

Les interactions génotype x environnement x conduite dans le cadre de l'étude des variétés pour l'inscription : bilan des actions réalisées

Masson F., Lassalvy S., Richard B.

Domaine de l'Anjouère 49370 La Pouëze

Correspondance : fabien.masson@geves.fr

Résumé

Un certain nombre d'actions sont engagées au niveau des réseaux CTPS, que ce soit pour tendre vers une meilleure caractérisation des milieux expérimentaux ou en termes d'outils d'analyse de données. Ces évolutions déjà effectives ou à venir visent une meilleure valorisation des interactions génotype x environnement x conduite. Il s'agit à travers cette présentation de faire le point sur ces évolutions et de s'interroger sur la manière d'utiliser les interactions génotype x environnement x conduite dans la cadre de l'homologation des nouvelles variétés.

Mots-clés: IGEC (Interactions Génotype x Environnement x Conduite), variétés, inscription

Abstract: Genotype x Environment x Management interaction during variety evaluation: main achievements

Some changes are engaged on the CTPS networks, either to have a better description of experimental environments or to use new tools for data analysis. These changes, already effective or in project, aim at a better valorization of interactions genotypes x environments x cultural practices. This paper reviews the changes implemented in the CPTS networks and investigates how to use interactions genotypes x environments x cultural practices in the framework of registration of new varieties.

Keywords: Genotype x Environment x Management interaction, varieties, national listing

L'évolution des conditions climatiques et la diversification des modalités de la production agricole, comme la réduction des intrants, génèrent des conditions de cultures de plus en plus variées avec une fréquence plus importante des stress biotiques et abiotiques. Ce nouveau cadre de production implique de disposer d'une gamme variétale diversifiée et adaptée à un large éventail de conditions biotiques et pédoclimatiques. Cet objectif a conduit le CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection) à faire évoluer fin 2009 la VAT (Valeur Agronomique Technologique) en VATE (Valeur Agronomique Technologique et Environnementale) pour favoriser la mise sur le marché de variétés adaptées à ce nouveau contexte (Vialle, 2011).

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mieux connaître les réponses adaptatives des variétés aux principaux stress environnementaux s'exprimant dans les essais variétaux tout au long du cycle cultural. Cela impose une stratégie d'analyse approfondie des données issues des réseaux d'évaluation des variétés pour tendre vers une caractérisation suffisante des variétés permettant *in fine* à l'utilisateur de la variété d'opérer un choix optimal parmi les variétés disponibles, au regard de ses objectifs et de ses contraintes techniques et environnementales. Ce choix devra prendre en compte non seulement la valeur agronomique et technologique intrinsèque de la variété, mais aussi sa tolérance aux principaux stress qui s'expriment dans son milieu de culture. L'évaluation des innovations variétales ne peut donc plus seulement se faire sur leur seule valeur moyenne à l'échelle d'un réseau d'essais (Lecomte, 2005). La caractérisation des tolérances variétales aux principaux stress environnementaux peut se faire par

l'étude de la variabilité du comportement des variétés entre les différents essais d'un réseau grâce à une analyse fine de l'interaction génotype x environnement x conduite (IGEC). Les sorties de cette analyse constitueraient d'abord un enrichissement significatif de l'information produite pour chaque variété et devraient pouvoir être ensuite intégrées aux règles d'inscription.

Un certain nombre d'actions ont été engagées au niveau des réseaux CTPS pour tendre vers cette meilleure valorisation des IGEC. Cette synthèse a d'abord pour objectif d'en présenter un certain nombre. Puis, dans une seconde partie, seront posées un certain nombre de questions ou d'hypothèses : il s'agira de s'interroger sur l'utilisation des nouvelles informations qui seraient issues d'une meilleure prise en compte des IGEC dans le cadre des épreuves d'inscription des nouvelles variétés.

Les outils à développer pour une meilleure interprétation des IGEC doivent permettre de croiser les données variétales (données acquises classiquement sur chacun des génotypes étudiés comme le rendement par exemple) avec des données de description de l'environnement, classiquement appelées covariables environnementales, afin d'expliquer les différences de comportement entre variétés par rapport aux différents stress environnementaux rencontrés.

Le premier axe à développer est donc celui de la description du milieu expérimental dans lequel sont testées les variétés pour acquérir des indicateurs précis et robustes pour caractériser les essais tant du point de vue des facteurs abiotiques que biotiques, ces indicateurs devant être introduits dans les modèles d'interprétation des IGEC. Le développement de ces modèles constitue le second axe sur lequel des progrès sont nécessaires afin d'obtenir des outils adaptés aux contraintes des évaluateurs des variétés. Des exemples existent sur différents réseaux du CTPS qui illustrent le travail en cours pour améliorer les méthodes sur ces deux points.

1. Outils actuellement mis en œuvre sur les réseaux CTPS

1.1. Caractérisation des milieux expérimentaux des essais VATE

1.1.1. Un constat : des essais insuffisamment décrits

Aujourd'hui, dans les essais VATE du CTPS, des covariables potentiellement nécessaires au fonctionnement des modèles IGEC sont collectées. Tout d'abord, les conduites culturales appliquées aux essais sont en général bien décrites. Pour les stress biotiques, on dispose à travers les notations de dégâts de différents bioagresseurs sur les variétés témoins ou les variétés candidates d'une information de la pression de quelques maladies ou ravageurs. Pour l'environnement abiotique, la description est souvent sommaire. Il ne faut pas oublier que cette description de l'environnement des essais peut être certes fournie par l'expérimentateur mais c'est également envisageable par les visiteurs des essais comme en premier lieu l'homologue du GEVES qui a la capacité de comparer les essais d'une même région bénéficiant d'une vision régionale ou bien encore les experts habilités du CTPS : leurs observations constituent donc une source d'information potentielle. Il ne faut pas négliger, dans cette description de l'environnement, le positionnement des stress biotiques et abiotiques rencontrés par rapport aux stades de la culture. Ceci conduit à la nécessité de collecter les dates des stades phénologiques clés. Or, pour des raisons de temps et de coût, tous ne sont pas clairement identifiés dans les essais et les modèles de réestimation de ces stades à partir d'autres stades qui eux sont systématiquement notés sont encore insuffisamment précis. Enfin, pour réaliser un diagnostic agronomique suffisamment précis d'un essai, il serait nécessaire de disposer des composantes de rendement, ce qui n'est qu'en partie fait, là encore pour des raisons de temps et de coût. Ainsi, compte-tenu de ces constats, la caractérisation des conditions environnementales rencontrées par les variétés chaque année au sein des différents sites d'essais est hétérogène et généralement sommaire voire inexistante. Cette difficulté d'accès à une caractérisation fine des milieux expérimentaux est largement

constatée par l'ensemble de la communauté des évaluateurs des variétés (Masson, 2010 ; Masson, 2011).

Ce déficit d'information sur les conditions environnementales rencontrées dans les réseaux a plusieurs causes :

Difficultés matérielles de collecte des données :

Non seulement les essais variétaux pour l'inscription au catalogue sont très nombreux (1900 essais VATE dont 400 essais bioagresseurs / 400 plateformes différentes), mais ils sont réalisés par des partenaires divers. Cette multiplicité des partenaires ne favorise pas la production de données de qualité homogène. Par ailleurs, les sites d'essais ne sont pas tous pérennes : les essais sont en effet majoritairement implantés dans des parcelles d'agriculteurs qui diffèrent d'une année sur l'autre et pour lesquelles il est difficile de justifier un investissement important de caractérisation. Enfin, les essais sont fréquemment implantés sur des sites distants des stations de recherche ou de sélection, ce qui limite la fréquence des mesures.

Les données météorologiques issues des bases officielles de Météo France représentent un coût important. De plus, elles ne sont pas toujours représentatives des conditions observées sur la parcelle. La généralisation de stations météorologiques sur les sites est onéreuse en équipement et fonctionnement. Leur intégrité est difficile à maîtriser sur des sites éloignés du fait du vandalisme et des interventions agricoles dans les parcelles.

La caractérisation des sols par des analyses physico-chimiques sur tous les horizons explorés par les racines et par la description *in situ* serait nécessaire pour l'établissement de bilans hydriques et azotés de qualité mais cela représente un investissement significatif, particulièrement du fait qu'une grande partie des parcelles d'essais change chaque année.

Les suivis de l'offre en eau et en azote au cours du cycle cultural, deux facteurs non directement observables par l'expérimentateur et actuellement privilégiés dans les besoins d'interprétation des résultats des variétés, restent difficiles d'accès. Des sondes permettent de suivre les stocks d'eau du sol, mais elles restent onéreuses, leur pose n'est pas toujours accessible pour le novice, des étapes préalables de calibration sont indispensables. Il n'existe pas d'instruments de mesure directe de l'azote disponible dans le sol.

De plus, les modèles de bilan hydrique et azoté nécessaires pour établir une dynamique des ressources en eau et en azote dans le sol présentent deux grandes limites. D'une part, ils nécessitent d'acquérir préalablement des données météorologiques et pédologiques sur l'essai ce qui n'est pas toujours aisé compte-tenu des explications avancées précédemment. Et, d'autre part, la qualité de l'information produite par un modèle est variable selon la qualité des données d'entrée, le domaine de validité et la qualité prédictive du modèle. Ainsi, les seules prédictions offertes par un modèle sont difficilement comparables d'un lieu d'essai à l'autre. Enfin, les mesures indirectes d'expression des facteurs limitants à l'aide de témoins révélateurs présentent des limites pour les stress abiotiques. Alors que les notations de symptômes de maladies sur des variétés sensibles permettent d'estimer la pression parasitaire de la parcelle, un même état de croissance peut être relié à différents effets en interactions. Par ailleurs, le nombre de témoins révélateurs des différents facteurs limitants à introduire dans les essais peut devenir pléthorique, et leur choix n'est pas aisé car la variabilité génétique de réponse aux différents stress abiotiques n'est pas toujours clairement établie.

Faible débit des méthodes d'acquisition et de valorisation des données :

Les agronomes et écophysiologistes dont les études mobilisent des variables agropédoclimatiques et de cinétique d'état hydrique et nutritionnel des sols réalisent généralement leurs essais en stations de recherche sur des parcelles très instrumentées et sur un faible nombre de génotypes. Ils utilisent des outils et méthodes dont les exigences de précision et de fréquence de mesures restent peu compatibles

avec les contraintes des évaluateurs de variétés dont les délais de traitement de données figurent aussi comme une contrainte majeure. Des méthodes identifiées dans les projets de plateformes de phénotypage à haut débit au champ (Tardieu, 2011) relèvent pour la plupart de technologies lourdes et peu mobiles. Souvent au stade expérimental, elles nécessitent aussi une instrumentation onéreuse et des développements méthodologiques préalables pour devenir fonctionnelles. Quelques outils légers existent cependant mais ils ont été développés dans une optique diagnostic ponctuel et pilotage des apports. Ils fournissent des indicateurs qui ne sont pas toujours adaptés à de la comparaison multilocale, notamment parce qu'ils sont dépendants du lieu, de la variété voire du stade. C'est le cas par exemple des outils de mesures de l'état azoté des plantes (SPAD, N-Tester, Dualex, Multiplex...). Cependant, les développements des outils dans le secteur du phénotypage haut débit se font très rapidement et des évolutions récentes en termes de capteur ou de vecteur (par exemple, drone) laissent augurer de nouvelles perspectives avec des applications possibles sur des réseaux d'étude des variétés.

Complexité à mobiliser les expérimentateurs partenaires :

L'acquisition de données agropédoclimatiques sur les essais variétaux est considérée comme facultative par les expérimentateurs, dont la motivation s'est effritée du fait de la faible valorisation de ces données lors de l'interprétation des résultats. La rentabilité des investissements est à établir et des moyens supplémentaires sont à concéder pour inciter les acteurs à réaliser une caractérisation fine de leur site d'expérimentation. Les fichiers et bases de données nécessaires à l'organisation et au stockage des données produites sur ces essais sont aussi généralement assez frustes et hétérogènes. Des outils de collecte et de stockage des caractéristiques des essais sont à développer par les gestionnaires de réseau.

Insuffisance des outils de valorisation des informations :

Les modèles statistiques d'analyse des IGEC ainsi que les modèles agronomiques et écophysologiques de prédiction de comportement des variétés comportent actuellement des limites qui ne permettent pas de valoriser suffisamment les données de caractérisation (Lorgeou et Masson, 2013). Ces modèles pâtissent aussi symétriquement des imprécisions des données de caractérisation des environnements qui permettraient de les améliorer.

1.1.2. Actions en cours pour améliorer la caractérisation des essais CTPS

Trois exemples d'actions en cours pour améliorer la caractérisation des essais sont présentés ci-après.

i) Modules de contrôle sur le réseau CTPS Betterave sucrière

Depuis la campagne 2010, sur chacune des 19 plateformes d'essais VATE, à côté des essais rendement, sont placés deux modules de contrôle (Figure 1) :

- Un module pour le suivi des maladies du feuillage, avec des témoins pour le déclenchement des traitements sur la base de seuils, complété par des parcelles de prélèvement réparties autour des essais.
- Un module pour l'azote, avec trois niveaux de fertilisation azotée.

Ces modules ont d'abord pour objectif d'encadrer les pratiques culturales dans les essais en veillant à piloter au plus juste la protection fongicide et la fertilisation azotée. Ils fournissent également des indicateurs servant à caractériser les sites d'essais.

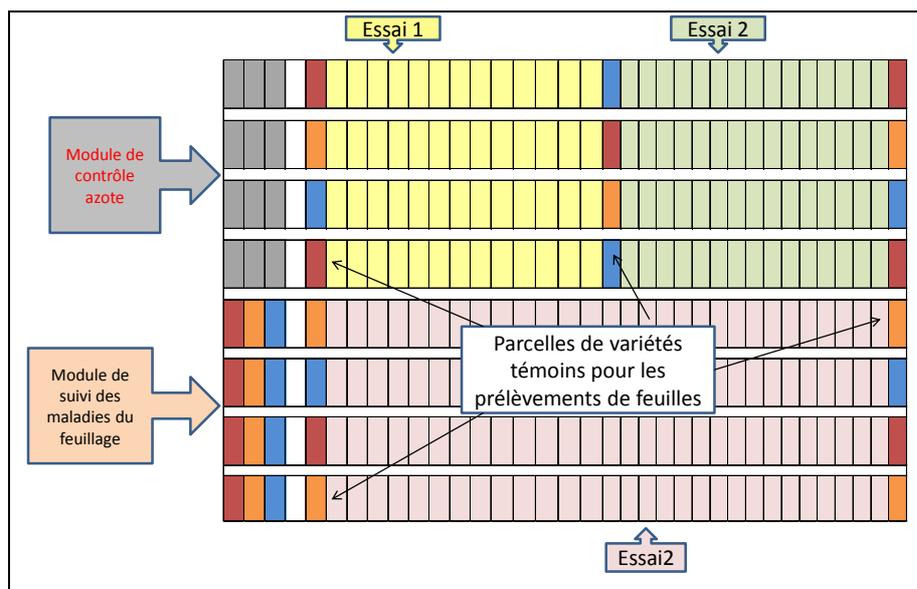


Figure 1 : Dispositif général avec modules de contrôle azote et maladies du feuillage. (Exemple sur une plateforme de 3 essais).

Module maladies du feuillage

Trois variétés témoins ont été choisies pour déclencher les traitements sur les quatre principales maladies du feuillage :

- *Cercospora beticola* (cercosporiose) : Skipper
- *Erysiphe communis* (oïdium) and *Ramularia beticola* (ramulariose) : Eleonora KWS
- *Uromyces betae* (rouille) : Danube

Ces variétés ont été choisies au vu de leur faible sensibilité par rapport aux maladies sur lesquelles elles vont déclencher le traitement. Le traitement est normalement appliqué plus tard que si son déclenchement avait été basé sur une variété de sensibilité moyenne à élevée : l'objectif est de pénaliser les variétés les plus sensibles dans les essais.

Au cours des mois de juillet et d'août, 100 feuilles sont prélevées chaque semaine sur chacune des parcelles de prélèvement réparties autour des essais (Figure 1), et notées pour la maladie correspondant à la variété de référence. Un traitement est déclenché si le seuil est atteint pour une maladie, comme indiqué sur le Tableau 1. Ce seuil est le seuil « IPM » (Indice de Pression Maladie) qui s'applique pour la recommandation aux planteurs de betterave dans le cadre du réseau de suivi des maladies du feuillage *RESOBET FONGI* de l'ITB¹.

Maladie	Variété de référence	Seuil pour le 1 ^{er} traitement nb de feuilles avec symptômes /100	Seuil pour le 2 ^{ème} traitement nb de feuilles avec symptômes /100	Seuil pour le 3 ^{ème} traitement (rare) nb de feuilles avec symptômes /100
Oïdium	Eleonora KWS	15	30	30
Cercosporiose	Skipper	5	20	25
Rouille	Danube	15	30	40
Ramulariose	Eleonora KWS	5	20	25

Tableau 1 : Seuils pour le déclenchement des traitements fongicides (campagne 2011).

¹ ITB : Institut Technique de la Betterave

Chaque traitement est appliqué sur l'ensemble des essais de la plateforme, à l'exception d'une partie du module de contrôle (Figure 2) :

- une partie ne reçoit aucun traitement,
- une partie du module ne reçoit qu'un traitement si 2 ou 2 traitements sont appliqués ;
- une partie ne reçoit que 2 traitements si 3 traitements sont appliqués (rare).

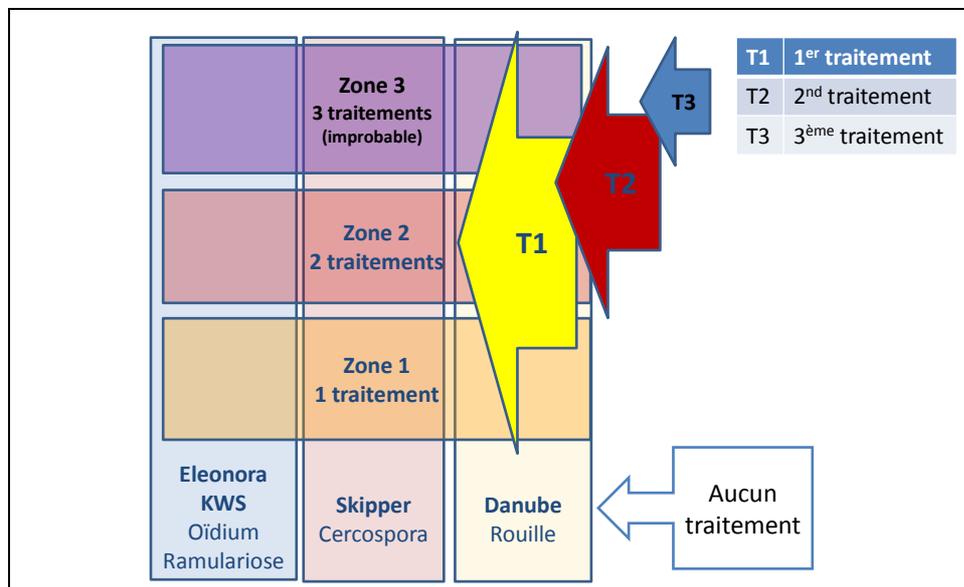


Figure 2 : Module maladies du feuillage

Après chaque traitement, il n'y a pas de prélèvement de feuilles pendant un délai de 2 semaines. Aucun traitement n'est réalisé dans un délai de 45 jours avant récolte. Si des symptômes de maladies apparaissent dans les essais traités, ils doivent être notés (échelle de 0 à 10). En fin de cycle, une commission du CTPS visite l'ensemble des essais et note les maladies présentes dans la partie non traitée du module de contrôle mais aussi dans les essais qui ont été traités.

Depuis qu'il a été mis en place, le dispositif de déclenchement raisonné des traitements fongicides a permis de réduire sensiblement le nombre moyen de traitements. Avant 2010, le nombre de traitements dans les essais CTPS était supérieur au nombre moyen de traitements recommandés par l'ITB dans le réseau d'observation RESOBET FONGI. A partir de 2010, le nombre de traitements du réseau CTPS est proche et même légèrement inférieur à ce qui est recommandé en culture. D'une manière globale, l'état sanitaire des essais est satisfaisant, mais avec ce nouveau protocole, contrairement aux années précédentes où l'on recherchait une protection maximum (3 traitements étaient fréquemment appliqués sur certains essais), des symptômes maladies peuvent apparaître dans les essais, sur les variétés les plus sensibles.

La mise en place de ce dispositif et des notations nouvelles a permis enfin d'améliorer la précision du suivi de la dynamique des maladies foliaires.

Module azote

Pour chaque plateforme d'essai, la fertilisation azotée doit être raisonnée. La dose conseillée est calculée par le logiciel Azofert® et basée sur la méthode des bilans, en tenant compte de la culture précédente, du reliquat mesuré dans les différents horizons du sol et du climat moyen du lieu.

Le module azote comprend trois niveaux de fertilisation azotée sur une seule variété (variété Python en 2010 et 2011) :

- **0 N** : aucune fertilisation azotée.
- **DC** : dose conseillée : raisonnée au moyen du logiciel Azofert®: c'est la dose appliquée sur l'ensemble du champ, à l'exception de la partie ci-dessus.
- **DC + 40** : dose conseillée + 40 unités : 40 unités supplémentaires sont appliquées.

Pour chacune des modalités, 4 parcelles standard (3 rangs de 7 m environ) sont délimitées au sein de parcelles plus larges (12 à 18 rangs) afin d'éviter les effets de bordure entre modalités (Figure 3). Ces parcelles sont récoltées comme les autres parcelles de l'essai, avec mesure du rendement, de la teneur en sucre et des éléments mélassigènes (en particulier l'azote alpha aminé). Au mois de septembre, ces parcelles sont également notées visuellement par la commission CTPS pour le développement foliaire et la couleur verte du feuillage.

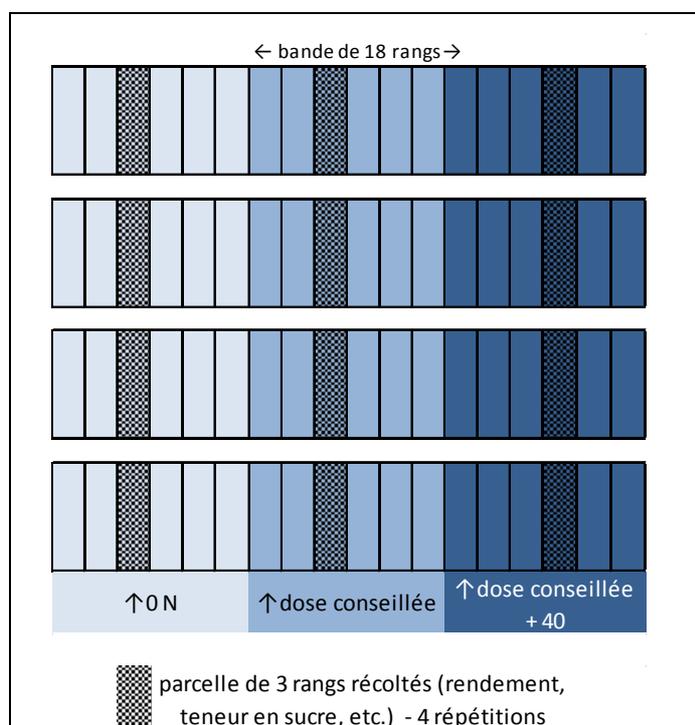


Figure 3 : Module azote

En fin de campagne, au vu de l'ensemble des données, une commission d'experts du CTPS essaie de caractériser le statut azoté des différents essais : sur-fertilisé, fertilisation proche de l'optimum, sous-fertilisation.

Ce dispositif azote a ainsi permis de bien contrôler le niveau des apports d'engrais sur le réseau. Mais la caractérisation du statut azoté d'un essai est encore perfectible et nécessiterait la mise au point d'un outil de modélisation *a posteriori* de la dynamique de l'azote.

ii) Détermination des RU de sites d'essais variétaux CTPS et post-inscription

Un projet financé par France Agri Mer et le GIS Grandes Cultures HPEE intitulé « Caractérisation de parcelles d'essais variétés de maïs, sorgho et tournesol par leur réserve hydrique (RU) et choix de parcelles d'expérimentation sous contraintes hydriques » a démarré fin 2011. Il associe Arvalis-Institut du végétal, le CETIOM, le GEVES, l'UFS, ProSorgho, les Chambres Régionales d'Agriculture, et l'INRA à travers l'unité Infosol d'Orléans. Compte-tenu du besoin de réaliser des bilans hydriques de qualité pour étudier la réponse adaptative des variétés au stress hydrique, l'action a pour objet de caractériser

les réserves hydriques (RU) des sols des essais CTPS et post-inscription des groupes Demi-tardifs des variétés de maïs, Demi-précoces en sorgho et Demi-tardifs en tournesol, c'est-à-dire dans les régions fortement concernées par un accès suffisant à la ressource en eau (Charentes, Aquitaine, Midi-Pyrénées, Sud-Est). En complément de l'information existant déjà dans les bases de données sol (dont Donesol de l'INRA d'Orléans), des observations et des mesures sur site seront réalisées selon un protocole commun entre organismes et validé par les spécialistes sol des instituts. Les sites pérennes seront caractérisés en priorité. Les plateformes étant souvent communes entre réseaux (CTPS et post-inscription), et dans une logique de mutualisation des efforts, les données acquises seront stockées dans des bases de données accessibles par les différents gestionnaires de réseaux d'essais variétaux. Un volet formation des expérimentateurs à la caractérisation de leurs sols d'essais est également prévu dans le cadre de l'action. Ce projet a également pour objectif de caractériser les sites d'expérimentation, qui seront retenus les années ultérieures dans une logique d'augmentation de la prise en compte de la variabilité des conditions de déficits hydriques aptes à mieux caractériser les variétés sur leur réponse adaptative aux manques d'eau, ce qui constitue une action prioritaire pour la section Maïs et Sorgho ou la section Tournesol du CTPS.

iii) **Projet multi-espèces et inter-instituts sur la caractérisation des lieux d'essais**

Fin 2011, un projet financé par le Ministère de l'Agriculture et associant le GEVES, Arvalis-Institut du végétal, le CETIOM, l'ITB, l'INRA et l'UFS a démarré : Pré-Projet CTPS 2011 « Caractérisation des milieux dans les réseaux d'évaluation des variétés pour la prise en compte de covariables environnementales dans le traitement des données ». Dans ce projet, un groupe de réflexion est constitué pour identifier les questions de recherche développement méthodologique sur les points suivants :

- modalités d'évaluation de l'adaptation des nouvelles variétés à des niveaux de ressource en eau et en azote non optimaux et aux stress climatiques.
- modalités d'acquisition de covariables environnementales décrivant le niveau des contraintes abiotiques du milieu des essais variétaux. Il conviendra de réfléchir également à la prise en compte possible des caractéristiques biotiques des milieux.
- moyens à développer pour mutualiser l'information acquise dans les différents types d'essais variétaux (sur les milieux des essais et sur les variétés) et ainsi connecter les réseaux des différentes étapes du continuum de connaissance des variétés.
- modalités du traitement des covariables environnementales aux différentes étapes du continuum dans des modèles d'analyse des IGEC.

Pour alimenter les travaux du groupe de réflexion, il sera réalisé un référencement des outils, des bases de données, des modèles et des méthodes disponibles pour :

- Caractériser l'environnement abiotique des essais variétaux. En particulier, il est prévu de recenser et décrire les modèles de bilans hydriques et azotés mobilisables sur des réseaux d'essais variétaux (données d'entrée nécessaires, informations fournies) ;
- Caractériser les variétés par rapport à leur adaptation à des stress abiotiques (eau, azote) ;
- Mieux comprendre et prédire les IGEC.

Le travail réalisé dans ce pré-projet a débouché sur la construction d'un projet de plus grande ampleur pour la mise au point de méthodes et outils de caractérisation des environnements des essais variétaux opérationnels à l'échelle des grands réseaux d'essais variétaux type CTPS ou post-inscription, en maximisant la mutualisation des moyens et des compétences entre les espèces et les différents maillons du continuum.

1.2. Méthodes exploratoires des IGEC actuellement utilisées sur les réseaux CTPS

Actuellement, pour certaines espèces, des techniques exploratoires des IGEC sont utilisées dans le cadre du CTPS mais seulement comme outil complémentaire pour le choix des essais VATE. Depuis 1995, ces techniques étaient utilisées pour les espèces colza, tournesol, lin et soja avec le logiciel INTERA de l'INRA (Decoux et Denis, 1990). Depuis 2010, la méthode AMMI – Additive Main Effects and Multiplicative Interaction – est utilisée dans les Commissions Choix des Essais des espèces betteraves, maïs, sorgho, colza, crucifères fourragères, tournesol, lin, soja, gazon.

Dans une première étape, une analyse de variance est réalisée selon le modèle suivant :

$$Y(i,j,k) = G(i) + E(j) + [\text{bloc}(k) \text{ dans } E(j)] + GE(i,j) + R(i,j,k)$$

- $Y(i,j,k)$ représente la variable agronomique considérée pour le génotype n°i, l'environnement n°j et le bloc n°k.
- $G(i)$ représente l'effet du génotype n° i.
- $E(j)$ l'effet principal de l'environnement n° j.
- $[\text{bloc}(k) \text{ dans } E(j)]$ l'effet du bloc n°k dans l'environnement n° j.
- $GE(i,j)$ l'interaction entre $G(i)$ et $E(j)$.
- $R(i,j,k)$ représente la résiduelle.

Cette première étape permet de tester si le facteur interaction génotype x environnement est significatif. Dans l'affirmative, une matrice d'interaction est estimée : tableau croisant génotypes et environnements et contenant les interactions.

La seconde étape consiste à réaliser une Analyse en Composantes principales (ACP) sur la matrice d'interactions. L'observation des biplots issus de l'ACP (Figure 4) permet de repérer les lieux d'essais qui classent les variétés de la même façon, de repérer les variétés qui interagissent de la même manière sur l'ensemble des lieux du réseau et enfin de repérer dans quels lieux une variété obtient de meilleurs résultats et *a contrario* de moins bonnes performances par rapport à son résultat moyen sur l'ensemble des lieux du réseau.

D'autres sorties graphiques sont fournies par l'AMMI comme le biplot 2 (Figure 5) qui représente en abscisses les moyennes des lieux sur l'ensemble des variétés pour le caractère étudié (en rouge), et les moyennes variétales sur l'ensemble des lieux (en bleu) et en ordonnées, le premier axe de l'ACP, c'est-à-dire celui qui explique le plus d'interaction. Ainsi, plus un lieu ou une variété s'éloigne (verticalement) de l'axe des abscisses, plus on peut affirmer qu'il ou elle interagit suivant le premier axe. Plus le premier axe représente d'interaction, plus on peut interpréter l'éloignement de l'axe des abscisses comme de l'interaction « tout court ». Si le premier axe n'explique qu'une petite part de la variabilité, les conclusions ne pourront être portées que sur l'interaction des variétés avec les lieux bien représentés par le premier axe. Ce second biplot permet aussi de visualiser d'éventuelles relations entre les moyennes (respectivement variétales ou des lieux) avec les interactions (respectivement des variétés ou des lieux).

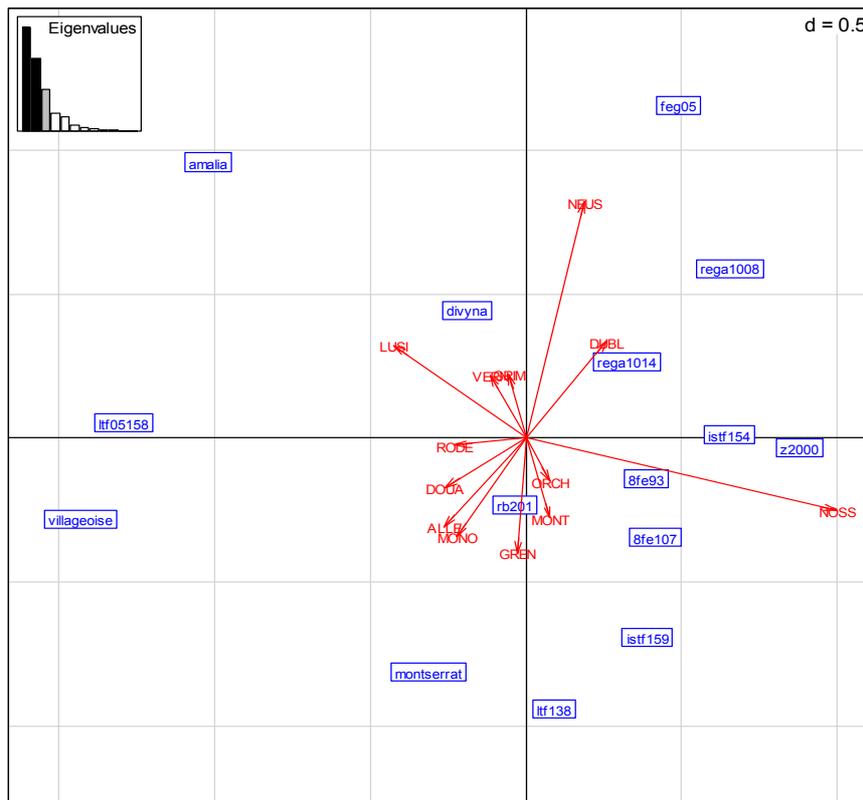


Figure 4 : Biplot 1 (Axe 2 vs Axe 1) - Réseau CTPS Féтуque élevée gazon : Aspect Esthétique Global (semis 2008, données 2010)

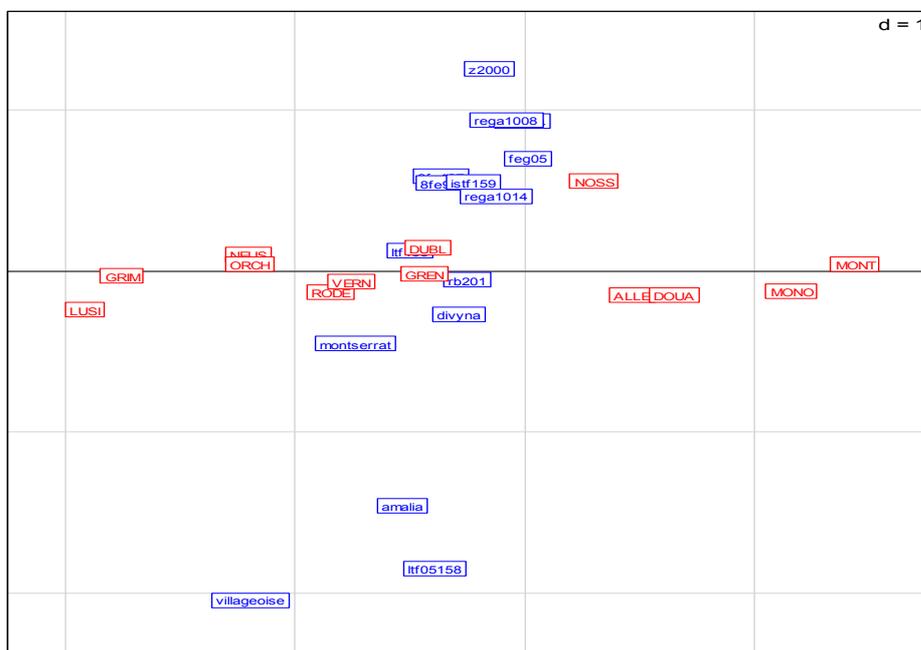


Figure 5 : Biplot 2 (Axe 1 vs Moyenne Réseau) - CTPS Féтуque élevée gazon : Aspect Esthétique Global (semis 2008, données 2010)

Des dendrogrammes issus de classifications ascendantes hiérarchiques peuvent être utilisés pour dresser la typologie des variétés et des essais. Le type de figure actuellement le plus fréquemment utilisé en Commission Choix des Essais est un graphique cartographiant les interactions Variétés x Essais tel celui de la Figure 6. Plus l'interaction est grande, plus la surface de la sphère représentant, l'interaction est importante. Lorsque l'interaction est négative, la couleur de la sphère est rouge, et a

contrario la couleur est verte quand l'interaction est positive. En Commission Choix des Essais, ce graphique permet de repérer très facilement les variétés qui ont des comportements atypiques dans certains lieux ou les essais qui classent de manière très différente les variétés par rapport aux autres lieux. Cet outil vient compléter l'expertise apportée notamment par les observations des expérimentateurs ou des visiteurs des essais.

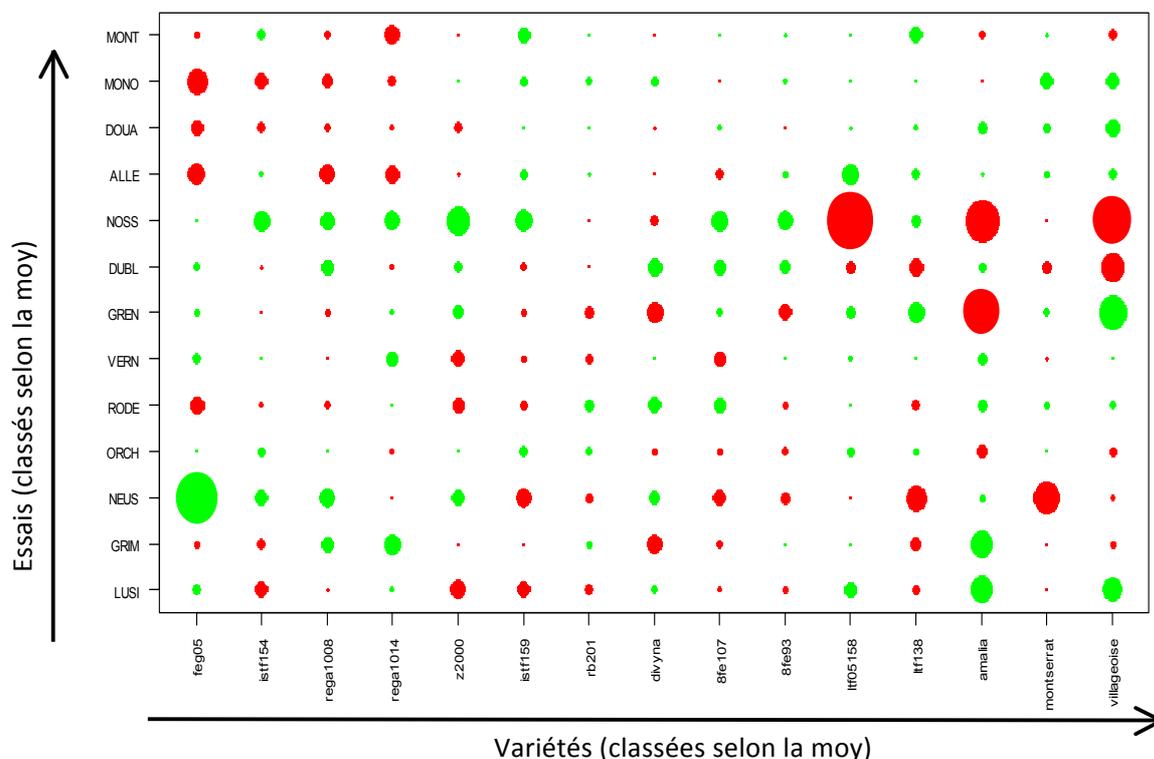


Figure 6 : Cartographie des interactions - CTPS Féтуque élevée gazon : Aspect Esthétique Global (semis 2008, données 2010)

Ainsi, les outils d'analyse actuellement déployés sur les réseaux CTPS fournissent pour l'instant une description succincte des IGEC. Cependant, associés à l'expertise agronomique réalisée sur les essais par les expérimentateurs, les homologateurs GEVES ou les experts des commissions, ces outils d'analyse permettent déjà une approche globale du phénomène d'interaction qui donne des informations intéressantes à partir de la lecture des seuls graphiques. La lacune de ces outils est la non intégration de covariables environnementales qui permettraient d'explicitier les interactions constatées. C'est l'enjeu des développements en cours dans le cadre de différents programmes de recherche qui associent notamment le GEVES. Les outils d'analyse des IGEC en cours de construction sont soit purement statistiques tels que les modèles de régressions factorielles ou bien la régression PLS (Partial Least Squares) actuellement mis en œuvre dans les démarches Diagvar [Blé tendre, Pois, Betterave, Pomme de terre (Lecomte, 2005)] ou autres [Colza, Gazon (Lassalvy et al., 2012)], soit des modèles plus mécanistes intégrant dans la description des processus biologiques et des paramètres variétaux permettant d'expliquer tout ou partie des IGEC, tel que cela est mis en œuvre dans le logiciel Sunflo sur tournesol (Casadebaig et al., 2010).

2. Vers quelle utilisation des IGEC dans le cadre de l'inscription au catalogue ?

Quand bien même il deviendrait possible d'expliquer finement les IGEC dans les réseaux d'évaluation VATE, il convient de se poser la question du type d'utilisation qui pourrait en être faite dans le cadre des épreuves d'inscription au catalogue.

D'abord, il convient de rappeler quelques contraintes fortes liées à l'évaluation VATE. Les réseaux VATE sont limités en nombre d'essais ce qui peut poser des problèmes par rapport à un objectif de représentativité d'une large variabilité de conditions de culture. Les études VATE sont également limitées dans le temps : 2 années en général. Or, nous savons que les conditions de culture de l'année peuvent affecter fortement la performance des variétés (Lecomte et al., 2009). La durée des épreuves VATE est donc probablement insuffisante pour caractériser finement une variété. Il serait donc opportun de pouvoir bénéficier des informations déjà existantes sur les variétés, détenues par les obtenteurs. De même, il serait utile pour les instituts techniques en charge de l'évaluation en post-inscription de disposer de l'information acquise au niveau du CTPS et chez les obtenteurs. Une autre contrainte forte à prendre en compte pour le développement de nouveaux outils d'analyse des résultats des essais variétaux du CTPS sont les exigences en termes de délai de livraison des résultats. Pour répondre à la nécessité de mettre rapidement sur le marché les nouvelles variétés, les décisions au niveau du CTPS doivent continuer à se prendre dans les délais actuellement en vigueur : c'est-à-dire selon les espèces de quelques semaines à quelques mois après la récolte des essais. Enfin, toute évolution des dispositifs devra impérativement veiller à une maîtrise des coûts c'est-à-dire qu'il doit s'agir d'évolutions à coûts constants ce qui a été fortement rappelé par le Comité Plénier du CTPS.

Une fois ces contraintes prises en compte, on peut attendre d'une meilleure utilisation des IGEC qu'elle permette d'abord dans un premier temps de mieux décrire et comprendre les réseaux d'essais. D'abord, pour faire du diagnostic *a posteriori* des conditions environnementales dans les essais ce qui apporterait des éléments d'expertise supplémentaires dans le cadre des Commissions Choix des Essais. Les analyses IGEC fourniraient également des indicateurs permettant de regrouper les essais présentant des conditions de stress similaires et ainsi d'analyser la réponse des variétés candidates dans différents scénarii de stress : par exemple, faire un regroupement d'essais correctement fertilisés et un regroupement d'essais en sous-fertilisation. La meilleure description des milieux expérimentaux devrait également permettre d'apporter des éléments d'orientation pour faire évoluer les réseaux et les protocoles. Par exemple, les travaux réalisés dans le projet Sunflo ont permis de mettre en évidence la sous-représentativité des situations de stress hydrique de pré-floraison dans les réseaux CTPS ou CETIOM par rapport aux situations rencontrées chez les producteurs de tournesol (Debaeke et al., 2011). Ceci constitue donc un élément de réflexion pour repenser la géométrie des réseaux dans cette espèce.

Au-delà de la caractérisation des essais et des réseaux, une meilleure interprétation des IGEC vise aussi une meilleure caractérisation de variétés mais un certain nombre de questions doivent être abordées avant d'envisager cette utilisation dans le cadre de l'inscription. Pour définir le comportement d'une variété par rapport à un type de facteur limitant, il paraît nécessaire de se poser la question du dispositif le plus approprié pour évaluer le comportement par rapport à ce facteur limitant : doit-on le faire dans des essais dédiés mais avec un risque d'augmenter la taille des dispositifs ou essayer de le faire sur des réseaux multifactoriels moyennant des outils puissants de description de l'environnement expérimental et d'explication des IGEC. La finalité d'utilisation des sorties des modèles IGEC doit être également posée. Il est probable que, dans un premier temps, il s'agira de fournir un complément d'information sur les conditions dans lesquelles les variétés sont testées, sur le comportement des variétés dans des situations agropédoclimatiques correctement décrites. Pour une prise en compte dans les règles de décision, la fiabilité, la robustesse et la reproductibilité des informations nouvelles devront être démontrées sachant qu'une des grandes limites des études VATE est leur durée relativement courte (2 ans). L'utilisation des IGEC implique de se demander le type de variété qui doit être favorisé à l'inscription : les variétés ayant un comportement stable dans une large gamme de

situations agropédoclimatiques (peu d'interaction) ou celles ayant une performance moyenne, certes pas des plus élevées, mais étant particulièrement adaptées à des conditions particulières de culture (forte interaction). Enfin, la question du continuum de connaissance des variétés doit être traitée. Au-delà des problèmes de confidentialité des données expérimentales qui font actuellement l'objet d'une réflexion au CTPS, la valorisation d'informations produites aux différentes étapes de la vie d'une variété sera facilitée que si les méthodes de caractérisation de l'environnement et d'analyse de l'IGEC sont homogènes chez les différents acteurs de la filière semences et que des outils adaptés (bases de données interconnectées, outils d'analyse de jeux de données déséquilibrés) sont mis en place. L'ensemble des points qui viennent d'être soulevés nécessite à la fois une approche générale au niveau du CTPS mais doit être également décliné au sein de chaque espèce ou groupe d'espèces pour prendre en compte à la fois la biologie des espèces, la réalité des marchés et la structure professionnelle, avec notamment l'existence ou non de dispositifs de post-inscription.

Références bibliographiques

- Casadebaig P., Guillioni L., Lecoeur J., Christophe A., Champolivier L., Debaeke P., 2010. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural Forest Meteorology* 151, 163-178.
- Debaeke P., Casadebaig P., Mestries E., Palleau J.P., Salvi F., Bertoux V., Uyttewaal V., 2011. Evaluer et valoriser les interactions variété-milieu-conduite en tournesol. *Innovations Agronomiques* 14, 77-90.
- Decoux G., Denis J.B., 1990. INTERA logiciels pour l'interprétation statistique de l'interaction entre deux facteurs. INRA Laboratoire de Biométrie, Versailles (France). 120 p.
- Lassalvy S., Gensollen V., Sampoux J.P., Huyghe C., 2012. Genotype x Environment interactions in turf Variety Evaluation and Registration on the French National List – 3rd European Turfgrass Society Conference Proceedings.
- 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. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INAPG, Paris (France), 174 p.
- Lecomte C., Prost L., Gauffreteau A., 2009. Présentation d'une méthode pour améliorer la connaissance des aptitudes variétales, intérêt des modèles, besoins de développements nouveaux. *Innovations Agronomiques* 7, 105-119.
- Lorgeou J., Masson F., 2013. Apprécier les interactions Génotypes x Environnements grâce aux dispositifs expérimentaux - Retour d'expériences d'évaluateurs de variétés en épreuves CTPS et Post-Inscription. Présentation au Séminaire ESPARA. 13 Octobre 2013, Paris, France.
- Masson F., 2010. Groupe de Travail CTPS "Caractérisation des réseaux et des variétés en plantes agricoles" - compte rendu de la réunion du 14 octobre 2010, 67 p.
- Masson F., 2011. Groupe de Travail CTPS "Caractérisation des réseaux et des variétés en plantes agricoles" - compte rendu de la réunion du 06 avril 2011, 44 p.
- Tardieu F., 2011. Projet Phenome. Présentation aux Journées Annuelles du réseau IGEC. 21-22 Novembre 2011, Paris, France.
- Vialle P., 2011. Rapport Semences et agriculture durable. http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/110525-RC-rapport_SAD-version_restituee.pdf. 177 p.