

INTERACTIONS GÉNOTYPES-ENVIRONNEMENTS

# UNE COMPLEXITÉ à interpréter en blé tendre



Le besoin en eau entre le stade laiteux et celui de la maturité du grain apparaît comme une des variables explicatives des IGE.

© L. Paillé - ARVALIS-Institut du végétal

**Mettre en évidence, comprendre, modéliser et prédire les interactions « génotypes-environnements », est un objectif poursuivi par tous les évaluateurs de variétés, en vue d'affiner les recommandations variétales et de minimiser les effets négatifs des interactions.**

Il est aisé d'estimer pour chaque variété une valeur moyenne de précocité, rendement, résistance aux maladies, tenue de tige, qualité, etc., sous réserve de disposer d'un nombre minimal d'essais multi-locaux et pluriannuels explorant un grand nombre d'« environnements cibles ». Le choix variétal se base généralement sur des classements moyens des variétés, pour les différents critères à l'échelle des réseaux d'essais,

« De nombreuses caractéristiques variétales d'intérêt sont affectées par les IGE. »

et des indicateurs de stabilité. Le classement en rendement peut varier d'un lieu à l'autre. Cette variation provient d'une part de l'erreur expérimentale (1) et, d'autre part, des comportements différents des variétés selon l'origine des interactions génotypes-environnements (IGE). Les variétés stables, dont le classement varie peu d'un environnement à l'autre, sont habituellement recherchées. Cependant, des variétés moins stables sont parfois mieux adaptées à certains environnements. Identifier ces situations permettrait de cibler davantage les recommandations.

De nombreuses caractéristiques variétales d'intérêt sont affectées par les IGE. Le classement des variétés selon leur précocité (qui n'est pas un caractère aussi simple qu'il n'y paraît pour de nombreuses espèces) peut varier, comme dans

le cas du blé tendre, selon la date de semis et les températures hivernales. De même, les différences d'intensité de symptômes de maladies entre variétés peuvent varier selon les essais, même s'ils sont

soumis à la même pression de maladie. En effet, l'interaction entre la construction génétique de la résistance et la diversité des souches de maladies font que, dans certaines régions et au fil des années, les variétés peuvent apparaître plus ou moins résistantes.

### Une démarche en plusieurs étapes

Les travaux réalisés par ARVALIS sur l'analyse des IGE, en lien avec l'INRA et les autres instituts techniques (2), visaient à affiner les pronostics de comportements des variétés à l'aide de modèles, en intégrant des données de conditions de culture des essais. L'analyse comporte plusieurs étapes : la quantification des enjeux en rendement de ces interactions, l'ajustement de modèles statistiques aptes à les décrire et la validation de ces modèles sur des jeux de données indépendants.

L'étude a été conduite en blé tendre sur les résultats des essais ARVALIS de Post-Inscription bien protégés vis-à-vis des maladies et réalisés de 2003 à 2010. Le réseau d'essais compte annuellement environ 80 essais, répartis dans des petites régions aux sols et potentiels différents apportant de la variabilité. Il compare des variétés réparties selon leur précocité dans trois listes (Nord, Centre et Sud). La grande majorité des variétés n'est testée que deux ans. Certaines variétés témoins, et les références largement cultivées, le sont sur plusieurs années. Les comparaisons de variétés qui n'auraient pas été testées dans les mêmes réseaux d'essais sont ainsi possibles.

Les notations de stades phénologiques, les données météorologiques de proximité et celles sur le sol, les dates et doses d'azote, ainsi que les apports d'irrigation, ont permis de calculer, lors des différentes phases d'élaboration du rendement et pour tous les essais, des covariables « agro-pédoclimatiques », comme l'offre en température et en rayonnement ou encore les stress thermiques et hydriques. Ces covariables ont ensuite été utilisées au sein de modèles statistiques pour expliquer les variations de rendement des variétés dans les essais des huit années du réseau.

### ÉVALUATION DES MODÈLES : l'intégration des IGE n'améliore pas encore suffisamment les prédictions

	Modèles statistiques***	Écart moyen entre rendements simulés et observés	% de corrélation entre les classements simulés et observés (test de Spearman)	Erreur de type III à 1 quintaux*	Erreur de type III à 3 quintaux*
2010	RandomForest	5,48	0,53	23,4 %	14,0 %
	PLS1	5,44	0,51	24,9 %	15,6 %
	modèle additif**	5,42	0,51	24,8 %	15,6 %
2008	RandomForest	7,86	0,51	24,6 %	17,7 %
	PLS1	7,5	0,58	22,6 %	16,0 %
	modèle additif**	7,86	0,46	25,9 %	18,8 %
2007	RandomForest	6,74	0,27	32,4 %	22,0 %
	PLS1	6,73	0,32	30,1 %	21,1 %
	modèle additif**	6,74	0,32	30,1 %	21,1 %

\* : % de cas avec erreur de prédiction d'un écart d'1 (ou 3) q/ha entre variétés entre rendements simulés et observés.

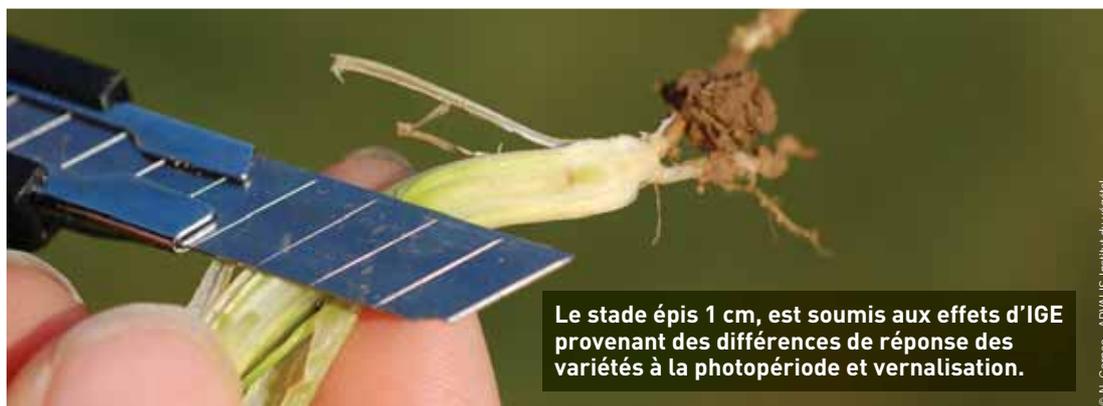
\*\* : modèle additif = modèle de référence d'ajustement des moyennes sans prise en compte des IGE.

\*\*\* : prédiction des données de l'année mentionnée avec celles des autres années de la période 2003-2010.

**Tableau 1 : Comparaison de deux méthodes statistiques (Random Forest et PLS1) sur la prédiction des rendements des variétés dans les essais de l'année n avec des équations ajustées sur les données des années n-1 et n-2.** Cas issus de la liste des variétés de blé tendre en Post-Inscription dans le Centre.

### Décrire et diagnostiquer les interactions...

La première étape de l'analyse est de représenter les interactions afin d'identifier les essais et les variétés qui y contribuent le plus. Pour cela, il est possible de structurer les différences entre les rendements observés dans les différents essais et ceux estimés par un simple modèle additif (hypothèse que les performances relatives des variétés sont stables d'un environnement à l'autre). La figure 2 est un exemple de représentation classique des IGE visant à identifier des variétés présentant des réponses proches dans différents environnements ; le réseau d'essais peut ainsi être structuré selon les réponses des variétés. La mise en relation avec des conditions de culture particulières (déficit hydrique précoce, maladies, verse...) permet ainsi



**Le stade épis 1 cm, est soumis aux effets d'IGE provenant des différences de réponse des variétés à la photopériode et vernalisation.**

© N. Comae - ARVALIS-Institut du végétal

**IMPACT SUR LES RENDEMENTS : les écarts entre variétés peuvent différer des écarts moyens.**

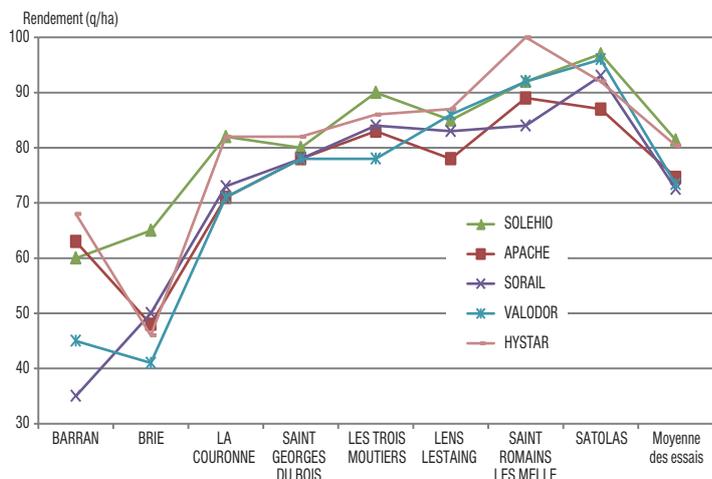


Figure 1 : Illustration d'interactions « géotypes-environnements » en blé tendre. Données issues d'essais de Post-Inscription d'ARVALIS. Rendement de plusieurs variétés dans différents lieux d'essais.

un diagnostic sur le réseau d'essais. Ce type de diagnostic préalable est réalisé lors des synthèses effectuées par les instituts techniques et les commissions validation des essais CTPS organisées par le GEVES, pour identifier aussi les essais qui ont un comportement isolé suite à un accident, ou bien qui sont à écarter des synthèses en raison de trop grandes imprécisions sur les résultats.

**... puis les modéliser**

Des variables agropédoclimatiques et de caractéristiques variétales peuvent être introduites dans des modèles statistiques. Il s'agit ainsi d'expliquer les rendements observés dans les essais à partir des facteurs susceptibles d'avoir été favorables ou défavorables à son élaboration. Sous réserve de disposer d'essais suffisamment nombreux, variés et bien décrits pour leurs conditions de culture, ainsi que de variétés présentant des réponses

diversifiées aux stress environnementaux présents dans ces essais, il est possible d'effectuer des ajustements efficaces pour expliquer les écarts de classement des variétés entre essais. Les variables explicatives des IGE qui ressortent le plus fréquemment, dans les essais globalement bien protégés vis-à-vis des maladies, sont les indices de satisfaction des besoins en eau entre les stades laitex et la maturité du grain, les températures maximales supérieures à 25 °C à partir de l'épiaison, les températures moyennes entre la montaison (épis 1 cm) et la floraison, le rayonnement et les précipitations entre l'épiaison et le stade laitex du grain.

**Des performances de prédiction variables**

La 3<sup>e</sup> étape a consisté à évaluer la qualité prédictive des modèles testés. La valeur de prédiction des modèles a été estimée en comparant les rendements observés et les rendements prédits par un modèle, à partir de données indépendantes de celles ayant servi à estimer le modèle (autres années par exemple). Cette valeur de prédiction a été appréciée sur des critères de comparaison des classements des variétés, d'écart en rendement entre des variétés, ainsi que des pourcentages de fois où la variété A est dite supérieure de 1 (ou 3) q/ha à la variété B alors que c'est en réalité la variété B qui est supérieure à la variété A (tableau 1). Les résultats montrent que les performances de prédiction sont variables, notamment selon les méthodes et les années d'essais. Ainsi, les modèles testés sur le jeu de données utilisé n'ont pas amélioré significativement les prédictions offertes par la méthode de référence (modèle additif) ne tenant pas compte des IGE. Le même type de résultat a été obtenu par l'ITB sur la betterave. Différentes hypothèses ont été explorées, telles que l'imprécision des variables (réserve utile, stades, ...), la présence de quelques symptômes de

**Les enjeux en rendements des interactions**

Le rendement d'une variété dans un essai donné dépend d'abord du potentiel de rendement du lieu et de l'année, qui expliquent environ 80 % de la variabilité du rendement. L'effet de la variété, explique environ 7 % de la variabilité du rendement et les interactions géotypes-environnements expliquent le reste de la variabilité, soit environ 13 %. Au total, les interactions représentent près du double de l'effet variété, ce qui justifie de s'intéresser à décrypter les causes d'irrégularité des performances des variétés entre années et entre lieux.

Les contournements de résistance, comme ceux rencontrés avec les rouilles sur blé tendre, génèrent des différences de classement de résistance des variétés, appelées interactions géotypes-environnements.

© J.-Y. Maurias - ARVALIS-Institut du végétal

**ANALYSE DES INTERACTIONS : identifier préalablement leurs effets**

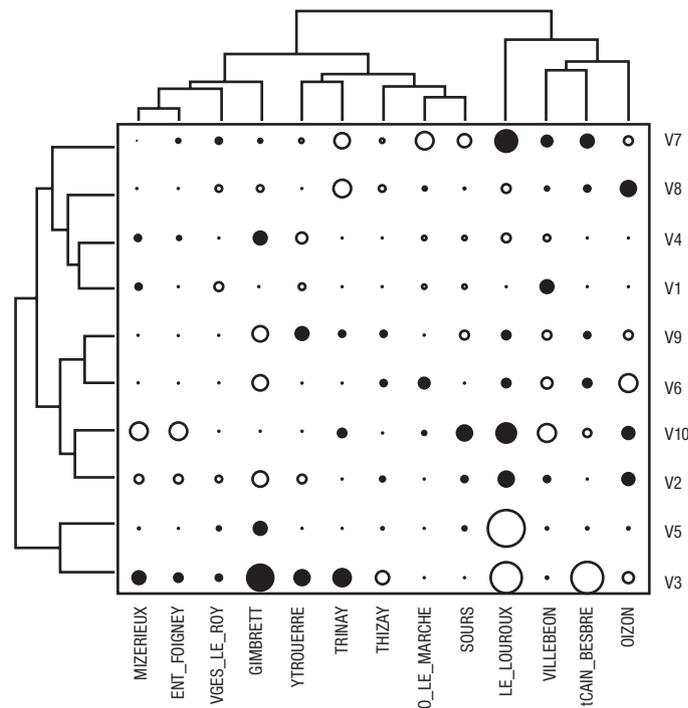


Figure 2: Représentation des interactions et structuration en sous-groupes de 10 variétés V1 à V10 dans différents sites d'essais. Les cercles pleins en noir correspondent à des écarts positifs, les cercles vides à des résidus négatifs. Les essais peuvent ainsi être regroupés par grands types de conditions montrant l'effet de tel ou tel paramètre (précocité, sensibilité à une maladie...).

maladies, les effets de diversité des conditions de culture des essais, etc., sans qu'il ait été possible d'isoler clairement la contribution de leurs effets aux imprécisions de prédiction.

**De nombreuses pistes à l'étude**

Dans la continuité des recherches, l'aptitude des modèles statistiques à prédire les IGE est testée sur des bases de données de rendements de variétés à comportements théoriques contrastés, simulés par un modèle de culture dans une même série de lieux et années très diversifiés en facteurs limitants. Ce travail est réalisé dans le cadre du GIS GC

« **Des profils de variétés** complémentaires pourraient être proposés, à l'échelle de l'exploitation agricole, pour minimiser les interactions. »

HPEE sur le tournesol par l'INRA et Terres Inovia. Des travaux sur l'intégration de données de marqueurs moléculaires sont également menés sur blé tendre par l'INRA et ARVALIS. La nécessité d'une meilleure caractérisation des conditions de culture dans les essais s'avère indispensable pour réaliser

des calculs de facteurs limitants plus précis. Tenter de représenter des sommes de petits effets additifs ou multiplicatifs de processus physiologiques qui s'emboîtent et s'enchaînent tout au long du cycle de culture par des modèles statistiques est aussi une voie privilégiée, notamment dans le projet « Amaizing » sur le maïs soutenu par les Investissements d'Avenir. L'objectif est d'intégrer des paramètres de réponses des variétés dans les mécanismes élémentaires des modèles physiologiques qui simulent la construction du rendement sous différents stress climatiques.

Le fait que les interactions les plus significatives dans les essais bien protégés vis-à-vis des maladies sont liées à des effets climatiques, ne pouvant être prédits pour l'année à venir, confirme l'intérêt des variétés dont les performances sont les plus régulières en rendement (en valeur relative par rapport aux autres), sous réserve que l'ensemble des caractéristiques attendues soient satisfaisantes. Cela conduit ARVALIS et les membres du GIS GC HPEE engagés sur le thème des variétés à s'intéresser à la complémentarité de plusieurs profils de variétés qui pourraient être proposés à l'échelle de l'exploitation agricole pour minimiser les interactions.

[1] 3 à 7 q/ha d'imprécision en rendement du fait de l'hétérogénéité des sols, du travail du sol ou d'épandage, etc, et des imprécisions de mesures et d'échantillonnage.

[2] Dans le cadre d'une action soutenue par le GIS GC HPEE (Groupement d'intérêt scientifique Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques).

Josiane Lorgeou\* - j.lorgeou@arvalisinstitutduvegetal.fr  
 François Piraux, Guénoël Grignon  
 ARVALIS - Institut du végétal  
 Arnaud Gauffreteau\* - gauffret@grignon.inra.fr  
 INRA

\* : animateurs du groupe variétés GIS GC - HPEE



Les travaux montrent que les températures maximales supérieures à 25 °C à partir de l'épiaison font partie des variables intervenant dans les IGE.