

Décembre 2014
volume n° 4 / numéro n° 2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

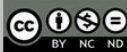
environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie



Variétés et systèmes de culture

Quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?



Agronomie, Environnement & Sociétés est une revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie (AFA) sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes. L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux

Designing variety ideotypes for new agricultural and environmental concerns

Philippe DEBAEKE*¹
Arnaud GAUFFRETEAU²
Charles-Eric DUREL³
Marie-Hélène JEUFFROY²

¹INRA - Inra- UMR Agir - 24, chemin de Borde-Rouge
CS 52627 - 31326 Castanet Tolosan

E-mail : debaeke@toulouse.inra.fr

²INRA - UMR Agronomie - INRA/AgroParisTech - Bâtiment EGER
78850 - Thiverval-Grignon - E-mail : gauffret@grignon.inra.fr
jeuffroy@grignon.inra.fr

³INRA - UMR IRHS - 42, rue Georges Morel - Boîte Postale 60057
49071 Beaucozéd Cedex

E-mail : charles-eric.durel@angers.inra.fr

Résumé

La création, l'évaluation et le choix variétal doivent répondre à des objectifs de plus en plus diversifiés. Dans un contexte de plus forte incertitude climatique, économique et réglementaire, les idéotypes variétaux actuels mais aussi les méthodes pour les concevoir et les évaluer doivent être revus. L'idéotypage variétal, introduit par les sélectionneurs (Donald, 1968), peut également s'appliquer à la définition de la variété la mieux adaptée à une situation de production donnée. Pour construire des idéotypes, une démarche en trois étapes est proposée: (i) définition d'un ou plusieurs cahiers des charges; (ii) conception et construction des idéotypes répondant à ce(s) cahier(s) des charges; (iii) évaluation des idéotypes construits. La phase de conception peut mobiliser dires d'experts, expérimentations multi-locales, modèles qualitatifs ou quantitatifs. Cette démarche pluri-disciplinaire, ici illustrée sur la culture du pois, aide à organiser la réflexion sur la création et le conseil variétal au sein des filières. Dans ces deux domaines, les outils et méthodes d'idéotypage restent encore largement à construire.

Mots-clés

Idéotype, conception, interaction génotype x environnement, modélisation.

Abstract

Plant breeding, variety assessment and choice have to answer to multiple and diversified goals. In a context of greater climatic, economic and regulatory uncertainty, current variety ideotypes but also methods used to design and evaluate them must be reconsidered. The variety ideotyping concept developed by breeders (Donald, 1968) can be extended to the search of the commercial variety best adapted to a given production situation. To build relevant ideotypes, a three-stage approach is proposed: (i) definition of one or more specifications; (ii) design and assembling of ideotypes responding to the specification(s); (iii) assessment of the ideotypes. The design phase can mobilize expert knowledge, multi-environmental trials, qualitative or quantitative models. Illustrated on pea crop, this multidisciplinary

approach helps organize breeding and variety advice among sectors. In these domains, tools and methods are still to be built.

Key-words

Ideotype, design, genotype by environment interaction, modelling.

Évolution récente de la création variétale

La création, l'évaluation et le choix variétal doivent répondre à des objectifs de plus en plus diversifiés pour faire face aux besoins d'une agriculture à double performance économique et environnementale, de cahiers des charges « bas intrants », et d'une agriculture biologique en croissance, dans un contexte de plus forte incertitude climatique, économique et réglementaire (van Bueren et al., 2002). Cette exigence n'a fait que s'amplifier depuis les années 1990, lorsque les préoccupations environnementales se sont exprimées et plus généralement lorsque les objectifs de contribution de l'agriculture au développement durable se sont affirmés (Meynard et al., 1997; Meynard et Jeuffroy, 2006).

Ainsi, en céréales à paille, la logique de l'intensification culturelle initiée dans les années 1970 (avancement des dates de semis, mobilisation accrue de traitements fongicides et systématique de régulateurs de croissance, apports d'azote élevés) privilégiait avant tout des variétés productives. En effet, les risques agronomiques induits par la recherche d'un rendement élevé (permis par les apports d'engrais et les semis précoces) étaient contrôlés par l'application d'intrants phytosanitaires à effets correctifs ou préventifs. Progressivement, d'autres critères de choix variétal ont pris de l'importance (par exemple, la qualité du grain pour répondre aux besoins des marchés). Puis, anticipant une demande de variétés adaptées à des systèmes moins intensifs, la sélection s'est orientée vers des variétés de blé plus rustiques, multi-résistantes aux maladies fongiques et à la verse. Par ailleurs, pour trouver des solutions alternatives à l'usage exclusif des herbicides, au développement d'adventices résistantes et au renchérissement des coûts de désherbage chimique et mécanique, l'aptitude à la compétition des variétés de céréales est devenue un critère d'intérêt pour la sélection et le conseil, en particulier en agriculture biologique (Fontaine et al., 2009).

Si l'adaptation du choix variétal aux conditions pédoclimatiques et aux usages visés (blé biscuitier, blé améliorant, blé fourrager) est depuis longtemps mise en œuvre, ce n'est que plus récemment que, sur la base de travaux initiés à la demande des sélectionneurs, l'intérêt d'un choix conjoint des variétés et des itinéraires techniques a été démontrée de manière structurée et multicritères sur blé tendre (Loyce et al., 2002; 2008), et a été suggérée sur d'autres espèces comme le blé dur (Debaeke et al., 2000) ou le tournesol (Debaeke et Nolot, 2000). Aujourd'hui, la question du raisonnement du couple « variété-conduite de culture » ne fait plus débat dans le milieu scientifique, même si ce n'est pas toujours la question privilégiée par les généticiens. Cependant, adapter le mode d'emploi d'une variété à ses caractéristiques propres, ou à l'inverse, choisir une variété en fonction d'un type de conduite privilégié, restent des pratiques à faire partager par un plus grand nombre (agriculteurs et conseillers).

Différencier le choix variétal selon les environnements et les conduites consiste à valoriser les interactions génotype x

environnement (et génotype x environnement x conduite). Des travaux récents menés dans le cadre du GIS Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques et Environnementales par Arvalis-Institut du végétal (blé) et le Cetiom (colza, tournesol) sur les réseaux d'essais de post-inscription montrent que l'effet environnement (E) explique 70-88 % de la variabilité du rendement, alors que les effets génotype (G) et G x E n'expliquent respectivement que 1-7 % et 3-13 % du rendement (Lorgeou et al., non publié). Par contre, dès lors que l'on sort des réseaux d'évaluation caractérisés par de bons potentiels pédoclimatiques et des facteurs limitants maîtrisés, on doit s'attendre à des interactions G x E plus marquées. Pour mieux valoriser les interactions G x E x C, il est important de connaître et prédire la réponse des variétés aux facteurs agronomiques et environnementaux. Cependant, la connaissance de cette réponse reste trop partielle (notamment pour ce qui concerne les stress abiotiques) et non suffisamment objectivée, ni caractérisée, pour que l'on puisse adapter en pratique les choix variétaux aux contraintes hydriques ou nutritionnelles. Lorsque des outils d'aide au choix variétal existent (par exemple, MyVar® développé par le Cetiom), ils se limitent à la prise en compte de la précocité et du comportement variétal face aux maladies.

De son côté, l'inscription officielle des variétés au catalogue par le CTPS a évolué vers une approche multicritères (à côté du rendement, ont été progressivement pris en compte des critères de qualité technologique, précocité, résistance aux maladies et à la verse) donnant lieu à une cotation plus équilibrée et à une plus forte diversification de l'offre variétale. Cependant, une variété qui serait très bien adaptée à un environnement cible particulier, mais moins bien à d'autres, induisant une performance moyenne inférieure à celle des témoins, risquerait de ne pas être retenue par le CTPS car elle pourrait être pénalisée par son instabilité.

L'annonce et la perception d'un changement climatique caractérisé par une augmentation des températures et de la fréquence des événements de sécheresse, s'accompagnant d'une plus forte variabilité inter-annuelle et inter-saisonnière, oblige actuellement les sélectionneurs à réviser leur caractérisation des environnements cibles et les cibles mêmes de la sélection (quels traits ? quelle combinaison de traits ? pour quelle cible : productivité maximale ou stabilité ?) (e.g. Zheng et al., 2012). Aujourd'hui, la recherche d'innovations variétales prend en compte plus explicitement l'adaptation au changement climatique ; c'est un objectif affiché de la collaboration public-privé notamment en blé, maïs, pois, tournesol et pour les productions bio-énergétiques (projets Investissements d'Avenir).

Ainsi, les changements de contexte climatique mais aussi réglementaire (par exemple, réduction des apports d'eau, d'azote et de pesticides) imposent de revoir en profondeur les propriétés des types variétaux disponibles sur le marché, et donc de réviser les idéotypes qui guident implicitement le travail des sélectionneurs. Pour cela, un cadre et des méthodes s'imposent pour concevoir et évaluer les idéotypes et les variétés innovantes issues de la sélection mais aussi pour construire des modes d'emploi pour ces variétés en fonction des cahiers des charges et des zones agroclimatiques.

Le concept d'idéotype

Le concept d'idéotype a été proposé au départ par Donald (1968) comme cadre de réflexion pour renouveler et structurer les approches empiriques de sélection pour le rendement ou d'élimination des défauts majeurs. Appliqué aux espèces d'intérêt agricole, un idéotype est un modèle de plante traduisant l'idée que le sélectionneur se fait de la plante à sélectionner pour un environnement donné et qui ne correspond pas nécessairement à la plante idéale (Zeven, 1975). Donald (1968) définit notamment l'idéotype comme 'un modèle biologique dont on attend qu'il se comporte d'une manière prédictible dans un environnement défini'. Ceci suppose de détailler plus finement le fonctionnement écophysologique de la plante et d'identifier des caractères à sélectionner. C'est pourquoi, dans le cadre d'une école chercheurs sur la conception d'idéotypes¹ (Debaeke et Quilot-Turion, 2014), nous avons défini l'idéotype comme « la combinaison optimale des caractères morphologiques et physiologiques (traits) ou de leurs déterminants génétiques conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un environnement, à un mode de production et d'utilisation donnés », élargissant encore la nature des traits et des cibles de sélection.

La sélection sur idéotype (« ideotype breeding »), qui s'appuie sur le concept précédent, dispose ainsi d'objectifs plus formalisés, séquentiels et détaillés que la sélection traditionnelle sur objectifs globaux (Rasmusson, 1991 ; Sedgley, 1991). Le principe de la sélection sur idéotype a été initialement développé sur plantes annuelles (Mock et Pearce, 1975 ; Rasmusson, 1987 ; Peng et al., 2008 ; Hanocq et al., 2009), et s'est progressivement étendu aux espèces forestières ou fruitières (Dickmann et al., 1994 ; Socias et al., 1998 ; Lauri et Costes, 2005 ; Cilas et al., 2006), soulignant la généralité de l'approche.

Depuis l'article fondateur de Donald en 1968, le nombre de publications se référant à la notion d'idéotype a régulièrement augmenté (Desclaux et al., 2013), même si un effectif de 15 articles par an, incluant cette notion dans le titre ou les mots-clés, n'attestent pas d'un emploi massif et explicite du concept. Les articles concernent la définition empirique d'un idéotype pour différents contextes de production (articles anciens), ou la conception/évaluation par modèle d'un assemblage de traits pour des conditions agroclimatiques variables, plus rarement pour des systèmes de culture contrastés (articles plus récents). Le concept est communément cité mais les travaux sur la conception (design) par modèle ou par d'autres voies sont encore rares.

Si la littérature utilise le concept pour se référer à un objectif de sélection, on ne trouve pas beaucoup d'exemples illustrant nettement les progrès permis par une sélection explicitement fondée sur cette notion. Sur riz, Peng et al. (2008) rapportent une augmentation de 8-15 % du rendement avec une sélection fondée sur des caractères morpho-physiologiques par rapport à la sélection classique fondée sur le rendement : ainsi, ce progrès important aurait été permis par un positionnement des trois dernières feuilles vis-à-vis de la panicule optimisant les relations source-puits.

¹ Ecole-Chercheurs « Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable », du 22 au 25 octobre 2012, Seillac (41)

Concevoir un idéotype, c'est évaluer *ex ante* la valeur d'un trait donné ou de combinaisons de traits en vue de l'atteinte d'un objectif cible (en général le rendement). Ceci suppose néanmoins de s'assurer qu'il existe du polymorphisme au sein des ressources génétiques pour les traits en question. De même, la recherche des types variétaux les mieux adaptés à une situation de production donnée (sol, climat, itinéraire technique) peut s'appuyer sur la prédiction des effets sur le rendement de différentes combinaisons de traits morpho-physiologiques. De ce fait, proposer un idéotype pour orienter la sélection ou choisir une variété pour un contexte donné relève sensiblement des mêmes approches de conception bien que la base génétique sous-jacente est bien différente dans les deux cas.

En dépit d'une littérature abondante sur la nature des traits à sélectionner, la notion d'idéotype qui est sous-jacente est restée relativement conceptuelle depuis les travaux de Donald et force est de constater qu'il manque un cadre global pour organiser la conception. Par ailleurs, si les travaux de modélisation relatifs à l'évaluation des traits d'intérêt se sont développés dans le monde académique, ils n'ont pas embarqué ni convaincu les acteurs de la sélection. C'est pourquoi, nous proposons ici une démarche structurée, séquentielle, pluri-disciplinaire, multi-acteurs, afin d'objectiver et préciser les étapes de la conception d'un idéotype qu'il s'agisse d'une réflexion *ex ante* pour éclairer la sélection ou de l'identification de variétés adaptées à un nouveau contexte. Dans les deux cas, il s'agira d'évaluer les caractéristiques favorables à combiner et les ressources génétiques mobilisables en impliquant les acteurs concernés.

Une démarche pour concevoir des idéotypes

Une réflexion collective menée dans le cadre du projet Endure², de l'école chercheurs Inra-Cirad¹ et d'un séminaire organisé par le GIS GC-HP2E en partenariat avec le GIS Fruits³ sur les idéotypes variétaux, a permis de formaliser une démarche pour concevoir des idéotypes de plantes.

Cette démarche présentée en Figure 1 (page suivante) comporte trois grandes étapes qui consistent à :

- (i) Définir des cahiers des charges pour les idéotypes de plantes (cadre Objectifs) ;
- (ii) Concevoir des idéotypes de plantes susceptibles de répondre à ce(s) cahier(s) des charges (cadre Conception) ;
- (iii) Évaluer la capacité des idéotypes conçus à répondre aux cahiers des charges précédemment définis (cadre Evaluation).

Le processus n'est pas linéaire, les étapes de conception-évaluation donnent lieu à des boucles de progrès, les idéotypes pouvant évoluer selon les résultats de leur évaluation.

Définition des cahiers des charges pour les idéotypes

Définir un cahier des charges consiste à lister et hiérarchiser les objectifs fixés pour les variétés à construire. Ces objectifs

dépendent du contexte de production et d'utilisation des variétés et de leurs produits. La première étape d'une démarche de conception d'idéotypes consiste donc à définir ce contexte particulier et à identifier les acteurs clefs porteurs d'attentes vis à vis des nouvelles variétés et qu'il faudra impliquer dans la démarche.

Ainsi, doivent être précisés le contexte environnemental et agronomique (zone géographique ciblée, conditions de culture biotiques et pédoclimatiques, systèmes de production ciblés...), le contexte économique (débouchés, filières, propriétés technologiques attendues...), le contexte écologique (niveau d'intensification écologique visé...) et le contexte social, politique et réglementaire (réglementation en vigueur, pression sociale, orientation politique particulière à prendre en compte...). Certains de ces éléments peuvent évoluer à des vitesses peu compatibles avec le temps nécessaire à la création de variétés (en particulier dans des filières où la durée entre les premiers croisements et l'inscription est particulièrement longue, comme en vigne et en arboriculture fruitière). Il peut donc être utile de considérer plusieurs scénarios contextuels, en les basant autant que possible sur des études prospectives, raisonner certains éléments du contexte en termes de risques et chercher à identifier les éléments invariants.

² Inventory of major points to consider during the process of elaborating ideotypes in the context of alternative or innovative systems. Deliverable DR4.13 du projet ENDURE (European Network for Durable Exploitation of crop protection strategies)

³ Séminaire « Idéotypes Variétaux », GIS GC-HP2E, 7 et 8 février 2013, Paris

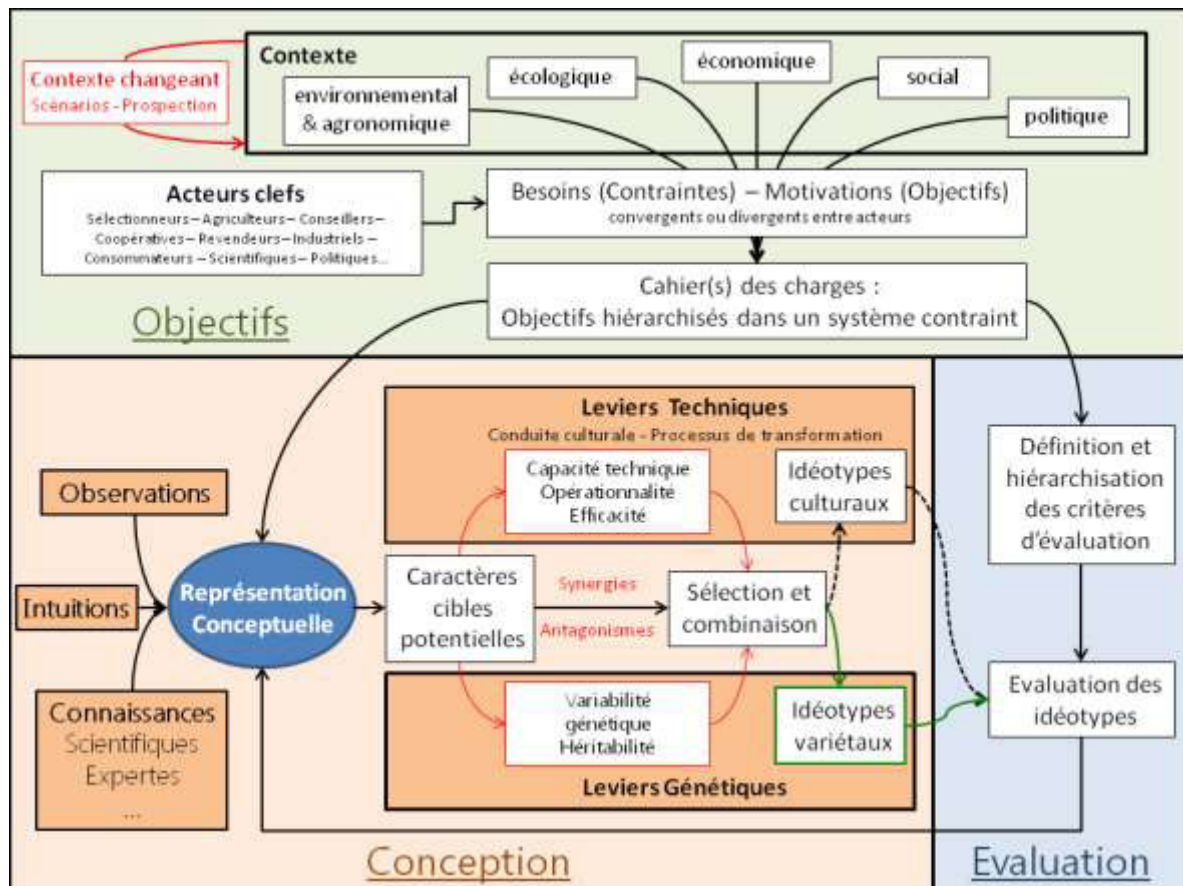


Figure 1 : Schéma de la démarche de conception-évaluation d'idéotypes

Les acteurs à impliquer dans la démarche dépendent du contexte précédemment défini. Parmi eux, nous pouvons trouver des obtenteurs des nouvelles variétés, des utilisateurs (agriculteurs, coopératives, industriels, consommateurs), des préconisateurs (instituts techniques, coopératives, négoce, chambres d'agriculture, industriels...) ou encore des acteurs plus institutionnels orientant fortement la sélection (CTPS, Ministère de l'Agriculture...). Les acteurs impliqués doivent préciser leurs contraintes (techniques, humaines, calendaires...) et leurs motivations (maximiser les revenus, stabiliser la production, améliorer la qualité du produit, limiter les intrants...). Ces contraintes et motivations appliquées au contexte de l'étude donnent lieu à des objectifs fixés pour la plante qui peuvent être convergents ou divergents entre acteurs. Un cahier des charges résulte donc d'une négociation et d'un consensus entre les acteurs. Ce travail doit notamment permettre d'identifier les leviers agronomiques (conduite de la culture, rotation...), technologiques (process de transformation...) ou organisationnels existant tout au long de la filière de production pour pallier les défauts éventuels des variétés et ainsi ne pas faire porter à la seule amélioration variétale toutes les attentes des différents acteurs de la filière.

Le cahier des charges défini dans cette première étape de la démarche ne doit pas être confondu avec la description d'un idéotype. En effet, les objectifs fixés dans un cahier des charges sont généralement des propriétés ou valeurs d'usage pour lesquelles il est attendu une amélioration par rapport au catalogue (rendement, résistance aux maladies

ou à la sécheresse...) alors qu'un idéotype doit se traduire *a minima* par des valeurs de traits morpho-physiologiques susceptibles de permettre aux plantes d'atteindre ces objectifs (par exemple, une capacité à maintenir une transpiration élevée pour des déficits hydriques importants ou une vitesse de couverture du sol rapide) et éventuellement par des caractéristiques moléculaires lorsque le déterminisme génétique des traits est connu. Ainsi, pour chaque cahier des charges établi, plusieurs idéotypes de plante peuvent être proposés.

Conception d'idéotypes de plantes

Cette étape est centrale dans la démarche, elle différencie la sélection sur idéotype de la sélection classique, qui considère généralement comme objectifs de sélection les spécifications du cahier des charges et non les traits morpho-physiologiques. La conception s'organise en deux temps.

- Dans un premier temps, une représentation conceptuelle de la plante que l'on cherche à obtenir est élaborée. Cette représentation s'apparente à un ensemble hiérarchisé de stratégies permettant de répondre aux différents éléments du cahier des charges. Par exemple, pour augmenter le rendement, on pense qu'il peut être utile d'augmenter la densité de peuplement et en conséquence de limiter la compétitivité entre plantes tout en renforçant la résistance à la verse ; pour améliorer la qualité des fruits, on pense qu'il faut agir sur l'architecture de l'arbre en favorisant un éclairage maximal de l'ensemble des branches et une répartition optimale des fruits. Cette étape ne pose pas encore la ques-

tion de la faisabilité des stratégies proposées. Elle invite les concepteurs à mobiliser des connaissances de nature variée plus ou moins formalisées (connaissances scientifiques ou expertes, observations, intuitions issues du vécu des différents acteurs) et facilite ainsi l'innovation notamment en rupture.

- Dans un second temps, l'idéotype correspondant à la représentation conceptuelle est construit. Les caractères de la plante ou du couvert végétal qui permettraient de mettre en œuvre les stratégies établies à l'étape précédente sont identifiés (vitesse de croissance, port de la plante, phénologie, mécanismes de résistance aux stress biotiques

et abiotiques...). Les leviers pour obtenir l'expression de ces caractères sont décrits et évalués. Deux grands types de leviers peuvent être actionnés : (i) des leviers génétiques mis en œuvre par la sélection qui pourront être évalués en termes de variabilité génétique et d'héritabilité associées à chaque caractère cible, mais aussi (ii) des leviers techniques issus de la conduite culturale (application d'un régulateur de croissance pour agir sur la taille des plantes, date de semis pour agir sur la densité du couvert végétal, taille pour agir sur l'architecture de l'arbre...) qui pourront être évalués selon leur faisabilité, leur opérationnalité et leur efficacité. De ce fait, on parlera d'idéotype cultural ou variétal selon que les caractéristiques recherchées seront permises par la conduite ou par le choix variétal. Ce travail doit permettre

de sélectionner les caractères élémentaires de la plante les moins difficiles à exprimer (par la technique ou la génétique) et les plus efficaces pour atteindre les objectifs fixés dans le cahier des charges. La combinaison des caractères élémentaires donnant lieu à l'idéotype doit faire l'objet d'une analyse préalable des synergies et antagonismes qui existent entre eux (corrélations génétiques et environnementales). Certains caractères peuvent en effet avoir une action positive sur certains éléments du cahier des charges et négatives sur d'autres éléments.

Cette étape de conception doit s'appuyer sur une compréhension et une intégration des mécanismes fins du fonctionnement de la plante. Elle nécessite de mobiliser des connaissances dans différentes disciplines telles que l'écophysiologie, la génétique, l'agronomie et la pathologie qui peuvent être formalisées grâce à des outils de modélisation (mécaniste, statistique, décisionnelle...). Elle favorise le dialogue entre les disciplines et entre les métiers (chercheurs, sélectionneurs, préconisateurs...) et permet d'identifier des verrous de connaissances qui appellent de nouvelles recherches.

La phase de conception peut mobiliser diverses méthodes :
 - **La conception à dire d'experts**, s'appuyant sur la connaissance empirique du sélectionneur. Ainsi, Thierry André, responsable de la sélection du tournesol chez Soltis, peut délivrer sa vision de l'idéotype de tournesol à 2030 à partir de sa propre expérience (Tableau 1).

Objectifs	Traits recherchés
Aptitude au semis précoce	Germination et croissances dès 5° C
Tolérance à la sécheresse	Système racinaire hyper-développé et réceptif à la mycorrhization
Compétition vis-à-vis des adventices	Architecture de type « diabolo » (surface foliaire forte en bas et en haut)
Maximiser le fonctionnement de la source après floraison	Architecture de type « diabolo », stay-green et dessèchement accéléré à maturité physiologique
Tolérance aux maladies	Privilégier la résistance quantitative, horizontale
Optimiser la valorisation des akènes	Décorrélérer l'aptitude au décorticage et la teneur en huile
Optimiser la qualité nutritionnelle de l'huile	Viser un profil acide gras de type « Iso4 »

Tableau 1 - La vision de l'idéotype de tournesol pour 2030 : point de vue d'un sélectionneur (Debaeke et al., 2014)

- L'exploitation de résultats d'expérimentations

Qu'il s'agisse d'évaluation des performances variétales (pré ou post-inscription) ou d'expérimentations couplant variétés et conduites de culture en vue de leur ajustement réciproque, l'approche expérimentale en réseau, pluri-annuelle et multi-locale, couplée à une modélisation statistique (ANOVA, AMMI...) permet de mettre en évidence des interactions G x E et G x E x C (Roumet et al., 2014). La mise en exergue de réponses variétales différenciées selon les environnements et les conduites peut ainsi orienter le conseil variétal.

- La conception par modèle

Il peut s'agir de modèles décisionnels qualitatifs (cf partie 4. exemple de la culture de pois) ou de modèles écophysiologiques quantitatifs qui opèrent par simulation de traits individuels ou d'assemblages de traits (Haverkort et Kooman, 1997 ; Asseng et al., 2002 ; Herndl et al., 2007 ; Voisin et al., 2007 ; Qi et al., 2010 ; Casadebaig et Debaeke, 2011 ; Messina et al., 2011 ; Suriham et al., 2011 ; Semenov et Stratonovitch, 2013 ; Martre et al., 2015) et couplage avec un algorithme d'optimisation (Kadrani et al., 2012 ; Quilot-Turion et al.,

2012). Dans une synthèse récente, Jeuffroy et al. (2014) ont analysé l'apport actuel et les perspectives d'utilisation des modèles agronomiques pour la prévision des performances variétales en vue du conseil.

Évaluation de l'idéotype

Une fois les idéotypes conçus sous la forme de prototypes virtuels, leur capacité à répondre aux objectifs spécifiés dans les cahiers des charges doit être évaluée. Par évaluation, on entend tout d'abord évaluation *in silico* lors de la phase de conception (boucles successives) afin de vérifier que le génotype candidat mérite d'être retenu dans le processus de sélection parce qu'il satisfait aux critères visés. Ceci est assez proche de la démarche proposée par Bergez et al. (2010) pour la conception d'itinéraires techniques par simulation. Il faut accompagner relativement tôt cette phase de conception *in silico* par une exploration des ressources génétiques disponibles.

Dans un second temps, il faut prévoir une évaluation expérimentale des variétés issues de la sélection afin de vérifier le bien-fondé des hypothèses initiales et le degré d'atteinte des critères recherchés.

Pour chaque cahier des charges, des critères d'évaluation sont définis et hiérarchisés. Il s'agit d'établir des indicateurs permettant de juger du niveau de satisfaction de chacun des objectifs du cahier des charges. Cette grille sert à évaluer les idéotypes produits et à ne conserver que ceux qui présentent un niveau de satisfaction global du cahier des charges acceptable. Pour établir ce niveau de satisfaction global, différentes méthodes d'évaluation multicritères pourront être mobilisées (DEXi, surclassement de synthèse...). Cette évaluation permet aussi d'identifier les éléments du cahier des charges qui nécessitent un travail supplémentaire, elle peut amener à modifier la représentation conceptuelle de l'étape précédente et alimenter ainsi une boucle de progrès. Nous voyons ici qu'il est important que les objectifs listés dans le cahier des charges soient définis de manière assez exhaustive pour que l'évaluation puisse se faire sur une gamme de critères suffisamment large. En effet, si, pour des raisons pratiques, la conception d'un idéotype est généralement fondée sur quelques objectifs identifiés comme prioritaires dans le cahier des charges, tous les objectifs donnent lieu à une évaluation et permettent ainsi d'accéder à une connaissance plus fine de l'idéotype produit. L'élargissement des services écosystémiques attendus de l'activité agricole pourrait, par exemple, diversifier dans l'avenir les critères d'évaluation des idéotypes variétaux.

Un exemple de conception d'idéotypes pour le pois d'hiver

La culture de pois, malgré ses intérêts multiples (réduction des émissions de GES, économie d'azote dans la rotation, fourniture de protéines pour l'alimentation animale et humaine, diversification) a connu une réduction drastique de ses surfaces en France : de 700 000 ha (1993) à environ 100 000 ha aujourd'hui. Cette culture est également caractérisée par une forte instabilité et une faible progression des rendements en culture, la rendant peu attractive pour les producteurs. Le contexte

d'accroissement des stress hydriques et thermiques augmente de plus cette instabilité, la culture y étant particulièrement sensible. Face à ces constats, le pois d'hiver, alors très peu cultivé en France, est apparu comme présentant des atouts : allongement de la durée du cycle (*a priori* favorable au rendement), décalage du cycle reproducteur vers des périodes moins fréquemment affectées par les stress abiotiques. Mais les variétés alors disponibles étaient sensibles au gel et, de ce fait, devaient être semées assez tard en automne (mi-novembre); or à cette période, où le sol est généralement très humide et favorable au tassement lors des opérations de semis. Le pois étant très sensible à des états structuraux du sol compactés, la sélection s'est orientée vers la recherche de variétés à période de semis plus précoce. On ne connaissait pas alors les conséquences possibles de l'avancement des semis sur les attaques d'ascochytose, les infestations d'*Aphanomyces*, et la gestion des mauvaises herbes à l'échelle de la rotation. Par ailleurs, des hypothèses de charges de travail dans les exploitations agricoles pouvaient laisser supposer que les dates de semis de ces nouvelles variétés de pois pourraient ne pas être aussi précoces que souhaitable avec de ce fait une réduction possible des bénéfices attendus.

Les programmes de sélection ont été initiés dès l'identification d'un gène de réactivité à la photopériode (Hr), permettant de maîtriser la date d'initiation florale (et donc la résistance au gel par le retard de floraison). Une double question (de la part des sélectionneurs et des agronomes) a alors été posée : (i) quelles caractéristiques devraient avoir ces variétés Hr pour maximiser les bénéfices attendus (quelle date de début floraison ? quelle durée de floraison ?), et (ii) les bénéfices attendus risqueraient-ils d'être remis en cause par des dates de semis contraintes par l'organisation du travail dans les exploitations agricoles ?

Des travaux de modélisation ont alors été engagés pour répondre à ces deux questions. Le modèle Afila, alors disponible sur pois de printemps, a été adapté au pois d'hiver, via la prise en compte de nouveaux facteurs limitants *a priori* attendus sur pois d'hiver (tassement du sol, gel, nutrition azotée limitante), et via la prise en compte de la variabilité génétique existant sur les traits d'intérêt (Vocanson et al., 2006a, 2006b). Ce nouveau modèle de fonctionnement d'une culture de pois, Afisol, a ensuite été couplé avec un modèle d'organisation du travail et d'évolution de la structure du sol selon les conditions de travail dans l'exploitation, afin de déterminer les risques de tassement du sol sur pois et sur les autres cultures de la succession, et les conséquences induites sur le rendement du pois selon le type variétal retenu dans l'exploitation (Jeuffroy et al., 2012). Enfin, le modèle d'évolution des populations d'adventices Alomysys a également été utilisé pour simuler les conséquences du choix variétal du pois sur les dynamiques d'évolution des mauvaises herbes à moyen terme, dans des successions à base de céréales et de colza (Munier-Jolain et Collard, 2004). Enfin, pour prendre en compte des facteurs limitants importants, dont les connaissances étaient encore trop partielles, un modèle décisionnel qualitatif basé sur DEXi (Bohanec et al., 2013) a été mobilisé.

L'utilisation du modèle Afisol a permis de montrer que les variétés Hr présentant les meilleures performances seraient

des variétés à floraison très précoce (autour du 20 avril), et à comportement reproducteur très indéterminé (fabriquant un nombre d'étages florifères très élevé). Le couplage de ce modèle avec les modèles d'organisation du travail et d'état structural du sol a montré que les performances attendues des variétés pouvaient être très différentes selon que les contraintes de l'exploitation agricole étaient prises en compte ou non (Jeuffroy et al., 2012).

Simultanément, des essais chez les sélectionneurs ont montré que certains phénotypes apparaissaient mieux adaptés à la tolérance à l'hiver : port en rosette, nombreuses ramifications, taille réduite des organes foliaires, développement rapide au printemps. De même, des travaux en pathologie ont permis de progresser sur l'idéotype défavorable au développement de l'ascochytose : plante haute, faible surface foliaire, bonne tenue de tige et insertion haute des organes fructifères, conduite du couvert permettant de maximiser la porosité et l'aération (densité de semis, date de semis, résistance à la verse) (Andrivot et al., 2013 ; Richard et al., 2013).

Des collections de ressources génétiques et de mutants ont alors été analysées pour identifier les sources de variabilité génétique disponible sur les caractères d'intérêt (résistance à *Aphanomyces* et à l'ascochytose, tolérance au gel, architecture et phénologie de la plante), et des marqueurs ont été mis au point pour la sélection. Des génotypes combinant les caractères d'intérêt ont été construits et évalués dans des réseaux d'essais, conduisant à l'identification de nouveaux processus nécessitant des travaux complémentaires : meilleur durcissement en cas de gel, anticipation de la date de début floraison, plus grande stabilité de la résistance à l'ascochytose.

En combinant des connaissances de génétique, d'écophysiologie, de pathologie et d'agronomie, issues des scientifiques, de la modélisation, et des experts de terrain, ces travaux ont permis de préciser les caractéristiques que devraient *a priori* avoir de nouvelles variétés de pois d'hiver pour réduire le risque d'être soumises aux facteurs limitants principaux rencontrés auparavant dans les cultures de pois chez les producteurs, ainsi que les caractéristiques des conduites techniques favorables (notamment la plage de dates de semis recommandées). Ces idéotypes ont inspiré les programmes de sélection en cours en contribuant à préciser les cibles. Les premières variétés de ce type Hr ont été inscrites très récemment et la sélection poursuit son travail par une amélioration progressive de ces types. Les travaux se poursuivent par la caractérisation des systèmes agricoles qui valoriseront au mieux ces nouveaux types variétaux. Les temps de réponse de la sélection étant longs, il n'est pas encore possible de tirer un bilan global de cette expérience, notamment en terme d'adoption par les producteurs.

Cet exemple montre l'importance d'avoir une démarche pluri-disciplinaire pour aborder cette question de l'idéotype à construire. De même, elle illustre les allers-retours permanents qui sont nécessaires entre l'acquisition de connaissances sur des processus constituant *a priori* des obstacles au développement de nouveaux idéotypes, et la construction-évaluation de prototypes des idéotypes définis.

Conclusion

Pour le sélectionneur, l'idéotypage permet donc de raisonner la sélection de manière plus formalisée et détaillée que la sélection traditionnelle sur objectifs globaux (souvent le rendement final). Ce mode de sélection séquentielle consiste également à faire des choix prioritaires (traits cibles) et non à viser une multiplicité d'objectifs de sélection. Concept utile ou dépassé ? Le débat est régulièrement ravivé parmi les sélectionneurs (Hamblin, 1993) mais le concept de Donald reste toujours opératoire pour analyser l'intérêt de sélectionner tel ou tel trait dans un environnement donné (Zhu et Zhang, 2013).

Pour le chercheur, la conception d'idéotypes offre l'opportunité d'une approche pluri-disciplinaire associant l'économie de l'innovation, les mathématiques appliquées, la génétique, l'agronomie, la pathologie végétale, et l'écophysiologie. Elle permet de revisiter les concepts d'interaction génotype x environnement x conduite et s'appuie sur les méthodes de conception développées pour les systèmes agricoles (boucles conception-évaluation).

Elle permet d'organiser la réflexion sur la création et le conseil variétal au sein des filières : identification des besoins (agriculteurs, coopératives, transformateurs), fixation d'un objectif pour la sélection (traits recherchés, exploration de la variabilité génétique...), méthodes d'évaluation. Dans ces domaines, les outils et méthodes restent encore largement à construire.

Bibliographie

- Andrivot, 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
- 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
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.-H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. Eur. J. Agron. 32, 3-9
- Bohanec, M., Rajkovič, V., Bratko, I., Zupan, B., Žnidaršič, M., 2013. DEX methodology: Three decades of qualitative multi-attribute modelling. Informatica 37, 49-54
- Casadebaig, P., Debaeke, P., 2011. Using a crop model to assess genotype-environment interactions in multi-environment trials. In: System Approaches to Crop Improvement (N. Halford & M. Semenov, eds). Aspects Appl. Biol. 107, 19-25
- Cilas, C., Bar-Hen, A., Montagnon, C., Godin, C., 2006. Definition of architectural ideotypes for good yield capacity in *Coffea canephora*. Ann. Bot. 97, 405-411
- Debaeke, P., Nolot, J.M., 2000. Testing crop management systems for sunflower in South-West France. Proc.15th Int.Sunflower Conf., Toulouse, ISA, Vol.1, C 1-6

- Debaeke, P., Nolot, J.M., Bataillon, P., Raffaillac, D., 2000. Evaluation d'itinéraires techniques pour le blé dur dans le Sud-Ouest de la France. In Durum wheat improvement in the Mediterranean region: new challenges (C.Royo, M.M Nachit, N. Di Fonzo, JL Arous Eds). Options Méditerranéennes. Série A, 40, 587-590
- Debaeke, P., Quilot-Turion, B. (eds), 2014. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA, 252 P
- Debaeke, P., André, T., Lorgeou, J., 2014. La notion d'idéotype de plante. In Debaeke P. & Quilot-Turion (eds). Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA-CIRAD, pp 41-56
- Desclaux, D., Nolot, J.M., Chiffolleau, Y., Gozé, E., Leclerc, C., 2008 Changes in the concept of genotype x environment interactions to fit agriculture diversification and decentralized participatory plant breeding: pluridisciplinary point of view. *Euphytica* 163, 533-546
- Desclaux, D., Chiffolleau, Y., Nolot, J.-M., 2013. Du concept d'Idéotype à celui de Realttype: Gestion dynamique des innovations variétales par une approche transdisciplinaire et partenariale. Exemple du blé dur pour l'AB. *Innovations Agronomiques* 32, 455-466
- Dickmann, D.I., Gold, M.A., Flore, J.A., 1994. The ideotype concept and the genetic improvement of tree crops. *Plant Breed. Rev.* 12, 163-193
- Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotype. *Euphytica* 17, 385-403
- Fontaine, L., Rolland, B., Bernicot, M.-H. , Poiret, L., 2009. Des variétés rustiques concurrentes des adventices pour l'agriculture durable en particulier l'agriculture biologique. *Innovations Agronomiques* 4, 115-124
- Hamblin, J., 1993. The ideotype concept: useful or outdated? In: D.R. Buxton, R. Shibles, A. Forsberg, B.L. Blad, K.H. Asay, G.M. Paulsen, R.F. Wilson (Eds.), *International Crop Science I*, CSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 589-597
- Hanocq, E., Jeuffroy, M.H., Lejeune-Hénaut, I., Munier-Jolain, N., 2009. Construire des idéotypes pour des systèmes de culture variés en pois d'hiver. *Innovations Agronomiques* 7, 14-28
- Haverkort, A.J., Kooman, P.L, 1997. The use of systems analysis and modelling of growth and development in potato ideotyping under conditions affecting yields. *Euphytica* 94, 191-200
- Herndl, M., Shan, C., Wang, P., Graeff, S., Claupein, W., 2007. A model based ideotyping approach for wheat under different environmental conditions in North China Plain. *Agricultural Sciences in China* 6, 1426-1436
- 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. Agr.* 42, 68-78
- 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
- Kadrani, A., Sidi, M.M.O., Quilot-Turion, B., Génard, M., Lescourret, F., 2012. Particle swarm optimization to design ideotypes for sustainable fruit production systems. *Int. J. Swarm Intelligence Res.* 3, 1-19
- Lauri, P.E., Costes, E., 2005. Progress in whole-tree architectural studies for apple cultivar characterization at INRA, France - Contribution to the ideotype approach. *Acta Hort.* 663, 357-362
- 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
- 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., Felix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Meausoone, M., Dousinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131-1142
- Martre, P., Quilot-Turion, B., Luquet, D., Ould-Sidi, M., Chenu, K., Debaeke, P., 2015. Chapter 14 - Model assisted phenotyping and ideotype design. In: Calderini D & Sadras VO (eds), *Crop Physiology. Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. 2nd Edition, Academic Press, pp 349-373
- Messina, C.D., Podlich, D., Dong, Z., Samples, M., Cooper, M. 2011. Yield-trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance. *J. Exp. Bot.* 62, 855-868
- Meynard, J.-M., Debaeke, P., Dejoux, J.F., Saulas, P., 1997. Quelle sélection variétale pour une agriculture durable ? *OCL* 4, 426-430
- Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., 2006. Quel progrès génétique pour une agriculture durable ? *Les Dossiers de l'Environnement de l'Inra* n°30, 15-25
- Mock, J.J., Pearce, R.B., 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24, 613-623
- Munier-Jolain, N., Collard, A., 2004. Grain legumes and weed management in crop rotations: Stakes and methodologies for reducing environmental impacts of weed control. Workshop AEP Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts ? Zurich, 18-19 Nov.2004
- Peng, S., Khush, G.S., Virk, P., Tang, Q., Zou, Y., 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crop Res.* 108, 32-38
- Qi, R., Ma, Y., Hu, B., de Reffye, P., Cournede, P.H., 2010. Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: A case study on maize. *Comput. Electron. Agr.* 71, 96-105
- Quilot-Turion, B., Ould-Sidi, M.M., Kadrani, A., Hilgert, N., Genard, 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

Rasmusson, D.C., 1987. An evaluation of ideotype breeding. *Crop Sci.* 27, 1140-1146

Rasmusson, D.C., 1991. A plant breeder's experience with ideotype breeding. *Field Crops Res.* 26, 191-200

Richard, B., Bussi re, F., Langrume, C., Rouault, F., Jumel, S., Faivre, R., Tivoli, B., 2013. Effect of pea canopy architecture on microclimate and consequences on ascochyta blight development under field conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 135, 509-524

Roumet, P., Debaeke, P., Gauffreteau, A., Lorgeou J., 2014. Mettre en évidence de manière expérimentale des interactions G x E x C. In Debaeke P. & Quilot-Turion B. (eds). Conception d'ideotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA-CIRAD, pp 81-111

Sedgley, R.H., 1991. An appraisal of the Donald ideotype after 21 years. *Field Crops Res.* 26, 93-112

Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2013. Designing high-yielding wheat ideotypes for a changing climate. *Food and Energy Security* 2, 185-196

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

Socias, R., Felipe, A.J., G mez Aparisi, J., García, J.E., Dicenta, F., 1998. The ideotype concept in almond. *Acta Hort.* 470, 51-56

Van Bueren, E.T.L., Struik, P.C., Jacobsen, E., 2002. Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype. *Neth. J. Agric. Sci.* 50, 1-26

Vocanson, A., Roger-Estrade, J., Boizard, H., Jeuffroy, M.H., 2006a. Effects of soil structure on root development of pea (*Pisum sativum* L.) according to the sowing date and the cultivar. *Plant Soil* 281, 121-135

Vocanson, A., Jeuffroy, M.H., Roger-Estrade, J., 2006b. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (*Pisum sativum* L). *Plant Soil* 283, 345-358

Voisin, A.S., Bourion, V., Duc, G., Salon, C., 2007. Using an ecophysiological analysis to dissect genetic variability and to propose an ideotype for nitrogen nutrition in pea. *Ann. Bot.* 100, 1525-1536

Zeven, A.C., 1975. Editorial: idiootype and ideotype. *Euphytica* 24, 565

Zheng, B., Chenu, K., Dreccer, M.F., Chapman, S.C., 2012. Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? *Global Change Biol.* 18, 2899-2914

Zhu, L., Zhang, D.-Y., 2013. Donald's ideotype and growth redundancy: a pot experimental test using an old and a modern spring wheat cultivar. *PLoS ONE* 8(7): e70006. doi:10.1371/journal.pone.0070006.