce travail, nous n'avons pas uniquement évalué la capacité du modèle à prédire précisément les valeurs des variables, comme fréquemment effectué (*Asseng et al., 2002 ; Rötter et al., 2012*), mais également analysé sa qualité pour classer les variétés, critère selon nous essentiel pour de l'idéotypage. En effet, l'objectif de l'évaluation des modèles est de déterminer l'intérêt de l'outil par rapport à l'utilisation envisagée (*Wallach, 2006*). Ainsi, en plus de

l'évaluation classique des erreurs de prédiction, certains auteurs suggèrent d'évaluer la capacité du modèle à fournir une information pertinente aux utilisateurs (Jeuffroy *et al.*, 2014). Évaluer la capacité du modèle à prédire précisément et à classer les variables de chaque module est indispensable pour s'assurer que la performance globale du modèle ne provient pas de compensation entre les erreurs individuelles de chaque sous-module (Sinclair and Seligman, 1996). Nous avons évalué 14 variables tout au long du cycle de production pour s'assurer de la pertinence du modèle pour l'ensemble des variables de fonctionnement déterminantes et des composantes du rendement.

Enfin, comme mentionné par Affholder *et al.* (2012), concevoir son propre modèle de culture permet de maîtriser l'ensemble des formalismes inclus dans ce dernier, mais nécessite d'acquérir des compétences en programmation informatique. Le modèle Azodyn-blé qui a servi de base au développement du modèle orge brassicole a été conçu dans l'unité et une expertise locale était à disposition.

Le développement de son propre modèle de culture, cependant, prend du temps pour coder, calibrer, valider le modèle aux dépens (pour un projet d'une durée limitée) de l'analyse et de l'interprétation des résultats.

### 3.6.2 *Qualités et limites de l'outil développé pour l'idéotypage*

Nous faisons l'hypothèse qu'avec une bonne qualité prédictive et notamment une bonne capacité à classer les variétés sur une base de données expérimentale, les paramètres variétaux et les formalismes pris en compte par le modèle sont suffisants pour décrire le comportement des variétés actuelles et futures. Il est cependant nécessaire de s'assurer que les paramètres génotypiques du modèle aient une réelle signification biologique et, dans le cas de l'idéotypage, puissent être facilement mesurables sur le terrain (Semenov & Stratonovitch, 2013; Casadebaig *et al.*, 2016). Dans le CHAPITRE 4, les paramètres génotypiques ont été mesurés directement sur les expérimentations (Rendement et poids de mille grains maximum, précocité) ou sont issus d'un simple modèle de régression sur des données observées (pour les paramètres alpha NG, alphaCali). De plus, nous nous sommes également assurés, par analyse de sensibilité (CHAPITRE 6), que les paramètres génotypiques potentiellement intéressants à étudier pour différencier les variétés avaient effectivement un impact sur les variables de sorties du modèle. Azodyn-Barley, cependant, n'inclut qu'une petite part de la variabilité génotypique présente *in vivo*. Par exemple, les mécanismes spécifiques ou génotypiques de tolérance aux pressions maladies, à la verse, au gel hivernal, au stress hydrique, n'ont pas été intégrés dans le modèle.

La qualité de prédiction et de classement du modèle Azodyn-Orge est largement dépendante des variables modélisées. Par exemple, le modèle est peu performant pour classer les variétés sur leur teneur en protéines. Pour cette variable, la moyenne des classements observés des génotypes, sur la

base de calibration, fournit un meilleur indicateur qu'Azodyn des classements variétaux sur la base de validation. Cela suggère qu'un effet génotypique relativement stable est présent et déterminant de la teneur en protéines des variétés, mais n'a pas été pris en compte dans le modèle. Les erreurs de prédiction de la teneur en protéines sont cependant du même ordre de grandeur que celles calculées sur d'autres modèles (*Barbottin et al., 2006 ; Houllès et al., 2004 ; Meinke et al., 1998*) et montrent qu'une forte qualité prédictive et notamment pour le classement des variétés difficile à obtenir pour cette variable. *Smith et Goodlin (1999)* expliquent cela par la forte sensibilité des mécanismes de transfert de l'azote dans les grains au climat. L'intérêt du modèle Azodyn pour classer les variétés réelles ou virtuelles pour cette variable est donc limité. Dans le cas de l'idéotypage, nous avons évalué la capacité des génotypes à avoir une teneur en protéine comprise entre 9.5 et 11.5%. La capacité de classement des génotypes n'est donc pas limitante pour ce type d'évaluation. Par contre, la sensibilité du modèle à prédire cette variable sans biais est primordiale.

Plus globalement, peu de démarches de conception d'idéotypes *in silico* ont directement abouti à la mise sur le marché de nouvelles variétés. L'exemple le plus connu de conception « aboutie » d'idéotypes est celui mené sur les riz hautement productifs. Des travaux de modélisation (*Dingkuhn et al., 1991*) intégrés dans une démarche de conception-évaluation (*Khush, 1995 ; Peng et al., 1994*) ont permis la production sur le terrain de variétés de riz avec de forts rendements (*Peng et al., 2008*). Cette démarche a été menée sur plusieurs dizaines d'années. Le plus souvent, il est difficile de savoir si les résultats des études menées par les scientifiques sur l'idéotypage par modèle sont utilisés par les sélectionneurs. Ceci peut en partie être dû, comme mentionné précédemment, à la faible adéquation entre les modèles de culture et les besoins des sélectionneurs et à la durée des projets de recherche ou de recherche-développement généralement assez courts. Selon différents auteurs (p. ex., *Shorter et al., 1991 ; Tardieu et al., 2003 ; Boote et al., 2013 ; Andrivon et al., 2013*), un effort collaboratif entre généticiens, physiologistes, informaticiens et sélectionneurs serait également un moyen d'améliorer l'adéquation de la modélisation des cultures aux besoins de la sélection variétale.

### 3.6.3 Analyse et interprétation des sorties du modèle pour l'idéotypage

Nous avons basé l'évaluation des idéotypes variétaux et culturels sur plusieurs critères. L'analyse multicritère est cependant complexe à réaliser. Pour éviter les difficultés de pondération des différents critères de production en fonction des préférences des acteurs, nous n'avons pas agrégé les différents critères entre eux. Les résultats des évaluations multicritères, basés sur des agrégations des critères, sont en effet très sensibles aux pondérations initialement choisies (*Konak et al., 2006*). L'identification de stratégies retenues a été réalisée par l'identification des optimums de *Pareto*. Cette méthode permet de définir l'ensemble des stratégies pour lesquelles il n'existe pas

d'autres stratégies qui soient meilleures pour l'ensemble des critères analysés. L'efficacité de cette méthode a été démontrée pour identifier des stratégies intéressantes en prenant en compte des critères antagonistes (*deVoil et al., 2006*). De plus, la méthode permet de présenter l'ensemble des solutions optimales et ainsi de laisser le choix à l'utilisateur de repérer les stratégies qui lui conviennent le mieux en fonction de ses préférences. La méthode rend par contre difficile l'analyse précise des caractéristiques des stratégies retenues dans le Front de *Pareto*. Ces dernières sont (*par définition*) diverses vis-à-vis des combinaisons des objectifs analysés et parmi un ensemble de stratégies ayant des performances similaires, seule la meilleure sera retenue. Dans le cadre de la modélisation des performances par des combinaisons de caractéristiques génotypiques, cela peut amener, comme observé dans le CHAPITRE 6, à une très grande diversité des combinaisons des caractéristiques génotypiques retenues dans le Font de *Pareto*. Cette diversité des performances complexifie l'analyse de ces dernières.

De plus, dans un objectif de sélection, il pourrait également être intéressant non seulement d'étudier les stratégies optimales, mais également la sensibilité des performances vis-à-vis d'une petite modification des caractéristiques initiales des stratégies. Pour le CHAPITRE 6, nous aurions pu, en effet analyser la stabilité des performances des génotypes si l'un des caractères s'éloignait un peu de la valeur permettant au génotype d'être sur le front de *Pareto*.

Enfin, d'autres méthodes permettant de trier et d'identifier les génotypes intéressants existent et auraient pu être utilisées dans notre cas. Parmi ces dernières, les méthodes de surclassement de synthèse (*Roy, 1985*), permettent des comparaisons par paires des alternatives sur chaque critère, d'agréger les comparaisons et d'obtenir des notes pour chacune des alternatives possible. Contrairement à la méthode utilisée où nous avons analysé précisément les caractéristiques génotypiques pour une petite proportion des génotypes (ceux sur le front de *Pareto*), la méthode du surclassement de synthèse aurait pu permettre d'intégrer l'ensemble des génotypes pour l'analyse de leurs caractéristiques. Ainsi, plutôt que d'identifier des combinaisons particulières favorables à nos objectifs, cela aurait pu permettre d'identifier des tendances globales (ex : une caractéristique favorise plus ou moins l'obtention d'un score élevé).

### 3.6.4 Nouveaux formalismes intégrés au modèle de culture Azodyn

L'adaptation du modèle blé à l'orge et l'intégration de ce dernier à la plateforme de modélisation RECORD (*Bergez et al., 2013*) ont été l'occasion de questionner les formalismes inclus dans le modèle.

Nous avons développé un nouveau module de valorisation des engrais minéraux et intégré ce dernier aux modèles Azodyn développés sur d'autres espèces. Sur les bases de validation du modèle en blé à disposition, ce nouveau formalisme permettait en effet d'améliorer la qualité prédictive des variables rendement et teneur en protéines. Le nouveau sous-module distingue les



formes d'engrais azoté minérales apportées : engrais sous forme ammoniacale ou nitrate. Le précédent formalisme intégrait les connaissances issues de *Limaux et al. (1999)* pour la valorisation de l'azote, qui ne tenaient pas compte de cette forme. Ces équations ont cependant été basées sur des expérimentations effectuées en condition de valorisation optimale (humidité importante) de l'azote apporté. De nombreuses études ont montré que les pertes ammoniacales lors de l'apport d'engrais en conditions d'humidité non optimale peuvent être importantes (par exemple *Le cadre, 2004*). Nous avons choisi d'intégrer un coefficient de perte de l'azote ammoniacal pendant 3 jours maximum (d'après les travaux de *Genermont Cellier., 1997* et *Sherlock et Goh ; 1984*), si les conditions de valorisation de l'azote par la plante ne sont pas remplies. Les conditions de valorisation sont considérées optimales lorsque le seuil de 10 mm de pluie est atteint après apport (*Holcomb et al., 2011*) ou lorsque l'humidité du sol est suffisante le jour de l'apport pour sa valorisation (*Campbell et al., 1995, Powlson et al., 1992*)

Deux autres évolutions majeures du modèle de culture ont été effectuées. La minéralisation des résidus de récolte est désormais calculée de façon mécaniste en s'appuyant sur les travaux de *Nicolardot et al. (2001)*. Le module de bilan hydrique a également été totalement revu. Il s'agit désormais d'un modèle de flux basé sur un sol divisé en trois horizons.

L'ensemble de ces modifications a été important dans les travaux présentés, et en particulier pour étudier les stratégies de fertilisation azotée (CHAPITRE 4).

### *3.6.5 Intégration du modèle de culture au sein d'une plateforme de modélisation*

Au cours de cette thèse, les modèles de culture Azodyn (blé, orge et pois) ont été intégrés à la plateforme de modélisation RECORD (*Bergez et al., 2013*). Cette intégration a présenté un important investissement en temps, mais procure de nombreux avantages pour faciliter l'analyse des résultats, l'évolution et la pérennité du modèle.

Intégrer les modèles Azodyn à RECORD a permis de modulariser ce dernier. *Jones et al. (2016)*, dans leur synthèse sur l'utilisation des modèles en agriculture, proposaient, parmi les voies d'amélioration pour les prochaines générations de modèles, le développement des modèles structurés en sous-modules. La modélisation modulaire permet de répondre à des questions spécifiques. Cette structuration modulaire permet aussi de partager des modules entre différents modèles de culture. C'est le cas, par exemple, des modules sol et hydrique entre les modèles Azodyn orge, blé et pois. Selon *Jones et al. (2016)*, la modularité des modèles est importante pour permettre le progrès scientifique ainsi que la longévité et la maintenabilité du modèle.

La plateforme de modélisation RECORD offre également un système de gestion des versions. Cet outil permet une traçabilité des modifications apportées à chacun des modules. Par exemple, *Casadebaig (2008)* estimait que pour avoir une vision claire de la performance des hypothèses

testées, de nombreuses combinaisons « *version générale du modèle de culture x hypothèses x paramétrages du modèle général* » doivent être évaluées. La gestion des versions permise par la plateforme permet de faciliter ce type d'analyse.

La plateforme de modélisation RECORD permet également de disposer de nombreux outils d'analyse des performances et des résultats de simulation des modèles. Par exemple, les analyses de sensibilité du modèle (CHAPITRE 6) sont très largement facilitées par rapport à l'utilisation du modèle sous la forme de versions Excel. De même, l'accès à des serveurs permet de simuler un nombre très élevé de combinaisons de caractéristiques variétales ou de l'itinéraire technique. Dans le cadre de cette thèse, le CHAPITRE 5 s'est basé sur plus de 40 000 simulations et le chapitre 6 sur plus d'un million.

La plateforme de modélisation RECORD, cependant, rend l'accès au modèle plus difficile pour les utilisateurs potentiels des modèles (sélectionneurs par exemple), car elle nécessite d'installer et d'utiliser des outils spécifiques. Cela pourrait limiter l'utilisation des modèles inclus dans cette plateforme pour une utilisation pour l'action.

Un des problèmes majeurs pour la pérennité des modèles est que, à quelques exceptions près, les données collectées pour la calibration et la validation sont perdues ou difficiles à réutiliser une fois les articles publiés ou les contrats de recherches terminés (*Jones et al., 2016*). Une standardisation des bases de données, un référencement et une mise en libre accès des données expérimentales permettraient de résoudre ces difficultés, mais sont très coûteux en temps et ne sont donc que rarement pratiqués car il y a souvent séparation entre les personnes qui font ce référencement et cette standardisation, et les utilisateurs de ces bases. Des collaborations internationales comme le Global Open Data for Agriculture and Nutrition initiative (GODAN) encouragent la création de bases de données en libre accès. Concernant les modèles de culture Azodyn, différents types d'actions ont été menées en ce sens. Pour chacune des espèces, un début de structuration et d'intégration de bases de données expérimentales sous la plateforme RECORD a été effectué. Ce travail permet aux futurs modélisateurs utilisant Azodyn de disposer rapidement d'une base de données de calibration et de validation. Le modèle Azodyn est un modèle librement accessible (et non payant), une installation des outils de modélisation de RECORD est néanmoins nécessaire. Finalement, un effort de transparence a été effectué pour justifier et référencer les choix méthodologiques, les formalismes et les équations des modèles Azodyn. Un document récapitulant une description détaillée des sous-modules, des équations, paramètres et sources bibliographiques utilisées a été créé. Ce document est en cours de finalisation pour l'orge, le blé, le pois, et devra être complété pour le colza. Il sera intégré à la plateforme RECORD.

### 3.6.6 *Futurs développements possibles du modèle Azodyn*

La création variétale prend du temps. La conception d'idéotypes doit donc tenir compte des évolutions climatiques à moyen et long terme pour proposer des caractéristiques variétales et culturelles adaptées à ces nouveaux contextes de production. La conception d'idéotypes adaptés au contexte de changement climatique occupe une place de plus en plus importante dans la littérature (par ex : Rötter *et al.*, 2015 ; Semenov *et al.*, 2014). Actuellement, le modèle de culture Azodyn n'intègre pas de formalismes spécifiques permettant d'étudier l'impact du changement climatique sur la production (évolution du CO<sub>2</sub>,...). Des travaux préliminaires ont débuté, mais méritent d'être complétés, pour intégrer notamment un effet de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur les variables de production dans Azodyn. Des travaux (par ex Van Oijen *et al.*, 2004) et des exemples d'intégration de ces formalismes au sein de modèles (Mitchell *et al.*, 1995) servent de base à ce nouveau développement d'Azodyn.

Comme déjà mentionné dans cette discussion, l'intégration d'un module prenant en compte l'impact des maladies sur la production serait également intéressante à développer. Cela permettrait, par exemple, de proposer des idéotypes adaptés aux objectifs nationaux de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires.

### 3.6.7 *Évolution des méthodes d'idéotypage in silico*

Dans ce travail, la conception des idéotypes a été basée sur les résultats d'un modèle mécaniste intégrant des paramètres génotypiques représentant des caractéristiques variétales facilement mesurables sur le terrain. Différentes approches sont développées pour permettre l'idéotypage par modèle de culture. Par exemple, de nombreuses études visant à identifier les caractéristiques variétales adaptées à des contextes de production particuliers se basent sur des ensembles de modèles (par ex. Rötter *et al.*, 2012 ; Semenov et Stratonovitch, 2010 ; Tao *et al.*, 2017). En effet, il a été montré sur différentes espèces et conditions pédoclimatiques, que la moyenne ou la médiane des simulations d'un ensemble de modèles de culture produit des prédictions plus proches des observations que les meilleurs modèles individuels (Hagedorn *et al.* 2005 ; Martre *et al.* 2015). Les possibles biais dus à la structure des modèles individuels ou à une mauvaise calibration sont minimisés en utilisant des ensembles de modèles, qui sont généralement calibrés et évalués sur des bases de données plus larges (Martre *et al.*, 2015 ; Wallach *et al.*, 2016). Pour le modèle de culture Azodyn, il a été démontré que des petites variations dans les formalismes des modules peuvent fortement impacter les sorties du modèle (David et Jeuffroy, 2009). Cependant, les ensembles de modèles ne sont pas toujours à même de corriger les erreurs et biais systématiques de simulation (Tao *et al.*, 2017). Dans le cas de l'orge brassicole d'hiver 6 rangs, nous ne disposons que d'un seul modèle simulant l'ensemble des variables d'intérêt. De plus, les approches de modélisation utilisant

un ensemble de modèles sont complexes à mettre en place, car nécessitent des compétences spécifiques sur l'ensemble des modèles.

Une autre voie de développement des recherches sur l'idéotypage basée sur l'utilisation de modèles de culture est d'intégrer explicitement les caractéristiques génétiques (ex : QTL) dans les formalismes des modèles. Les effets des gènes ou des QTL sont alors associés aux paramètres du modèle, et les génotypes sont définis par un ensemble de paramètres caractérisés par leur combinaison allélique (Rötter *et al.*, 2015). Ce type de modèle a déjà été utilisé pour étudier des traits tels que le phyllochrone, le rythme de développement des plantes, la vigueur précoce, l'absorption d'azote ou le développement des fruits (Yin *et al.*, 2005 ; Messina *et al.*, 2006, Quillot *et al.*, 2005, Laperche *et al.*, 2006). Cependant, l'intégration de caractéristiques génétiques dans les modèles de culture pour prédire les traits plus complexes et intégratifs (Rendement, critère de qualité) reste encore peu développée (Martre *et al.*, 2015).

Les méta-modèles constituent également une voie potentiellement intéressante à explorer pour l'idéotypage variétal et cultural. Cette approche totalement différente de la précédente, vise à simplifier les modèles mécanistes en identifiant les formalismes et paramètres impactant peu les sorties et en les simplifiant. Ces méta-modèles peuvent ainsi être très utiles en rendant des modèles mécanistes complexes plus facilement utilisables (Colbach, 2010) et peuvent être utiles pour la conception et l'évaluation d'itinéraires techniques ou de systèmes de culture (Hossard *et al.*, 2015). En effet, différentes études ont montré que des modèles de culture simples prédisent le rendement de façon aussi précise que des modèles plus complexes (Jamieson *et al.*, 1998). Par exemple, le modèle de culture Sirius (Jamieson *et al.*, 1998) requiert des données d'entrées climatiques quotidiennes, des caractéristiques de sols et d'itinéraire technique à haute résolution spatiale pour être utilisé à de larges échelles. Ces informations sont souvent inaccessibles ou imprécises et ont conduit Brooks *et al.* (2001) à développer un méta-modèle pour Sirius permettant de se baser sur des données climatiques moyennées mensuellement et un bilan hydrique simplifié demandant moins de données d'entrée. Ces auteurs démontrent que le méta-modèle simule correctement le rendement du blé en condition potentielle et en situation de stress hydrique pour deux sites expérimentaux (Rothamsted et Edinburgh). Pour le modèle Azodyn, nous avons démontré dans une précédente étude (non publiée), que la structure du modèle Azodyn peut être largement simplifiée sans impacter la qualité prédictive du rendement, et cela d'autant plus si le modèle est utilisé avec de l'assimilation de données.

#### **4. Suite de la démarche d'idéotypage en orge brassicole**

Globalement, une des critiques importantes des travaux de recherche pourrait être leur inefficacité à produire et transférer des connaissances appliquées sur le terrain. Un des moyens proposés pour pallier cette difficulté est d'impliquer très précocement les acteurs dans les démarches d'innovation et/ou de conception (*Marttunen and Suomalainen, 2005 ; Etienne et al., 2008 ; Nordstrom et al., 2010*). En effet, l'implication des futurs utilisateurs dans les processus précoces de conception favorise l'adoption de l'innovation (*Cerf et Meynard 2006, Cerf et al., 2012*). Dans le cadre de notre travail, divers représentants de la filière étaient représentés (sélectionneurs, institut technique), et nous avons eu plusieurs échanges avec des coopératives. Ces échanges ont fortement structuré le travail. La thèse s'insérait de plus, dans un projet plus global. D'autres aspects de la réduction des intrants sur la production et la qualité brassicole ont été analysés (notamment la qualité « technologique » des grains).

Cependant, une des principales limites identifiées pour la démarche de conception d'idéotypes utilisée pendant la thèse est l'absence d'implication des utilisateurs finaux des idéotypes variétaux et culturels développés (les agriculteurs). Dans le cadre de la conception d'idéotypes, différents projets se basent sur des types d'approche plus participatives (Wheatamix pour concevoir des mélanges variétaux par exemple ou des approches de sélection participative).

Au final, les résultats expérimentaux et de simulation ont montré, à l'instar des recherches qui ont abouti à la mise au point d'itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en blé, qu'une production d'orge brassicole avec recours aux intrants réduits semble possible. Il serait intéressant, maintenant que les résultats expérimentaux, de simulation et des autres partenaires aient été produits, de les discuter plus amplement avec l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet et d'autres acteurs intéressés (dont les agriculteurs) pour pouvoir envisager de développer concrètement ce type de production.



## Conclusion Générale

La France est l'un des premiers producteurs européens d'orge brassicole (*Hordeum vulgare L.*) et le premier exportateur mondial de malt. La production d'orge brassicole repose actuellement sur une utilisation massive d'intrants de synthèse et entraîne comme d'autres grandes cultures des impacts négatifs sur l'environnement et la santé des consommateurs.

Nous montrons dans ce travail, qu'avec des variétés actuelles (et sélectionnées en haut niveau d'intrants) et avec un itinéraire technique non-optimisé, les performances quantitatives et qualitatives des variétés sont très largement inférieures en bas niveau d'intrants par rapport aux conduites techniques avec recours intensif en intrant. Cependant, des marges de progrès importantes existent aussi bien au niveau variétal que de l'itinéraire technique. Nous avons identifié, pour différentes régions de France, des stratégies de fertilisation azotée innovantes permettant d'atteindre les meilleurs compromis entre production quantitative et qualitative, tout en minimisant les pertes en azote vers l'environnement. Nous avons également identifié des caractéristiques variétales favorables à une faible perte de teneur en protéines et de rendement calibré en situation de stress azoté. Enfin, de nouvelles combinaisons de caractéristiques variétales permettant d'optimiser la production d'orge dans des situations d'intrants réduits ont été identifiées. Au final, nous montrons *in silico*, qu'adapter simultanément les caractéristiques variétales et de l'itinéraire technique permet d'atteindre des performances comparables aux variétés actuelles dans des itinéraires techniques avec recours intensif aux intrants.

D'autres aspects de la réduction des intrants sur la production et la qualité brassicole (notamment la qualité « technologique des grains » pour le maltage et le brassage) sont actuellement en cours d'analyse par les partenaires du projet dans lequel s'inscrit cette thèse. Les résultats préliminaires sont prometteurs, mais nécessitent d'être confirmés. Afin d'envisager de développer concrètement des modes de production avec intrant réduits en orge, il serait intéressant de poursuivre la démarche en incluant les agriculteurs pour confirmer et adapter localement les recommandations techniques et continuer les échanges avec les sélectionneurs pour développer des variétés parfaitement adaptées au bas niveau d'intrants.





## References

- Abbo, S., van-Oss, R.P., Gopher, A., Saranga, Y., Ofner, I., Peleg, Z., 2014. Plant domestication versus crop evolution: a conceptual framework for cereals and grain legumes. *Trends Plant Sci.* 19, 351–360.
- Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A., 2003. Genetic improvement of barley yield potential and its physiological determinants in Argentina (1944–1998). *Euphytica* 130, 325–334. doi:10.1023/A:1023089421426
- AB-Inbev, 2014. Growing a Sustainable Future with SmartBarley.
- Addiscott, T., Whitmore, A., 1991. Simulation of solute leaching in soils of differing permeabilities. *Soil Use Manag.* 7, 94–102.
- Affholder, F., Tittonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad hoc modeling in agronomy: what have we learned in the last 15 years? *Agron. J.* 104, 735–748.
- Aggarwal et al., 1997; Paleari et al., 2017; Quilot-Turion et al., 2012) Aggarwal, P.K., Kropff, M.J., Cassman, K.G., ten Berge, H.F.M., 1997. Simulating genotypic strategies for increasing rice yield potential in irrigated, tropical environments. *Field Crops Res.* 51, 5–17. doi:10.1016/S0378-4290(96)01044-1
- Agogué, M., Arnoux, F., Brown, I., Hooge, S., 2013. Introduction à la Conception Innovante: éléments théoriques et pratiques de la théorie CK. Presses des MINES.
- Agogué, M., Hooge, S., Arnoux, F., Brown, I., others, 2014. An introduction to innovative design- Elements and applications of CK theory.
- Agreste, 2014. La fertilisation. Doss. 27–47.
- Agreste, 2013. Enquête Pratiques culturales 2011 Les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures Indicateurs de fréquence de traitement 39.
- Agreste, 2017. <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>. accédé le 08/08/2017
- Agriculture and Agri-Food Canada, 2016. Nitrogen Indicator.
- Ahlemeyer, J., Friedt, W., 2011. Progress in winter wheat yield in Germany - what's the share of the genetic gain? *Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein*, pp. 19–24.
- Alzueta, I., Abeledo, L.G., Mignone, C.M., Miralles, D.J., 2012. Differences between wheat and barley in leaf and tillering coordination under contrasting nitrogen and sulfur conditions. *Eur. J. Agron.* 41, 92–102. doi:10.1016/j.eja.2012.04.002
- Andrivo, D., Giorgetti, C., Baranger, A., Calonnec, A., Cartolaro, P., Faivre, R., Guyader, S., Lauri, P.E., Lescourret, F., Parisi, L., Ney, B., Tivoli, B., Sache, I., 2013. Defining and designing plant architectural ideotypes to control epidemics? *Eur. J. Plant Pathol.* 135, 611–617. doi:10.1007/s10658-012-0126-y
- ANSES, 2016. Expositions professionnelles aux pesticides en agriculture.
- Aquilani, B., Laureti, T., Poponi, S., Secondi, L., 2015. Beer choice and consumption determinants when craft beers are tasted: An exploratory study of consumer preferences. *Food Qual. Prefer.* 41, 214–224. doi:10.1016/j.foodqual.2014.12.005
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Royo, C., Serret, M.D., 2008. Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 27, 377–412. doi:10.1080/07352680802467736
- Asseng, S., Milroy, S.P., Poole, M.L., 2008. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment. *Field Crops Res.* 105, 97–106. doi:10.1016/j.fcr.2007.08.003
- Asseng, S., Turner, N.C., Ray, J.D., Keating, B.A., 2002. A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. *Eur. J. Agron.* 17, 123–141. doi:10.1016/S1161-0301(01)00149-6

- Atlin, G.N., Frey, K.J., 1990. Selecting oat lines for yield in low-productivity environments. *Crop Sci.* 30, 556–561.
- Aubertot, J.-N., 2005. Pesticides, agriculture et environnement: réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. INRA et Cemagref, France.
- Austin, R.B., 1999. Yield of Wheat in the United Kingdom. *Crop Sci.* 39, 1604. doi:10.2135/cropsci1999.3961604x
- Austin, R.B., 1988. A different ideotype for each environment?
- Baik, B.-K., Ullrich, S.E., 2008. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *J. Cereal Sci.* 48, 233–242. doi:10.1016/j.jcs.2008.02.002
- Bamforth, C.W., Barclay, A.H.P., MacGregor, A.W., Batey, R.S., 1993. Barley: chemistry and technology. *AACC Lanc.* 297–354.
- Bänziger, M., Betrán, F.J., Lafitte, H.R., 1997. Efficiency of high-nitrogen selection environments for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37, 1103–1109.
- Bänziger, M., Setimela, P.S., Hodson, D., Vivek, B., 2006. Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to southern Africa. *Agric. Water Manag.* 80, 212–224.
- Barbottin, A., 2004. Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des géotypes: Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. INAPG (AgroParisTech).
- Barbottin, A., Le Bail, M., Jeuffroy, M.H., 2006. The Azodyn crop model as a decision support tool for choosing cultivars. *Agron. Sustain. Dev.* 26, 107–115. doi:10.1051/agro:2006003
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.-L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Adam, M., Baron, C., others, 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Glob. Change Biol.* 20, 2301–2320.
- Becker, H.C., Leon, J., 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breed.* 101, 1–23
- Beek, E., 1991. Spatial interpolation of daily meteorological data. *Theor. Eval. Available Tech. Rep.* 53, 43.
- Bell, M.A., Fischer, R.A., Byerlee, D., Sayre, K., 1995. Genetic and agronomic contributions to yield gains: A case study for wheat. *Field Crops Res.* 44, 55–65. doi:10.1016/0378-4290(95)00049-6
- Bergez, J.-E., Chabrier, P., Gary, C., Jeuffroy, M.H., Makowski, D., Quesnel, G., Ramat, E., Raynal, H., Rouse, N., Wallach, D., Debaeke, P., Durand, P., Duru, M., Dury, J., Favardin, P., Gascuel-Oudou, C., Garcia, F., 2013. An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems. *Environ. Model. Softw.* 39, 39–49. doi:10.1016/j.envsoft.2012.03.011
- Billen, G., Garnier, J., Benoît, M., Anglade, J., 2013. The nitrogen cascade in arable crop areas of the North of France. *Cah. Agric.* 272–281. doi:10.1684/agr.2013.0640
- Bonneuil, C., Hochereau, F., 2008. Gouverner le « progrès génétique » Biopolitique et métrologie de la construction d'un standard variétal dans la France agricole d'après-guerre. *Ann. Hist. Sci. Soc.* 1305–1340.
- Bonneuil, C., Thomas, F., 2002. Du maïs hybride aux OGM: Un demi-siècle de génétique et d'amélioration des plantes à l'INRA. L'amélioration Plantes Contin. Ruptures.
- Bonneuil, C., Thomas, F., 2009. Gènes, pouvoirs et profits: recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM. Éditions Quae.
- Bonnin, I., Bonneuil, C., Goffaux, R., Montalent, P., Goldringer, I., 2014. Explaining the decrease in the genetic diversity of wheat in France over the 20th century. *Agric. Ecosyst. Environ.* 195, 183–192. doi:10.1016/j.agee.2014.06.003
- Boogaard, H., Van Diepen, C., Rutter, R., Cabrera, J., Van Laar, H., 1998. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential Uses and Limitations of Crop Models. *Agron. J.* 88, 704. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050005x

- Bouchard, C., Bernicot, M.-H., Felix, I., Guérin, O., Loyce, C., Omon, B., Rolland, B., 2008. Associer des itinéraires techniques de niveau d'intrants variés à des variétés rustiques de blé tendre: évaluation économique, environnementale et énergétique. *Courr. Environ. INRA* 55, 53–77.
- Brancourt-Hulmel, M., 1999. Crop diagnosis and probe genotypes for interpreting genotype environment interaction in winter wheat trials. *Theor. Appl. Genet.* 99, 1018–1030. doi:10.1007/s001220051410
- Brancourt-Hulmel, M., Biarnès-Dumoulin, V., Denis, J.B., 1997. Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes. *Agronomie* 17, 219–246.
- 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. doi:10.2135/cropsci2003.0343
- Brancourt-Hulmel, M., Lecomte, C., Leleu, M., Bérard, P., Galic, N., Trouvé, B., Sausseau, C., 1994. Sélection et stabilité du rendement chez le blé tendre d'hiver. *Agronomie* 14, 611–625.
- Brancourt-Hulmel, M., Lecomte, C., Meynard, J.-M., 1999. A Diagnosis of Yield-Limiting Factors on Probe Genotypes for Characterizing Environments in Winter Wheat Trials. *Crop Sci.* 39, 1798. doi:10.2135/cropsci1999.3961798x
- Braun, H.-J., Rajaram, S., van Ginkel, M., 1996. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92, 175–183. doi:10.1007/BF00022843
- Brisson, S., Oustrain, J.-M., 1997. Un exemple en grandes cultures, en France : La qualité dans la filière orge-malt-bière : Qualité de l'alimentation, in: *Phytoma-La Défense des végétaux. Presented at the Symposium franco-anglais BCPC/ANPP Protection des plantes et qualité de l'alimentation: répondre aux attentes des consommateurs, Gestion Location Intervention*, pp. 24–26.
- Brooks, R.J., Semenov, M.A., Jamieson, P.D., 2001. Simplifying Sirius: sensitivity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction. *Eur. J. Agron.* 14, 43–60. doi:10.1016/S1161-0301(00)00089-7
- Brown-Guedira, G., Thompson, J., Nelson, R., Warburton, M., 2000. Evaluation of genetic diversity of soybean introductions and North American ancestors using RAPD and SSR markers. *Crop Sci.* 40, 815–823.
- Burger, W.C., LaBerge, D.E., 1985. Malting and brewing quality. *Barley* 367–401.
- Butault, J.-P., Dedryver, C.-A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.M., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., others, 2010. Synthèse du rapport d'étude Écophyto R&D: quelles voies pour réduire l'usage des pesticides? Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer.
- Calderini, D.F., Slafer, G.A., 1999. Has yield stability changed with genetic improvement of wheat yield? *Euphytica* 107, 51–59.
- Calhoun, D.S., Gebeyehu, G., Miranda, A., Rajaram, S., van Ginkel, M., 1994. Choosing Evaluation Environments to Increase Wheat Grain Yield under Drought Conditions. *Crop Sci.* 34, 673. doi:10.2135/cropsci1994.0011183X003400030014x
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J., Edmeades, G., Schussler, J., 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Res.* 90, 19–34.
- Carroll, G.R., Swaminathan, A., 2000. Why the Microbrewery Movement? *Organizational Dynamics of Resource Partitioning in the US Brewing Industry* 1. *Am. J. Sociol.* 106, 715–762.
- Canadean Wisdom, 2014 : <https://www.globaldata.com/?s=malt>. Accédé le 25-04-2017
- Campbell, C., Jame, Y., Akinremi, O., Cabrera, M., 1995. Adapting the potentially mineralizable N concept for the prediction of fertilizer N requirements. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 42, 61–75.
- Casadebaig, P., 2008. Analyse et modélisation des interactions génotype – environnement – conduite de culture : application au tournesol ( *Helianthus annuus* ). Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse.
- Casadebaig, P., Guilioni, L., Lecoœur, J., Christophe, A., Champolivier, L., Debaeke, P., 2011. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in

- contrasting environments. *Agric. For. Meteorol.* 151, 163–178.
- Casadebaig, P., Mestries, E., Debaeke, P., 2016a. A model-based approach to assist variety evaluation in sunflower crop. *Eur. J. Agron.* 81, 92–105. doi:10.1016/j.eja.2016.09.001
- Casadebaig, P., Zheng, B., Chapman, S., Huth, N., Faivre, R., Chenu, K., 2016b. Assessment of the Potential Impacts of Wheat Plant Traits across Environments by Combining Crop Modeling and Global Sensitivity Analysis. *PLOS ONE* 11, e0146385. doi:10.1371/journal.pone.0146385
- Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 5952–5959.
- Ceccarelli, S., 1996. Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica* 92, 203–214. doi:10.1007/BF00022846
- Ceccarelli, S., 1994. Specific adaptation and breeding for marginal conditions, in: Rognli, O.A., Solberg, E., Schjelderup, I. (Eds.), *Breeding Fodder Crops for Marginal Conditions*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 101–127.
- Ceccarelli, S., Grando, S., Hamblin, J., 1992. Relationship between barley grain yield measured in low- and high-yielding environments. *Euphytica* 64, 49–58. doi:10.1007/BF00023537
- Chapman, S., Hammer, G., Butler, D., Cooper, M., 2000. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. *Crop Pasture Sci.* 51, 223–234.
- Chenu, K., Cooper, M., Hammer, G.L., Mathews, K.L., Dreccer, M.F., Chapman, S.C., 2011. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. *J. Exp. Bot.* 62, 1743–1755. doi:10.1093/jxb/erq459
- Chenu, K., Deihimfard, R., Chapman, S.C., 2013. Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt - spatial and temporal trends. *New Phytol.* 198, 801–820. doi:10.1111/nph.12192
- Chenu, K., Porter, J.R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S.C., Ewert, F., Bindi, M., Asseng, S., 2017. Contribution of Crop Models to Adaptation in Wheat. *Trends Plant Sci.* doi:10.1016/j.tplants.2017.02.003
- Colbach, N., 2010. Modelling cropping system effects on crop pest dynamics: how to compromise between process analysis and decision aid. *Plant Sci.* 179, 1–13.
- Collet, E., Mormont, M., 2003. Managing pests, consumers, and commitments: the case of apple growers and pear growers in Belgium's Lower Meuse region. *Environ. Plan. A* 35, 413–427.
- Commisariat général au développement durable, 2013. Les surplus d'azote et les gaz à effet de serre de l'activité agricole en France métropolitaine en 2010.
- Comstock, R., 1977. Quantitative genetics and the design of breeding programs. Presented at the Proceedings of the international conference on quantitative genetics, Iowa State University Press, Ames, p. 1705–1718.
- Cooper, M., Byth, D., 1996. Understanding plant adaptation to achieve systematic applied crop improvement—a fundamental challenge. *Plant Adapt. Crop Improv.* 5–23
- Cooper, M., Fox, P., 1996. Environmental characterization based on probe and reference genotypes.
- Cooper, M., Fox, P.N., Hammer, G.L., 1996. Environmental characterization based on probe and reference genotypes. *Plant Adapt. Crop Improv.* 529–547.
- Cooper, M., Hammer, G.L., 1996. Plant adaptation and crop improvement. CAB International in association with the International Rice Research Institute and the International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Wallingford, Oxon, UK.
- Cooper, M., Smith, O.S., Graham, G., Lane, A., others, 2004. Genomics, genetics, and plant breeding: a private sector perspective. *Crop Sci.* 44, 1907.
- Cooper, M., Stucker, R., DeLacy, I., Harch, B., 1997. Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield. *Crop Sci.* 37, 1168–1176.
- Cooper, M., Woodruff, D., Eisemann, R., Brennan, P., DeLacy, I., 1995. A selection strategy to

- accommodate genotype-by-environment interaction for grain yield of wheat: managed-environments for selection among genotypes. *Theor. Appl. Genet.* 90, 492–502.
- Couture, S., Reynaud, A., Dury, J., Bergez, J., 2010. Farmer's risk attitude: Reconciling stated and revealed preference approaches, in: *Fourth World Congress of Environmental and Resource Economists*. pp. 10–2.
- Cowan, R., Gunby, P., 1996. Sprayed to death: path dependence, lock-in and pest control strategies. *Econ. J.* 521–542.
- David, C., Jeuffroy, M.H., Laurent, F., Mangin, M., Meynard, J.M., 2005. The assessment of Azodyn-*Org* model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *Eur. J. Agron.* 23, 225–242.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *Eur. J. Agron.* 21, 249–266.
- 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 Res.* 107, 89–101. doi:10.1016/j.fcr.2008.01.001
- Debaeke, P., Gauffreteau, A., Durel, C.-E., Jeuffroy, M.-H., 2014. Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux, in: *Agronomie, Environnement & Sociétés*. pp. 65–73.
- 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., Raffaillac, 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.
- Debaeke, P., Quilot-Turion, B., 2014. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable, *Ecole chercheur, INRA*. ed. Seillac, FRA.
- del Moral, M.B.G., del Moral, L.F.G., 1995. Tiller production and survival in relation to grain yield in winter and spring barley. *Field Crops Res.* 44, 85–93. doi:10.1016/0378-4290(95)00072-0
- Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., De Falco, D., Maggiore, T., Stanca, A., 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *Eur. J. Agron.* 9, 11–20. doi:10.1016/S1161-0301(98)00019-7
- Denis, J., Gouet, J., Tranchefort, J., 1980. [Methods for studying the structure of genotype-environment interaction: application to the analysis of soft wheat variety trials]. *Biom. Fr.*
- De Ruiter, J.M., 1999. Yield and quality of malting barley (*Hordeum vulgare* L. 'Valetta') in response to irrigation and nitrogen fertilisation. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 27, 307–317. doi:10.1080/01140671.1999.9514110
- Dencic, S., 1994. Designing a wheat ideotype with increased sink capacity. *Plant Breed.* 112, 311–317.
- Desclaux, D., 2006. Sélection participative: spécificités et enjeux pour des agricultures paysannes et durables. *Courr. Environ. INRA* 119–127.
- Desclaux, D., Chiffolleau, Y., Nolot, J.-M., 2013. Du concept d'Ideotype à celui de Realttype : Gestion dynamique des Innovations Variétales par une approche transdisciplinaire et partenariale. Exemple du blé dur pour l'AB. *Innov. Agron.* 455–466.
- deVoil, P., Rossing, W.A.H., Hammer, G.L., 2006. Exploring profit – Sustainability trade-offs in cropping systems using evolutionary algorithms. *Environ. Model. Softw.* 21, 1368–1374. doi:10.1016/j.envsoft.2005.04.016
- Dingkuhn, M., De Vries, F.P., De Datta, S., Van Laar, H., 1991. Concepts for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. *Direct Seeded Flooded Rice Trop. Manila Philipp. Int. Rice Res. Inst.* 17–38.
- Dingkuhn, M., Luquet, D., Quilot, B., de Reffye, P., 2005. Environmental and genetic control of morphogenesis in crops: towards models simulating phenotypic plasticity. *Aust. J. Agric. Res.* 56,

- 1289–1302.
- Donald, C.M., 1968. The design of a wheat ideotype. Finlay KW Shepherd.
- Doucet, R., 2004. Malting 6-row barley: the French cultural exception. *Perspect. Agric.* 68–71.
- Dreccer, M.F., van Herwaarden, A.F., Chapman, S.C., 2009. Grain number and grain weight in wheat lines contrasting for stem water soluble carbohydrate concentration. *Field Crops Res.* 112, 43–54.
- Drillaud-Marteau, C., 2014. Orges: Surfaces, critères de qualité et potentialités. [https://www.evenements-arvalis.fr/reunion-technique-orge-le-6-fevrier-2014-vouille-79--@/\\_plugins/WMS\\_BO\\_Gallery/page/getElementStream.html?id=24560&prop=file!](https://www.evenements-arvalis.fr/reunion-technique-orge-le-6-fevrier-2014-vouille-79--@/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=24560&prop=file!)
- Edney, M.J., O'Donovan, J.T., Turkington, T.K., Clayton, G.W., McKenzie, R., Juskiw, P., Lafond, G.P., Brandt, S., Grant, C.A., Harker, K.N., Johnson, E., May, W., 2012. Effects of seeding rate, nitrogen rate and cultivar on barley malt quality. *J. Sci. Food Agric.* 92, 2672–2678. doi:10.1002/jsfa.5687
- Ehler, L.E., 2006. Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Manag. Sci.* 62, 787–789. doi:10.1002/ps.1247
- Ellis, R.P., Forster, B.P., Robinson, D., Handley, L.L., Gordon, D.C., Russell, J.R., Powell, W., 2000. Wild barley: a source of genes for crop improvement in the 21st century? *J. Exp. Bot.* 51, 9–17. doi:10.1093/jexbot/51.342.9
- Elmqvist, M., Segrestin, B., 2009. Sustainable development through innovative design: lessons from the KCP method experimented with an automotive firm. *Int. J. Automot. Technol. Manag.* 9, 229–244.
- Emebiri, L., Moody, D., 2004. Potential of low-protein genotypes for nitrogen management in malting barley production. *J. Agric. Sci.* 142, 319–325.
- Eurostat, 2016. Glossary:Gross nitrogen balance.
- Eurostat, 2017, <http://ec.europa.eu/eurostat/fr/home>. accédé le 14/08/2017
- FAO, 2017. FAOSTAT [WWW Document]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed 6.16.17).
- Fargue, A., 2003. Maîtrise des flux de gènes chez le colza : Etude ex-ante de l'impact de différentes innovations variétales (phdthesis). INAPG (AgroParisTech).
- Fargue, A., Colbach, N., Meynard, J.-M., 2005. Introduction of genotypic effects into GeneSys-Rape: the example of height and male sterility. *Agric. Ecosyst. Environ.* 108, 318–328. doi:10.1016/j.agee.2005.01.010
- Farnsworth, K.D., Niklas, K.J., 1995. Theories of Optimization, Form and Function in Branching Architecture in Plants. *Funct. Ecol.* 9, 355–363. doi:10.2307/2389997
- Felix, I., 2015. Question d'actu : quelles variétés de blé tendre pour des itinéraires allégés en intrants ? *Perspect. Agric.* n°34p 8.
- Felix, I., Rolland, B., Loyce, C., Omon, B., Piaud, S., 2012. Gagner de l'efficacité en adaptant la variété à l'environnement de production. *Perspect. Agric.* n°390 Juin 2012.
- Fischer, R., Edmeades, G.O., 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50, S–85.
- Fox, G.P., Panozzo, J.F., Li, C.D., Lance, R.C.M., Inkerman, P.A., Henry, R.J., 2003. Molecular basis of barley quality. *Crop Pasture Sci.* 54, 1081–1101.
- Fox, G.P., 2009. Chemical composition in barley grains and malt quality, in: Zhang, G., Li, C. (Eds.), *Genetics and Improvement of Barley Malt Quality*. Zhejiang University Press ; Springer, Hangzhou; Dordrecht.
- Fox, G.P., Bowman, J., Kelly, A., Inkerman, A., Poulsen, D., Henry, R., 2008. Assessing for genetic and environmental effects on ruminant feed quality in barley (*Hordeum vulgare*). *Euphytica* 163, 249–257.
- Friedt, W., Werner, K., Ordon, F., 2000. Genetic progress as reflected in highly successful and productive modern barley cultivars, in: *Barley Genetics 8: Proc. of the 8th Int. Barley Genetics Symp.* pp. 45–52.

- Gallais, A., 2013. Évolution de la diversité génétique des variétés de plantes cultivées.
- Gallais, A., 2015. Comprendre l'amélioration des plantes: Enjeux, méthodes, objectifs et critères de sélection. Quæ.
- Gallais, A., 2011. Méthodes de création de variétés en amélioration des plantes. Éditions Quæ, Versailles Cedex, France.
- Gauffreteau, A., Charmet, G., Jeuffroy, M.-H., Le Gouis, J., MEYNARD, J.-M., Rolland, B., 2014. Variétés et itinéraires techniques du blé : une évolution vers la diversification. *AE&S* 13–22.
- Geels, F.W., 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Res. Policy* 31, 1257–1274.
- Génermont, S., Cellier, P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agric. For. Meteorol.* 88, 145–167.
- Gentzbittel, L., Andersen, S.U., Ben, C., Rickauer, M., Stougaard, J., Young, N.D., 2015. Naturally occurring diversity helps to reveal genes of adaptive importance in legumes. *Front. Plant Sci.* 6. doi:10.3389/fpls.2015.00269
- Gepts, P., 2006. Plant genetic resources conservation and utilization. *Crop Sci.* 46, 2278–2292.
- GIS Sol, 2017. Les sols dominants de France métropolitaine.
- Glenk, K., Hall, C., Liebe, U., Meyerhoff, J., 2012. Preferences of Scotch malt whisky consumers for changes in pesticide use and origin of barley. *Food Policy* 37, 719–731. doi:10.1016/j.foodpol.2012.08.003
- Goffaux, R., Goldringer, I., Bonneuil, C., Montalent, P., Bonnin, I., 2011. Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées. *Cas Blé Tendre Cultivé En Fr. Depuis Un Siècle Rapp. FRB Sér. Expert. Synthèse* 44.
- Gouache, D., Bouchon, A.-S., Jouanneau, E., Le Bris, X., 2015. Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France. *Agric. For. Meteorol.* 209–210, 1–10. doi:10.1016/j.agrformet.2015.04.027
- Graf, B., Dingkuhn, M., Schnier, F., Coronel, V., S. Akita, 1991. A simulation model for the dynamics of rice growth and development: III. Validation of the model with high-yielding varieties. *Agric. Syst.* 36, 329–349. doi:10.1016/0308-521X(91)90014-2
- Gupta, M., Abu-Ghannam, N., Gallagher, E., 2010. Barley for Brewing: Characteristic Changes during Malting, Brewing and Applications of its By-Products. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 9, 318–328. doi:10.1111/j.1541-4337.2010.00112.x
- Gutierrez, L., Nason, J., Jannink, J.-L., 2009. Morphological Genetic Diversity of Worldwide Barley and Mega-Targets of Selection. *Crop Sci.* 49, 483–497.
- Hagedorn, R., DOBLAS-REYES, F.J., Palmer, T., 2005. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting—I. Basic concept. *Tellus A* 57, 219–233.
- Hammer, G.L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M.T., van Oosterom, E., Jordan, D., 2014. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop Pasture Sci.* 65, 614–626.
- Hammer, G.L., van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S.C., Broad, I., Harland, P., Muchow, R.C., 2010. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *J. Exp. Bot.* 61, 2185–2202.
- Hammer, G.L., Vanderlip, R.L., Gibson, G., Wade, L.J., Henzell, R.G., Younger, D.R., Warren, J., Dale, A.B., 1989. Genotype-by-Environment Interaction in Grain Sorghum. II. Effects of Temperature and Photoperiod on Ontogeny. *Crop Sci.* 29, 376. doi:10.2135/cropsci1989.0011183X002900020029x
- Hariri, A., 2003. Etude et modélisation de la trempe en malterie. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- He, J., Le Gouis, J., Stratonovitch, P., Allard, V., Gaju, O., Heumez, E., Orford, S., Griffiths, S., Snape, J.W., Foulkes, M.J., others, 2012. Simulation of environmental and genotypic variations of final leaf number and anthesis date for wheat. *Eur. J. Agron.* 42, 22–33.

- Heinemann, J.A., Massaro, M., Coray, D.S., Agapito-Tenfen, S.Z., Wen, J.D., 2014. Sustainability and innovation in staple crop production in the US Midwest. *Int. J. Agric. Sustain.* 12, 71–88. doi:10.1080/14735903.2013.806408
- Hénin, S., France, Ministère de l’agriculture (1974-1988), France, Ministère de l’environnement et du cadre de vie, 1980. Rapport du groupe de travail “Activités agricoles et qualité des eaux.” Ministère de l’agriculture ; Ministère de l’environnement et du cadre de vie, Paris; Neuilly.
- Hernandez-Segundo, E., Capettini, F., Trethowan, R., van Ginkel, M., Mejia, A., Carballo, A., Crossa, J., Vargas, M., Balbuena-Melgarejo, A., 2009. Mega-Environment Identification for Barley Based on Twenty-Seven Years of Global Grain Yield Data. *Crop Sci.* 49, 1705. doi:10.2135/cropsci2008.04.0227
- Hiederer, R., 2013. Mapping soil properties for Europe—spatial representation of soil database attributes. Publ. Off. Eur. Union EUR26082EN Sci. Tech. Res. Ser. Luxemb.
- Hochman, Z., Carberry, P., Robertson, M., Gaydon, D., Bell, L., McIntosh, P., 2013. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. *Eur. J. Agron.* 44, 109–123.
- Hochman, Z., Holzworth, D., Hunt, J., 2009. Potential to improve on-farm wheat yield and WUE in Australia. *Crop Pasture Sci.* 60, 708–716.
- Hodson, D., White, J., 2007. Use of spatial analyses for global characterization of wheat-based production systems.
- Holcomb, J.C., Sullivan, D.M., Horneck, D.A., Clough, G.H., 2011. Effect of Irrigation Rate on Ammonia Volatilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 2341. doi:10.2136/sssaj2010.0446
- Hospido, A., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2005. Environmental analysis of beer production. *Int. J. Agric. Resour. Gov. Ecol.* 4, 152. doi:10.1504/IJARGE.2005.007197
- 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. doi:10.2134/agronj2015.0512
- Houlès, V., Mary, B., Guérif, M., Makowski, D., Justes, E., 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie* 24, 339–349.
- Huggins, D.R., Pan, W.L., 2003. Key Indicators for Assessing Nitrogen Use Efficiency in Cereal-Based Agroecosystems. *J. Crop Prod.* 8, 157–185. doi:10.1300/J144v08n01\_07
- Incograin, 2014. Addendum technique N°IV pour la vente des orges de brasseries.
- INSERM, 2013. Pesticides: effets sur la santé.
- Jahn, C.E., McKay, J.K., Mauleon, R., Stephens, J., McNally, K.L., Bush, D.R., Leung, H., Leach, J.E., 2011. Genetic variation in biomass traits among 20 diverse rice varieties. *Plant Physiol.* 155, 157–168.
- Jakoby, O., Quaas, M.F., Müller, B., Baumgärtner, S., Frank, K., 2014. How do individual farmers’ objectives influence the evaluation of rangeland management strategies under a variable climate? *J. Appl. Ecol.* 51, 483–493.
- Jamieson, P., Semenov, M., Brooking, I., Francis, G., 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *Eur. J. Agron.* 8, 161–179.
- Jeuffroy, M.-H., 2014. Agronomie et économie face aux enjeux de durabilité en agriculture : pourquoi et comment faire converger les approches ? Le point de vue d’une agronome. *Rev. AES.*
- Jeuffroy, M.-H., Barbottin, A., Jones, J.W., Lecoq, J., 2006. Crop-models with genotype parameters, in: *Working with Dynamic Crop Models — Evaluation, Analysis, Parameterization and Applications.* Elsevier, Amsterdam (The Netherlands), pp. 281–307.
- Jeuffroy, M.-H., Barre, C., Bouchard, C., Desmottes-mainard, S., Devienne-Barret, F., Girard, M., Recous, S., 2000. Fonctionnement d’un peuplement de blé en condition de nutrition azotée sub-optimale, in: *Fonctionnement Des Peuplements Végétaux Sous Contraintes Environnementales.* Paris (France), pp. 289–305.



- Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., 1999. Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number. *Crop Sci.* 39, 1385. doi:10.2135/cropsci1999.3951385x
- Jeuffroy, M.-H., Casadebaig, P., Debaeke, P., Loyce, C., Meynard, J.-M., 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 121–137. doi:10.1007/s13593-013-0170-9
- Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Machet, J.-M., Recous, S., 2013. Nitrogen management in arable crops: Can available knowledge and tools reconcile agronomic and environmental needs? *Cah. Agric.* 249–257. doi:10.1684/agr.2013.0639
- 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. doi:10.1016/S1161-0301(98)00059-8
- Jeuffroy, M.-H., Vocanson, A., Roger-Estrade, J., Meynard, J.-M., 2012. The use of models at field and farm levels for the ex ante assessment of new pea genotypes. *Eur. J. Agron.* 42, 68–78.
- Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2016. Brief history of agricultural systems modeling. *Agric. Syst.* doi:10.1016/j.agsy.2016.05.014
- Jørgensen, L.N., Nielsen, G.C., Ørum, J.E., Jensen, J.E., Pinnschmidt, H.O., 2008. Integrating Disease Control in Winter Wheat – Optimizing Fungicide Input. *Outlooks Pest Manag.* 19, 206–213. doi:10.1564/19oct04
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N., Meinke, H., Hochman, Z., others, 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18, 267–288.
- Kemp, R., Schot, J., Hoogma, R., 1998. Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technol. Anal. Strateg. Manag.* 10, 175–198.
- Kempton, R.A., Fox, P.N., Cerezo, M., 2012. *Statistical methods for plant variety evaluation*. Springer Science & Business Media.
- Kersebaum, K.C., 2007. Modelling nitrogen dynamics in soil–crop systems with HERMES, in: *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil–crop Systems*. Springer, pp. 147–160.
- 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.
- Kirkegaard, J.A., Hunt, J.R., 2010. Increasing productivity by matching farming system management and genotype in water-limited environments. *J. Exp. Bot.* erq245. doi:10.1093/jxb/erq245
- Khush, G.S., 1995. Breaking the yield frontier of rice. *GeoJournal* 35, 329–332.
- Konak, A., Coit, D.W., Smith, A.E., 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91, 992–1007. doi:10.1016/j.ress.2005.11.018
- Laidig, F., Piepho, H.-P., Drobek, T., Meyer, U., 2014. Genetic and non-genetic long-term trends of 12 different crops in German official variety performance trials and on-farm yield trends. *TAG Theor. Appl. Genet. Theor. Angew. Genet.* 127, 2599–2617. doi:10.1007/s00122-014-2402-z
- Lamine, C., 2011. Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *J. Rural Stud.* 27, 209–219. doi:10.1016/j.jrurstud.2011.02.001
- Lammerts van Bueren, E.T., Jones, S.S., Tamm, L., Murphy, K.M., Myers, J.R., Leifert, C., Messmer, M.M., 2011. The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review. *NJAS - Wagening. J. Life Sci., Improving Production Efficiency, Quality and Safety in Organic and “Low-Input” Food Supply Chains* 58, 193–205. doi:10.1016/j.njas.2010.04.001
- Laperche, A., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Gardet, O., Gouis, J.L., 2006. Estimation of genetic parameters of a DH wheat population grown at different N stress levels characterized by probe genotypes. *Theor. Appl. Genet.* 112, 797–807. doi:10.1007/s00122-005-0176-z

- Laperche, A., Brancourt-Hulmel, M., Heumez, E., Gardet, O., Hanocq, E., Devienne-Barret, F., Le Gouis, J., 2007. Using genotype  $\times$  nitrogen interaction variables to evaluate the QTL involved in wheat tolerance to nitrogen constraints. *Theor. Appl. Genet.* 115, 399–415. doi:10.1007/s00122-007-0575-4
- Lauri, P.-E., 2014. Conception de systèmes horticoles innovants Bases biologiques, écologiques et socio-économiques, École-chercheurs INRA-CIRAD. INRA, Paris.
- Le Champion, A., Oury, F.-X., Morlais, J.-Y., Walczak, P., Bataillon, P., Gardet, O., Gilles, S., Pichard, A., Rolland, B., 2014. Is low-input management system a good selection environment to screen winter wheat genotypes adapted to organic farming? *Euphytica* 199, 41–56. doi:10.1007/s10681-014-1172-7
- Le Bail, M., Meynard, J.-M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie* 23, 13–27. doi:10.1051/agro:2002029
- Le Cadre, E., 2004. Modélisation de la volatilisation d'ammoniac en interaction avec les processus chimiques et biologiques du sol: le modèle Volt'AIR. Ecole Dr. ABIES Paris Fr. INA-PG 211pp.
- Le Gouis, J., Delebarre, O., Beghin, D., Heumez, E., Pluchard, P., 1999. Nitrogen uptake and utilisation efficiency of two-row and six-row winter barley cultivars grown at two N levels. *Eur. J. Agron.* 10, 73–79. doi:0.1016/S1161-0301(98)00055-0
- Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A., 2006. Les processus d'innovation: Conception innovante et croissance des entreprises. Lavoisier Paris.
- Lecomte, C., 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Agroparistech, Paris.
- Lee, E., Tollenaar, M., 2007. Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Sci.* 47, S–202.
- Lefort, P., Guy, P., Buson, M., Poisson, C., 1979. Aspects biologiques de l'interaction génotypes  $\times$  milieux. Recherche de définitions. Implications en amélioration des plantes. *Tocsin Radiateur* 79, 15–24.
- Lemaire, S., 2009. Les variétés hybrides vues par un économiste. *Sélectionneur Fr.* pp 101-108.
- Lillemo, M., Reitan, L., Bjørnstad, A.A., 2010. Increasing impact of plant breeding on barley yields in central Norway from 1946 to 2008. *Plant Breed.* 129, 484–490.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., Guckert, A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant Soil* 214, 49–59.
- Lin, C.-S., Binns, M.R., Lefkovich, L.P., 1986. Stability analysis: where do we stand? *Crop Sci.* 26, 894–900.
- Löffler, C.M., Wei, J., Fast, T., Gogerty, J., Langton, S., Bergman, M., Merrill, B., Cooper, M., 2005. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems. *Crop Sci.* 45, 1708–1716.
- Lopes, M.S., El-Basyoni, I., Baenziger, P.S., Singh, S., Royo, C., Ozbek, K., Aktas, H., Ozer, E., Ozdemir, F., Manickavelu, A., others, 2015. Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *J. Exp. Bot.* 122.
- 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., 2012. 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. doi: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. doi:10.1016/j.cropro.2008.02.001
- Loyce, C., Rellier, J.P., Meynard, J.M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (2): ethanol-wheat production. *Agric. Syst.* 72, 33–57. doi:10.1016/S0308-521X(01)00065-8
- Lu, M., O'Brien, L., Stuart, I., 2000. Barley malting quality and yield interrelationships and the effect on yield distribution of selection for malting quality in the early generations. *Crop Pasture Sci.* 51, 247–258.
- Lynch, J.P., 2013. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Ann. Bot.* 112, 347–357. doi:10.1093/aob/mcs293
- Machet, J., Laurent, F., Chapot, J., Dore, T., Dulout, A., 1997. Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. *Colloq.-INRA* 271–288.
- Madani, A., Shirani-Rad, A., Pazoki, A., Nourmohammadi, G., Zarghami, R., Mokhtassi-Bidgoli, A., others, 2010. The impact of source or sink limitations on yield formation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) due to post-anthesis water and nitrogen deficiencies. *Plant Soil Env.* 56, 218–227.
- Madre, M., 2004. Progress in malting barley breeding in SECOBRA, in: *Proceedings of the 9th International Barley Genetic Symposium*. Agricultural Research institute, Kromeriz, Brno, Czech Republic, pp. 374–383.
- Maillard, A., Cadot, V., Ravenel, C., Marques, S., Bossuet, L., Masson, F., Lorgeou, J., Du Cheyron, P., Obeuf, A., Picard, A., Gauffreteau, A., Mistou, M., Jeuffroy, M.-H., 2016. Diversification du réseau CTPS pour une meilleure caractérisation de l'adaptation des variétés de blé tendre à des itinéraires techniques à hautes performances environnementales. *Innov. Agron.*
- Makowski, D., Naud, C., Jeuffroy, M.-H., Barbottin, A., Monod, H., 2006. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91, 1142–1147. doi:10.1016/j.res.2005.11.015
- Makowski, D., Wallach, D., Meynard, J.-M., 1999. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agron. J.* 91, 377–385.
- Marra, M., Pannell, D.J., Ghadim, A.A., 2003. The economics of risk, uncertainty and learning in the adoption of new agricultural technologies: where are we on the learning curve? *Agric. Syst.* 75, 215–234.
- Martre, P., Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Zyskowski, R.F., Porter, J.R., Triboi, E., 2006. Modelling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. *Eur. J. Agron.* 25, 138–154.
- Martre, P., Quilot-Turion, B., Luquet, D., Memmah, M.-M.O.-S., Chenu, K., Debaeke, P., 2015a. Model-assisted phenotyping and ideotype design, in: *Crop Physiology*. Elsevier, pp. 349–373.
- Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J.W., Rötter, R.P., Boote, K.J., Ruane, A.C., Thorburn, P.J., Cammarano, D., 2015b. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Glob. Change Biol.* 21, 911–925.
- McGrann, G.R.D., Stavrinides, A., Russell, J., Corbitt, M.M., Booth, A., Chartrain, L., Thomas, W.T.B., Brown, J.K.M., 2014. A trade off between mlo resistance to powdery mildew and increased susceptibility of barley to a newly important disease, *Ramularia* leaf spot. *J. Exp. Bot.* ert452. doi:10.1093/jxb/ert452
- MEA, 2005. Millennium ecosystem assessment synthesis report. Millennium Ecosystem Assessment.
- MeteoFrance, 2017. Le climat en métropole.
- Meinke, H., Hammer, G.L., van Keulen, H., Rabbinge, R., 1998. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective III. The integrated wheat model (I\_WHEAT). *Eur. J. Agron.* 8, 101–116. doi:10.1016/S1161-0301(97)00015-4

- Meissle, M., Mouron, P., Musa, T., Bigler, F., Pons, X., Vasileiadis, V., Otto, S., Antichi, D., Kiss, J., Pálincás, Z., others, 2010. Pests, pesticide use and alternative options in European maize production: current status and future prospects. *J. Appl. Entomol.* 134, 357–375.
- Messina, C.D., Jones, J., Boote, K., Vallejos, C., 2006. A gene-based model to simulate soybean development and yield responses to environment. *Crop Sci.* 46, 456–466.
- Meynard, J.-M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du Blé d'hiver. INA/PG, Paris.
- Meynard, J., Aggeri, F., Coulon, J., Habib, R., Tillon, J., 2006. Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants. *Rapp. Groupe Trav.*
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. doi:10.1051/agro:2002064
- Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., Michon, C., 2016. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agric. Syst.* doi:10.1016/j.agry.2016.08.002
- Meynard, J.-M., Savini, I., 2003. La désintensification: point de vue d'un agronome. *Désintensification Agric. Quest. Débats Doss. Environ. INRA.*
- Meynard, J.-M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Savini, I., others, 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures: étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *OCL* 20, D403.
- Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2014. Panorama des industries agroalimentaires, Sous classe 11.06Z, Fabrication de malt.
- Mitchell, R., Lawlor, D., Mitchell, V., Gibbard, C., White, E., Porter, J., 1995. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and increased temperature on winter wheat: test of ARCWHEAT1 simulation model. *Plant Cell Environ.* 18, 736–748.
- Mohammadi, S.A., Prasanna, B.M., 2003. Analysis of Genetic Diversity in Crop Plants—Salient Statistical Tools and Considerations. *Crop Sci.* 43, 1235. doi:10.2135/cropsci2003.1235
- Molina-Cano, J.-L., Sopena, A., Polo, J., Bergareche, C., Moralejo, M., Swanston, J., Glidewell, S., 2002. Relationships between barley hordeins and malting quality in a mutant of cv. Triumph. II. Genetic and environmental effects on water uptake. *J. Cereal Sci.* 36, 39–50.
- Moreta, D.E., Mathur, P.N., van Zonneveld, M., Amaya, K., Arango, J., Selvaraj, M.G., Dedicova, B., 2013. Current Issues in Cereal Crop Biodiversity, in: Mukherjee, J. (Ed.), *Biotechnological Applications of Biodiversity*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–35. doi:10.1007/10\_2013\_263
- Munoz-Amatriain, M., Cuesta-Marcos, A., Endelman, J.B., Comadran, J., Bonman, J.M., Bockelman, H.E., Chao, S., Russell, J., Waugh, R., Hayes, P.M., Muehlbauer, G.J., 2014. The USDA Barley Core Collection: Genetic Diversity, Population Structure, and Potential for Genome-Wide Association Studies. *PLoS ONE* 9, e94688. doi:10.1371/journal.pone.0094688
- Murphy, K.M., Campbell, K.G., Lyon, S.R., Jones, S.S., 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Res.* 102, 172–177. doi:10.1016/j.fcr.2007.03.011
- Muthuramu, S., Jebaraj, S., Gnanasekaran, M., 2011. AMMI biplot analysis for drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). *Res J Agric Sci* 2, 98–100.
- Nendel, C., Berg, M., Kersebaum, K.C., Mirschel, W., Specka, X., Wegehenkel, M., Wenkel, K.O., Wieland, R., 2011. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecol. Model.* 222, 1614–1625. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.02.018
- Nevo, E., Chen, G., 2010. Drought and salt tolerances in wild relatives for wheat and barley improvement. *Plant Cell Environ.* 33, 670–685. doi:10.1111/j.1365-3040.2009.02107.x
- Nevo, E., Shewry, P.R., 1992. Origin, evolution, population genetics and resources for breeding of wild barley, *Hordeum spontaneum*, in the Fertile Crescent. *Barley Genet. Biochem. Mol. Biol. Biotechnol.* 19–43.

- Newton, A.C., Flavell, A.J., George, T.S., Leat, P., Mullholland, B., Ramsay, L., Revoredo-Giha, C., Russell, J., Steffenson, B.J., Swanston, J.S., 2011. Crops that feed the world 4. Barley: a resilient crop? Strengths and weaknesses in the context of food security. *Food Secur.* 3, 141–178.
- Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant Soil* 228, 83–103.
- Nolot, J.M., 2002. Systèmes de grande culture intégrés: principes et outils de conception, conduite et évaluation. *Courr. Environ. INRA* 15–26.
- Nuttall, J.G., O’Leary, G.J., Panozzo, J.F., Walker, C.K., Barlow, K.M., Fitzgerald, G.J., 2017. Models of grain quality in wheat—A review. *Field Crops Res.* 202, 136–145. doi:10.1016/j.fcr.2015.12.011
- OERKE, E., 2000. Infection, damage, loss—an assessment of crop losses to pests and their avoidance. Habilitation thesis, University of Bonn.
- Ogushi, K., Lim, P., Barr, A., Takahashi, S., Asakura, T., Ito, K., 2002. Japanese barley meets Australia: quality performance of malting barley grown in different countries. *J. Inst. Brew.* 108, 303–309.
- Paleari, L., Movedi, E., Cappelli, G., Wilson, L.T., Confalonieri, R., 2017. Surfing parameter hyperspaces under climate change scenarios to design future rice ideotypes. *Glob. Change Biol.* doi:10.1111/gcb.13682
- Passarella, V.S., Savin, R., Abeledo, L.G., Slafer, G.A., 2003. Malting quality as affected by barley breeding (1944–1998) in Argentina. *Euphytica* 134, 161–167. doi:10.1023/B:EUPH.0000003832.21034.90
- Peng, S., Khush, G.S., Virk, P., Tang, Q., Zou, Y., 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crops Res.* 108, 32–38. doi:10.1016/j.fcr.2008.04.001
- Peng, S., Khush, G., Cassman, K., 1994. Evolution of the new plant ideotype for increased yield potential, in: *Breaking the Yield Barrier. Proceedings of a Workshop on Rice Yield Potential in Favourable Environments.* International Rice Research Institute, Philippines. pp. 5–20.
- Peng, S., Khush, G., 2003. Four Decades of Breeding for Varietal Improvement of Irrigated Lowland Rice in the International Rice Research Institute. *Plant Prod. Sci.* 6, 157–164. doi:10.1626/pps.6.157
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., DE Cara, S., Delame, N., Dorneau, M., Dupraz, P., Faverdin, P., Garcia Launay, F., Hassouna, M., Hénault, C., Jeuffroy, M.-H., Klumpp, K., Metay, A., Moran, D., Recous, S., Samson, E., Savini, I., Pardon, L., 2013. How can French agriculture contribute to reducing greenhouse gas emissions? Abatement potential and cost of ten technical measures. Synopsis of the study report, INRA (France), 92 pgs.
- Perlikowski, D., Kosmala, A., Rapacz, M., Kościelniak, J., Pawłowicz, I., Zwierzykowski, Z., 2014. Influence of short-term drought conditions and subsequent re-watering on the physiology and proteome of *Lolium multiflorum*/*Festuca arundinacea* introgression forms, with contrasting levels of tolerance to long-term drought. *Plant Biol.* 16, 385–394.
- Perraud, D., 2012. réformes et transitions : l’étape de la multifonctionnalité agricole. *Académie* 365–398.
- Perronne, R., Makowski, D., Goffaux, R., Montalent, P., Goldringer, I., 2017. Temporal evolution of varietal, spatial and genetic diversity of bread wheat between 1980 and 2006 strongly depends upon agricultural regions in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 12–20. doi:10.1016/j.agee.2016.11.003
- Picheny, V., Trépos, R., Casadebaig, P., 2017. Optimization of black-box models with uncertain climatic inputs? Application to sunflower ideotype design. *PLOS ONE* 12, e0176815. doi:10.1371/journal.pone.0176815
- Pickering, R., Johnston, P.A., 2005. Recent progress in barley improvement using wild species of *Hordeum*. *Cytogenet. Genome Res.* 109, 344–349. doi:10.1159/000082418

- Plaut, Z., 2003. Plant exposure to water stress during specific growth stages, *Encyclopedia of Water Science*. Taylor & Francis New York.
- Pretty, J.N., Brett, C., Gee, D., Hine, R.E., Mason, C.F., Morison, J.I.L., Raven, H., Rayment, M.D., van der Bijl, G., 2000. An assessment of the total external costs of UK agriculture. *Agric. Syst.* 65, 113–136. doi:10.1016/S0308-521X(00)00031-7
- Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 581–594. doi:10.1007/s13593-011-0059-4
- Psota, V., Hartmann, J., Sejkorová, š., Loučková, T., Vejražka, K., 2009. 50 Years of Progress in Quality of Malting Barley Grown in the Czech Republic. *J. Inst. Brew.* 115, 279–291. doi:10.1002/j.2050-0416.2009.tb00382.x
- Quilot-Turion, B., Ould-Sidi, M.-M., Kadrani, A., Hilgert, N., Génard, M., Lescourret, F., 2012. Optimization of parameters of the “Virtual Fruit” model to design peach genotype for sustainable production systems. *Eur. J. Agron.* 42, 34–48. doi:10.1016/j.eja.2011.11.008
- Ramirez-Villegas, J., Watson, J., Challinor, A.J., 2015. Identifying traits for genotypic adaptation using crop models. *J. Exp. Bot.* erv014.
- Rasmusson, D.C., 1987. An Evaluation of Ideotype Breeding1. *Crop Sci.* 27, 1140. doi:10.2135/cropsci1987.0011183X002700060011x
- Ravier, C., 2017. Conception innovante d’une méthode de fertilisation azotée: Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation.
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS-Wagening. J. Life Sci.* 79, 31–40.
- Ray, D.K., Gerber, J.S., MacDonald, G.K., West, P.C., 2015. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.* 6, 5989. doi:10.1038/ncomms6989
- Reau, R., Monnot, L., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., Dumans, P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs1. *Innov. Agron.* 5–33.
- Reid, T.A., Yang, R.-C., Salmon, D.F., Navabi, A., Spaner, D., 2011. Realized gains from selection for spring wheat grain yield are different in conventional and organically managed systems. *Euphytica* 177, 253–266. doi:10.1007/s10681-010-0257-1
- Remy, J.C., Hebert, J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C R Acad Agric Fr.* 700–710.
- Richards, R., 2000. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *J. Exp. Bot.* 51, 447–458.
- Rolland, B., Bouchard, C., Loyce, C., Meynard, J.-M., Guyomard, H., Lonne, P., Doussinault, G., 2003. Des itinéraires techniques à bas niveaux d’intrants pour des variétés rustiques de blé tendre: une alternative pour concilier économie et environnement. *Courr. Environ. INRA* 49, 47–62.
- Rolland, B., Le Champion, A., Oury, F.-X., 2012. Pourquoi sélectionner de nouvelles variétés de blé tendre adaptées à l’agriculture biologique ? *Courr. L’environnement L’INRA* n°62, 71–86.
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M., van Ittersum, M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands, in: Geijn, M.K. van I. and S.C. van de (Ed.), *Developments in Crop Science, Perspectives for Agronomy Adopting Ecological Principles and Managing Resource Use Proceedings of the 4th Congress of the European Society for Agronomy*. Elsevier, pp. 339–351.
- Rötter, R., Tao, F., Höhn, J., Palosuo, T., 2015. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. *J. Exp. Bot.* erv098.
- Rötter, R.P., 2014. Agricultural impacts: robust uncertainty. *Nat. Clim. Change* 4, 251–252.
- Roy, B., 1985. Méthodologie multicritère d’aide à la décision, *Collection Gestion. Série Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion*. Economica, Paris.
- Ruget, F., Brisson, N., Delécolle, R., Faivre, R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22, 133–158.

- doi:10.1051/agro:2002009
- Sabaghnia, N., Dehghani, H., Sabaghpour, S.H., 2006. Nonparametric methods for interpreting genotype× environment interaction of lentil genotypes. *Crop Sci.* 46, 1100–1106.
- 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. doi:10.1007/s10668-012-9402-4
- Salo, T.J., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., Bindi, M., Calanca, P., Klein, T., Moriondo, M., Ferrise, R., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takáč, J., Hlavinka, P., Trnka, M., Rötter, R.P., 2016. Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. *J. Agric. Sci.* 154, 1218–1240. doi:10.1017/S0021859615001124
- Saulas, P., Meynard, J.-M., 1998. Production intégrée et extensification sont-elles compatibles? Cas des céréales à paille. *Doss. Environ. INRA* 9–16.
- Schmitt, M., 2014. Des protéines pour quoi faire chez le brasseur et chez le malteur ?
- Semenov, M., Stratonovitch, P., Alghabari, F., Gooding, M., 2014. Adapting wheat in Europe for climate change. *J. Cereal Sci.* 59, 245–256.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2013. Designing high-yielding wheat ideotypes for a changing climate. *Food Energy Secur.* 2, 185–196.
- Semenov, M.A., Martre, P., Jamieson, P.D., 2009. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1095–1104. doi:10.1016/j.agrformet.2009.01.006
- Shah, J.M., Asgher, Z., Zeng, J., Quan, X., Ali, E., Shamsi, I.H., Zhang, G., 2017. Growth and physiological characterization of low nitrogen responses in Tibetan wild barley (*Hordeum spontaneum*) and cultivated barley (*Hordeum vulgare*). *J. Plant Nutr.* 40, 861–868. doi:10.1080/01904167.2016.1262405
- Sherlock, R., Goh, K., 1984. Dynamics of ammonia volatilization from simulated urine patches and aqueous urea applied to pasture I. Field experiments. *Fertil. Res.* 5, 181–195.
- Shorter, R., Lawn, R., Hammer, G., 1991. Improving genotypic adaptation in crops—a role for breeders, physiologists and modellers. *Exp. Agric.* 27, 155–175.
- Simon, J.L., others, 1969. Basic research methods in social science.
- Sinclair, T.R., Seligman, N.G., 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron. J.* 88, 698–704.
- Sinebo, W., 2005. Trade off between yield increase and yield stability in three decades of barley breeding in a tropical highland environment. *Field Crops Res.* 92, 35–52. doi:10.1016/j.fcr.2004.08.009
- Slafer, G.A., Araus, J.L., Royo, C., Moral, L., 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Ann. Appl. Biol.* 146, 61–70.
- Smith, G.P., Gooding, M.J., 1999. Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. *Agric. For. Meteorol.* 94, 159–170. doi:10.1016/S0168-1923(99)00020-9
- Sohrabvandi, S., Mortazavian, A., Rezaei, K., 2012. Health-related aspects of beer: a review. *Int. J. Food Prop.* 15, 350–373.
- Steiner, E., Back, W., 2009. A critical review of protein assays and further aspects of new methods in brewingscience. *Brew Sci* 62, 90–94.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289–307.
- Suriharn, B., Patanothai, A., Boote, K.J., Hoogenboom, G., 2011. Designing a Peanut Ideotype for a Target Environment Using the CSM-CROPGRO-Peanut Model. *Crop Sci.* 51, 1887–1902.
- Stratonovitch, P., Semenov, M.A., 2010. Calibration of a crop simulation model using an evolutionary algorithm with self-adaptation. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 2, 7749–7750. doi:10.1016/j.sbspro.2010.05.210

- Tanksley, S.D., McCouch, S.R., 1997. Seed banks and molecular maps: unlocking genetic potential from the wild. *Science* 277, 1063–1066.
- Tao, F., Rötter, R.P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C., Mínguez, M.I., Semenov, M.A., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Cammarano, D., Hoffmann, H., others, 2017. Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *Eur. J. Agron.* 82, 144–162.
- Tao, F., Zhang, Z., 2013. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agric. For. Meteorol.* 170, 146–165.
- Tardieu, F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends Plant Sci.* 8, 9–14. doi:10.1016/S1360-1385(02)00008-0
- Tilman, D., 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 5995–6000. doi:10.1073/pnas.96.11.5995
- Tilman, D., Clark, M., 2015. Food, Agriculture & the Environment: Can We Feed the World & Save the Earth? *Daedalus* 144, 8–23. doi:10.1162/DAED\_a\_00350
- Tollenaar, M., Lee, E.A., 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75, 161–169. doi:10.1016/S0378-4290(02)00024-2
- Tsunoda, S., 1962. A Developmental Analysis of Yielding Ability in Varieties of Field Crops: IV. Quantitative and spatial development of the stem-system. *Jpn. J. Breed.* 12, 49–56.
- Ullrich, S.E., 2011. Significance, Adaptation, Production, and Trade of Barley, in: Ullrich, S.E. (Ed.), *Barley*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 3–13. doi:10.1002/9780470958636.ch1
- van de Wouw, M., van Hintum, T., Kik, C., van Treuren, R., Visser, B., 2010. Genetic diversity trends in twentieth century crop cultivars: a meta analysis. *Theor. Appl. Genet.* 120, 1241–1252. doi:10.1007/s00122-009-1252-6
- Van der Voet, P., Van Diepen, C., Voshaar, J.O., 1994. Spatial interpolation of daily meteorological data. *Knowl.-Based* 105.
- Van Eeuwijk, F.A., 1995. Linear and bilinear models for the analysis of multi-environment trials: I. An inventory of models. *Euphytica* 84, 1–7.
- Van Oijen, M., Dreccer, M., Firsching, K.-H., Schnieders, B., 2004. Simple equations for dynamic models of the effects of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on light-use efficiency and growth of crops. *Ecol. Model.* 179, 39–60.
- Vanloqueren, G., Baret, P.V., 2008. Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural “lock-in” case study. *Ecol. Econ.* 66, 436–446. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.10.007
- Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., Milner, M., Cassman, K.G., 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.* 143, 34–43.
- Vargas, M., Crossa, J., van Eeuwijk, F.A., Ramirez, M.E., Sayre, K., 1999. Using partial least squares regression, factorial regression, and AMMI models for interpreting genotype × environment interaction. *Crop Sci.* 39, 955–967.
- Vasileiadis, V., Moonen, A., Sattin, M., Otto, S., Pons, X., Kudsk, P., Veres, A., Dorner, Z., Van der Weide, R., Marraccini, E., others, 2013. Sustainability of European maize-based cropping systems: economic, environmental and social assessment of current and proposed innovative IPM-based systems. *Eur. J. Agron.* 48, 1–11.
- Vela, N., Pérez, G., Navarro, G., Navarro, S., 2007. Gas chromatographic determination of pesticide residues in malt, spent grains, wort, and beer with electron capture detection and mass spectrometry. *J. AOAC Int.* 90, 544–549.
- Vereijken, P., 1989. Experimental systems of integrated and organic wheat production. *Agric. Syst.* 30, 187–197. doi:10.1016/0308-521X(89)90046-2
- Viaux, P., 1999. *Une 3e voie en grande culture: environnement, qualité, rentabilité*. France Agricole Editions.
- Virtanen, Y., Katajajuuri, J.-M., Usva, K., others, 2007. An analysis of the total environmental impact of barley-malt-beer chain, in: 31st EBC Conference, Venice. p. 9.



- Vocanson, A., 2006. Ex ante assessment of varietal innovations in winter pea (*Pisum sativum* L.): Modelling approach at the plot and farm scales. INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON, Paris.
- Voltas, J., López-Córcoles, H., Borrás, G., 2005. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. *Eur. J. Agron.* 22, 309–324.
- Voltas, J., van Eeuwijk, F., Igartua, E., del Moral, L.G., Molina-Cano, J.L., Romagosa, I., 2002. Genotype by environment interaction and adaptation in barley breeding: basic concepts and methods of analysis. *Barley Sci. Recent Adv. Mol. Biol. Agron. Yield Qual.* 205–241.
- Voltas, J., van Eeuwijk, F.A., Araus, J.L., Romagosa, I., 1999a. Integrating statistical and ecophysiological analyses of genotype by environment interaction for grain filling of barley II: Grain growth. *Field Crops Res.* 62, 75–84. doi:10.1016/S0378-4290(99)00007-6
- Voltas, J., van Eeuwijk, F.A., Sombrero, A., Lafarga, A., Igartua, E., Romagosa, I., 1999b. Integrating statistical and ecophysiological analyses of genotype by environment interaction for grain filling of barley I: Individual grain weight. *Field Crops Res.* 62, 63–74. doi:10.1016/S0378-4290(99)00006-4
- Vries, F.P. de, 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Int. Rice Res. Inst.*
- Wales, A., 2014. Making sustainable beer. *Nat. Clim. Change* 4, 316–318. doi:10.1038/nclimate2220
- Wallach, D., Mearns, L.O., Ruane, A.C., Rötter, R.P., Asseng, S., 2016. Lessons from climate modeling on the design and use of ensembles for crop modeling. *Clim. Change* 139, 551–564. doi:10.1007/s10584-016-1803-1
- Warzecha, T., Adamski, T., Kaczmarek, Z., Surma, M., Chełkowski, J., Wiśniewska, H., Krystkowiak, K., Kuczyńska, A., 2011. Genotype-by-environment interaction of barley DH lines infected with *Fusarium culmorum* (W.G.Sm.) Sacc. *Field Crops Res.* 120, 21–30. doi:10.1016/j.fcr.2010.08.009
- Wiesler, F., Behrens, T., Horst, W.J., 2001. Nitrogen efficiency of contrasting rape ideotypes, in: Horst, W.J., Schenk, M.K., Bürkert, A., Claassen, N., Flessa, H., Frommer, W.B., Goldbach, H., Olf, H.-W., Römheld, V., Sattelmacher, B., Schmidhalter, U., Schubert, S., v. Wirén, N., Wittenmayer, L. (Eds.), *Plant Nutrition*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 60–61. doi:10.1007/0-306-47624-X\_28
- Williams, A.G., Mekonen, S., others, 2014. Environmental performance of traditional beer production in a micro-brewery, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014)*, San Francisco, California, USA, 8-10 October, 2014. American Center for Life Cycle Assessment, pp. 1535–1540.
- Wortman, S.E., Francis, C.A., Galusha, T.D., Hoagland, C., Van Wart, J., Baenziger, P.S., Hoegemeyer, T., Johnson, M., 2013. Evaluating Cultivars for Organic Farming: Maize, Soybean, and Wheat Genotype by System Interactions in Eastern Nebraska. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 37, 915–932. doi:10.1080/21683565.2013.764956
- Yin, X., 2005. QTL analysis and QTL-based prediction of flowering phenology in recombinant inbred lines of barley. *J. Exp. Bot.* 56, 967–976. doi:10.1093/jxb/eri090
- Yin, X., Kersebaum, K.C., Kollas, C., Manevski, K., Baby, S., Beaudoin, N., Öztürk, I., Gaiser, T., Wu, L., Hoffmann, M., others, 2017. Performance of process-based models for simulation of grain N in crop rotations across Europe. *Agric. Syst.* 154, 63–77.
- Yoshida, S., 1972. Physiological aspects of grain yield. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 23, 437–464.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14, 415–421. doi:10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x
- Zhang, G., Li, C. (Eds.), 2009. *Genetics and improvement of barley malt quality, Advanced topics in science and technology in China*. Zhejiang University Press ; Springer, Hangzhou : Dordrecht.
- Zhang, X.Y., Loyce, C., Meynard, J.M., Savary, S., 2006. Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Prot.* 25, 1013–1023. doi:10.1016/j.cropro.2006.01.013

- Zhang, D.-Y., Sun, G.-J., Jiang, X.-H., 1999. Donald's ideotype and growth redundancy: a game theoretical analysis. *Field Crops Res.* 61, 179–187. doi:10.1016/S0378-4290(98)00156-7
- Zhao, F., Xu, S., 2012. Genotype by Environment Interaction of Quantitative Traits: A Case Study in Barley. *G3 GenesGenomesGenetics* 2, 779–788. doi:10.1534/g3.112.002980

## List of Figures

### Introduction

Figure 1. Production totale d'orge par pays en 2014 .....	12
Figure 2. Surface totale d'orge brassicole emblavée pour les principales zone de production et répartition des surfaces entre orge d'hiver et orge de printemps .....	12
Figure 3. Évolution des surfaces cultivées en orge d'hiver et en orge de printemps. ....	14
Figure 4. Inflorescence d'orge 2-rangs et d'orge 6-rangs .....	14
Figure 5. Représentation schématique des étapes de maltage et de brassage .....	18
Figure 6. Coupe d'endosperme d'orge .....	20
Figure 7. Exemple de rendements observés sur 9 géotypes et 27 environnements.....	25
Figure 8. Effet de la résistance variétale et de l'itinéraire technique sur les pressions .....	31
Figure 9. Fréquence d'utilisation de la notion d'idéotype dans les publications .....	40
Figure 10. Schéma des combinaisons de caractéristiques génotypiques et des modalités de la conduite culturale favorables aux itinéraires techniques à bas niveau d'intrants en blé.....	42
Figure 11. Schéma de la démarche de conception d'idéotype formalisée .....	44
Figure 12. Démarche générale utilisée pendant la thèse. ....	47
Figure 13. Localisation géographique des sites expérimentaux .....	55
Figure 14. Exemple de dispositif expérimental.....	56
Figure 15. Présentation schématique du modèle de culture Azodyn-blé .....	60

### Chapter 1

Figure 1. 1. Quantitative and qualitative performances of the genotypes in the high-input and low-input systems. ....	64
Figure 1. 2. Multi-criteria assessment of the genotypes in the high-input system and the low-nitrogen no-pesticides system.. ....	67

### Chapter 2

Figure 2. 1. N stress tolerance stability according to their mean tolerance to N stress. ....	90
Figure 2.2. Correlations between genotypic characteristics and the first and second latent variables explaining the calibrated yield loss ratio. Projection of the genotypes on the two first latent variables, and estimated <i>vs.</i> mean calibrated yield ratio of genotypes .....	93
Figure 2. 3. Correlations between genotypic characteristics and the first latent variables explaining the grain protein loss ratio. Projection of the genotypes on the first latent variable and estimated <i>vs.</i> mean grain protein ratio of genotypes .....	95
Figure 2. 4 Mean relative calibrated yield loss <i>vs.</i> calibrated yield .....	98

### Chapter 3

Figure 3. 1. Estimated <i>versus.</i> observed grain retention fraction .....	128
Figure 3. 2. Simulated <i>vs.</i> observed values of grain yield, calibrated grain yield, grain protein content and retention fraction . ....	130
Figure 3. 3. Percentage of situations in which the model correctly ranked the genotypes for yield (a), calibrated yield (b), grain protein content (c), retention fraction (d), thousand-kernel weight (e), and number of grains per square meter (f).....	133
Figure 3. 4. Variability in the capacity of the crop model to rank environment values and to rank genotypic values.....	134

**Chapter 4**

Figure 4. 1. Mean yield of barley for the 35 <i>départements</i> over the 1989-2013 period.	154
Figure 4. 2. Observed <i>vs.</i> predicted grain yields for winter barley for each of the 25 years.....	156
Figure 4. 3 Characterization of the 4 main climatic-stress patterns affecting barley yields in the 875 French <i>département</i> -by-year combinations..	157
Figure 4. 4. Temporal structure of the climatic-stress patterns: .....	159
Figure 4. 5. Geographic structure of the climatic-stress patterns: .....	159

**Chapter 5**

Figure 5. 1. Mean simulated values and standard errors of the 45 N fertilization strategies over the 25 climatic years for Calibrated grain yield, Grain protein content and N losses in the 3 geographical clusters	181
Figure 5. 2. <i>Pareto</i> optimal solutions based over the 25 years mean values <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Figure 5. 3. Pareto Optimal N fertilization over the 25% lowest yielding years. ....	184
Figure 5. 4. Mean simulated Nitrogen Nutrition Index (NNI). ....	186

**Chapter 6**

Figure 6. 1. Calibrated yield, grain protein content, and N losses for the two contrasted conditions for the sensitivity analysis.	207
Figure 6. 2. Sensitivity indices for the calibrated yield, grain protein content and N losses for 10 parameters of the Azodyn-Barley crop model. ....	207
Figure 6. 3. Calibrated yield and score of grain protein content of the 500 virtual genotypes in the low-N management system.....	210
Figure 6. 4. Profiles of genotypes.....	212
Figure 6. 5. Calibrated yield and score of grain protein content of the 500 virtual genotypes in the low-N management system for each geographical cluster.....	213

# List of Tables

## Introduction

Table 1. Moyenne nationale annuelle des calibrages et teneur en protéines des principales variétés d'orge d'hiver 6 rangs cultivées en France.....	22
Table 2. Modèles de culture en orge utilisés par <i>Tao et al.</i> , (2017).....	39
Table 3. Distance entre station météorologique et site expérimentaux .....	58

## Chapter 1

Table 1.1 Description of the pedoclimatic characteristics of the 12 site-year experiments	60
Table 1.2. Percent of the variance of malting criteria explained by environment, management, genotype and their interactions.....	63
Table 1.3. Grain yield, grain protein content, grain retention fraction and proportion of genotypes for which grain protein content and grain retention fraction fulfilled the malting criteria in each management system .....	63
Table 1.4. Pearson correlations between the genotypic capacity to fulfill malting quality, grain protein content, and grain retention fraction requirements, and the mean genotypic grain yield or calibrated grain yield	65

## Chapter 2

Table 2.1. Genotypic characteristics measured in the non-stressed situation.....	86
Table 2.2. Correlation matrix between genotypic relative grain protein content loss, relative calibrated yield loss and main productivity criteria measured at harvest in non N-tress system: .....	92
Table 2.3. Coefficient of the PLS model for the estimation of the calibrated yield ratio.....	92
Table 2.4. Coefficients of the PLS model for the estimation of the grain protein ratio.....	94

## Chapter 3

Table 3. 1. Main equations, corresponding submodels, list of variable.....	123
Table 3.2. Species-dependent parameters of the Azodyn-Barley model estimated by literature review .....	126
Table 3.3. Species-dependent parameters of the Azodyn-Barley model estimated in specific experimental trials. ....	126
Table 3. 4. Genotype-dependent parameters of the Azodyn-Barley model estimated in specific experimental trials.. ....	127
Table 3. 5. Proportion of the variation explained by each factor and estimation of the parameter of the grain retention fraction submodel.....	128
Table 3. 6. Root mean square error of prediction, relative root mean square error of prediction, bias and ratio between the SD of Azodyn and the average model.....	129
Table 3. 7. Proportion of situations for which the Azodyn crop model and the average model correctly ranked each pair of genotypic mean.....	131

## Chapter 4

Table 4.1. Description of the climatic factors potentially affecting barley yield .....	151
Table 4.2. Mean value for main climatic variables over the 35 <i>département</i> .....	155

## Chapter 5

Table 5.1. Rate and splitting of the 45 N-fertilization strategies.....	178
Table 5.2. Proportion of years with a N application postponed by at least 10 days in the 3 geographical clusters (GC), as function of the target date of N supply.....	182
Table 5.3. Agronomic and environmental mean performances over the 25 years for the best N fertilization strategies identified through Pareto optimal solutions.....	185



## List of Publications and communications

### Peer-review publications from the present doctoral thesis

- **Beillouin D.**, Jeuffroy M.H., Herbonomez J.F., Perrot C., Gauffreteau A. (submitted). Assessment of the yield and quality of malting barley genotypes in a low-input system in France. European journal of agronomy.
- **Beillouin D.**, Jeuffroy M.H., Gauffreteau A. (submitted). Which genotypic characteristics allow to maintain grain yield and quality performance in winter barley under nitrogen stress? European journal of agronomy.
- **Beillouin D.**, Leclere M., Barbu C., Benezit M., Trepos R., Gauffreteau A., Jeuffroy M.H. (submitted). 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.
- **Beillouin D.**, Jeuffroy M.H., Gauffreteau A. (submitted). Characterization of spatial and temporal combinations of climatic factors affecting yields: an empirical model applied to the French barley belt. Agricultural and forest meteorology.
- **Beillouin D.**, Trépos R., Gauffreteau A., Jeuffroy M.H. (submitted). Model-based design of Nitrogen management strategies to reduce N losses and reach high yield and grain quality in the French barley belt. Nutrient cycling in agroecosystems
- **Beillouin D.**, Jeuffroy M.H., Gauffreteau A., Trépos R. (in prep). Combinations of genotypic traits for a high quantitative and qualitative malting barley production in low-N situations: model-based design in the French barley belt.

### Other peer-review publications related to the PhD work

- Ravier C, Sabatier R, Meynard J.M, Trépos R., **Beillouin D.**, Jeuffroy M.H (submitted). Viability-based assessment of the robustness of model-based decision rules for managing N fertilization on winter wheat . European journal of Agronomy.
- **Beillouin D.**, Jeuffroy M.H., Cadot. V, Masson F. Soyez J., Gauffreteau A. (in prep.) Modeling the effect of genotype resistance on yield losses of winter barley in natural multiple disease conditions.

### Conference Presentation

- **Beillouin D.**, Herbonomez, J-F., Perrot. C., Jeuffroy . M-H., Gauffreteau A. 2016. Which malting barley genotype characteristics are adapted to low-input system: an experimental approach, Poster and flash and dash presentation, in Proceedings of the 12th international Barley genetics symposium, Minneapolis, Minnesota (USA)

### **Other presentations**

- **Beillouin, D.**, 2016. Impact of lowering nitrogen fertilization and pesticides on malting quality. Oral Presentation. Group of 10 farmers– 05 Feb 2016 – Grignon, France
- **Beillouin, D.** Benezit, M. 2016. Evolution of the AZODYN-model to predict barley, pea, oilseed rape and wheat quantitative and qualitative production. Oral presentation. Modeling community “RECORD”, Avignon-France- 22 May 2016.
- **Beillouin, D.**, 2015 and 2016. Production of winter malting barley in low-input management system: design and evaluation of variety and management ideotypes. Oral Presentation. Annual meeting of farm advisors working on low-input systems– 11 Jan 2015 21 Sept 2016 – Paris, France
- **Beillouin, D.** 2017. Design and evaluation of management and barley malting cultivars adapted to low-input systems– 01 Jun 2017 – Community IDEAS (Institute for Design in Agrifood Systems), Grignon, France

### **Scientific poster**

- **Beillouin, D.**, Gauffreteau, A., Jeuffroy, M.-H., 2015. Winter malting barley genotypes adapted to low-input system, Poster ABIES PhD school
- **Beillouin, D.**, Herbommez, J.-F., Perrot, C., Gauffreteau, A., Jeuffroy, M.-H., 2015. Experimental assessment of winter malting barley genotypes in low-input system, Poster in Proceedings of the 5th International Symposium for Farming Systems Design. Gritti Emmanuel S. – Wery Jacques, Montpellier (FRANCE), p. 551.
- **Beillouin D.**, Leclere, M., Trepos, R., Gauffreteau, A., Jeuffroy, M-H. 2016. Development and evaluation of a genotypic dynamic crop model for barley, Poster in Proceedings of the 12th international Barley genetics symposium, Minneapolis, Minnesota (USA)





**Titre :** 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

**Mots clés :** Azote, modèle de culture, sélection, interaction génotype X Environnement, Conduite culturale

**Résumé :**

La France est l'un des premiers producteurs européens d'orge brassicole (*Hordeum vulgare L.*) et le premier exportateur mondial de malt. La production d'orge brassicole repose actuellement sur une utilisation massive d'intrants de synthèse et entraîne comme d'autres grandes cultures des impacts négatifs sur l'environnement et la santé des consommateurs. Ce travail a pour objectif de concevoir et d'évaluer des variétés et des itinéraires techniques pour cette espèce permettant une production quantitative et qualitative élevée avec un moindre recours aux intrants de synthèse.

À partir d'un réseau d'essai multilocal, nous montrons que la teneur en protéines et le rendement calibré (poids des grains >2.5 mm) des orges brassicoles doivent être spécifiquement améliorés pour les conduites techniques en bas niveau d'intrants. Sur cette base, nous avons identifié les caractéristiques variétales favorables à une faible perte de teneur en protéines et de rendement calibré en situation de stress azoté.

Puis, après avoir développé un modèle de culture adapté à cette espèce, nous avons identifié des stratégies de fertilisation azotées offrant les meilleurs compromis entre production quantitative et qualitative, tout en minimisant les pertes en azote vers l'environnement. Grâce à une caractérisation précise des environnements de production français, les meilleures stratégies de fertilisation azotée ont été identifiées localement. Enfin, nous avons identifié de nouvelles combinaisons de caractéristiques variétales permettant d'optimiser la production d'orge dans des situations d'intrants réduits. Nous montrons *in silico*, qu'adapter simultanément les caractéristiques variétales et de l'itinéraire technique permet d'atteindre des performances comparables aux variétés actuelles dans des itinéraires techniques avec recours intensif aux intrants.

Nous discutons des méthodes de sélection adaptées pour identifier les variétés les plus performantes dans des situations d'intrant réduit. Enfin, nous revenons sur la démarche de conception mobilisée.

**Title:** Design and evaluation of management and barley malting cultivars adapted to low-input systems: an experimental and model approach

**Keywords:** Nitrogen, crop model, breeding, genotype by Environment interaction, crop management

**Abstract :**

France is the largest European producer of malting barley (*Hordeum vulgare L.*) and the leading exporter of malt worldwide, accounting for 20% of world trade. French barley production has relied heavily on the use of synthetic inputs and has led, as other arable crops, to considerable environmental damage. The aim of this study is to design and evaluate crop and management ideotype adapted to a lower use of synthetic fertilizer.

From a multi-environment trial, we conclude that the grain protein content and the calibrated yield (weight of grains >2.5 mm) have to be specifically improved in low-input management systems. We experimentally identified genotypic characteristics adapted to a low grain protein content loss and calibrated yield loss under N stress. With a crop model we adapted to malting barley, we also identified optimal N

fertilization strategies allowing to reach high quantitative and qualitative performances whilst minimizing N losses toward the environment. Based on a precise characterization of environments the French barley belt, the best N fertilization strategies were identified for different regions. Finally, we identified new combinations of genotypic characteristics optimizing quantitative and qualitative performances in low management system. We showed that, *in silico*, a simultaneous adaptation of genotypic characteristics and optimization of N fertilization management allowed to reach similar performances as current genotypes in high-input management systems.

We discuss methods to breed genotypes with high performances in low-input systems and the method used for innovative design of new management and barley malting cultivars adapted to low-input systems.

