



HAL
open science

Tolérance du blé tendre aux stress biotiques et abiotiques ” C2008-02 Blé tendre

Pierre Bancal, David Gouache, Marie-Odile Bancal

► **To cite this version:**

Pierre Bancal, David Gouache, Marie-Odile Bancal. Tolérance du blé tendre aux stress biotiques et abiotiques ” C2008-02 Blé tendre. [Rapport de recherche] Inrae. 2012. hal-02947486

HAL Id: hal-02947486

<https://hal.inrae.fr/hal-02947486v1>

Submitted on 24 Sep 2020

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

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

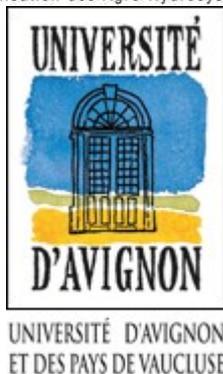
Projet Contrat de Branche « Tolérance du blé tendre aux stress biotiques et abiotiques » C2008-02 Blé tendre

Rapport final

Auteurs : D. Gouache (Arvalis), MO Bancal, P Bancal (INRA EGC)

01/10/2012

Partenaires





Plan du document :

- I) Rappel des objectifs
 - 1) Introduction & hypothèses de travail
 - 2) Plan de présentation des travaux du rapport
- II) Expérimentations réalisées ou regroupées
 - 1) Données historiques regroupées
 - 2) Expérimentations réalisées
 - a) Expérimentations « détaillées »
 - b) Expérimentations « caractérisation variétale »
 - 3) Analyses de base réalisées
 - 4) Expérimentations retenues
- III) Résultats
 - 1) Identification de traits conférant de la tolérance par une approche couplant données expérimentales et modélisation
 - a) Principe général
 - b) Résultats
 - c) Perspectives
 - 2) Approches et limites de comparaison variétale de la tolérance via la relation $IFVI \times Rendement$
 - a) Introduction
 - b) Courbes enveloppes par variétés
 - c) Ecart à une courbe enveloppe générale
 - d) Courbes par variété – essay analysées par modèles mixtes
 - e) Application aux données « Blés rustiques » : limites du jeu de données
 - f) Intérêts et limites des différentes méthodes
 - 3) Approches de simplification de la mesure vers des systèmes moyens ou hauts débits
 - a) Comparaison des mesures d'IFVI approchées avec l'IFVI de référence
 - a) IFVI « F2 »
 - b) IFVI « couvert »
 - b) Comparaison des classements variétaux obtenus avec les IFVI approchés pour les différentes méthodes de comparaison variétale
 - c) Conclusions
- IV) Discussion générale et conclusions
 - 1) Rappel des principaux résultats
 - 2) Perspectives
- V) Annexes
 - 1) Communications réalisées

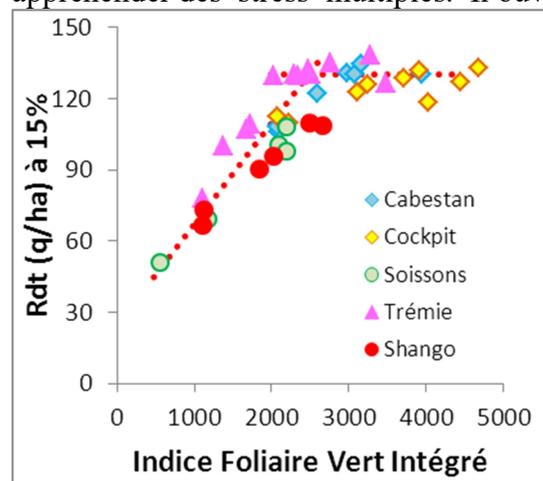
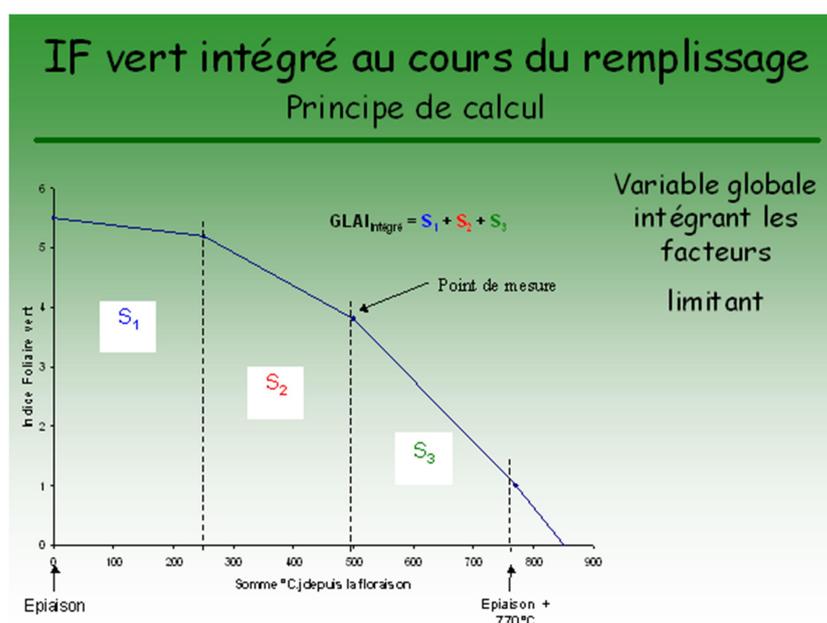
- 2) Mémoires encadrés
- 3) Description succincte de la base de données
- 4) Protocole type des essais détaillés
- 5) Protocole type des essais « Blé rustiques »
- 6) Utilisation du logiciel d'analyse d'images SATVA
- 7) Descriptif rapide du projet de thèse approfondissant le volet « sources-puits » de la tolérance
- 8) Représentation de la tolérance calculée sur les données Blés rustiques à titre d'exemple

I) Rappel des objectifs

1) Introduction & hypothèses de travail

Le projet se focalise sur la notion de tolérance, entendue comme la capacité à maintenir un niveau de production (et/ou de qualité) élevé en présence avérée de stress. Cette notion apparaît capitale dans le contexte actuel et à venir de l'agriculture, du fait de 2 facteurs extérieurs : la pression sur les intrants et le changement climatique. Le second implique des stress moins prévisibles et plus fréquents, leur contrôle étant rendu plus aléatoire par le premier.

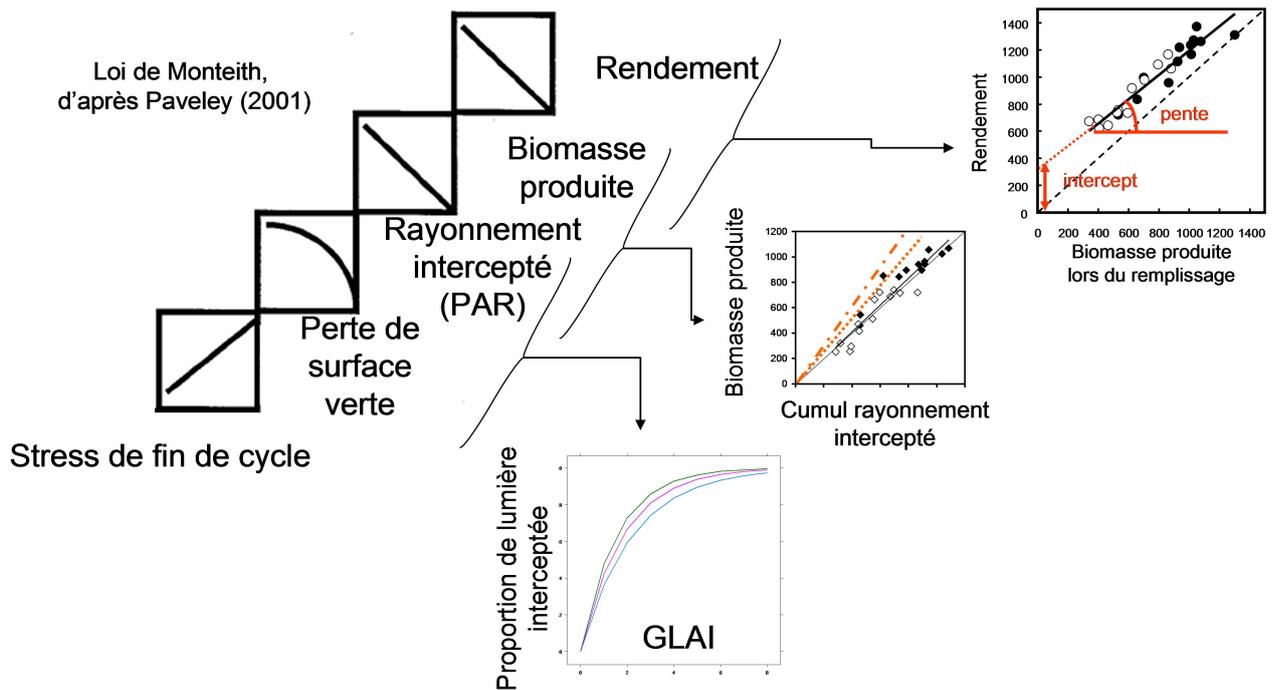
Le projet se propose d'étudier de manière approfondie la notion d'indice foliaire vert intégré (IFVI ou GLAI intégré = Green Leaf Area Index intégré). Cet indicateur correspond à l'intégrale de la surface verte foliaire déployée par le couvert végétal au cours du remplissage du grain. En effet, plusieurs stress se manifestent via une perte de surface verte : les maladies foliaires du complexe parasitaire rouille brune – septoriose, les stress azotés et les stress hydriques de fin de cycle. L'intérêt de cet indicateur est notamment sa capacité à appréhender des stress multiples. Il ouvre ainsi la voie à une caractérisation



variétale plus multicritère. Une première série de travaux à Arvalis avait montré que cet indicateur se relie bien au rendement, mais de manière différenciée selon les variétés (Gate, 2006). Ainsi, pour une même quantité de surface verte disponible pendant le remplissage, il apparaît que la variété Trémie fait un rendement plus élevé que Shango par exemple. Ces deux types variétaux se distinguent en particulier par leur mode d'élaboration du rendement : Shango nécessitant une biomasse et un tallage forts alors que Trémie demande moins de croissance car il compense par une fertilité des épis et un PMG potentiel élevé.

On trouve également que la variété Cockpit présente des IFVI très élevés, dans la zone de plateau de la courbe : elle semble donc pouvoir perdre de la surface verte sans être impactée en termes de rendement.

La relation entre IFVI et rendement et sa forme particulière, le caractère saturant de la relation, peut être expliquée et analysée par la décomposition de l'élaboration du rendement d'après la loi de Monteith, qui traduit les étapes allant de l'interception de la lumière à sa conversion en biomasse et à l'allocation de cette biomasse aux organes récoltés, les grains.

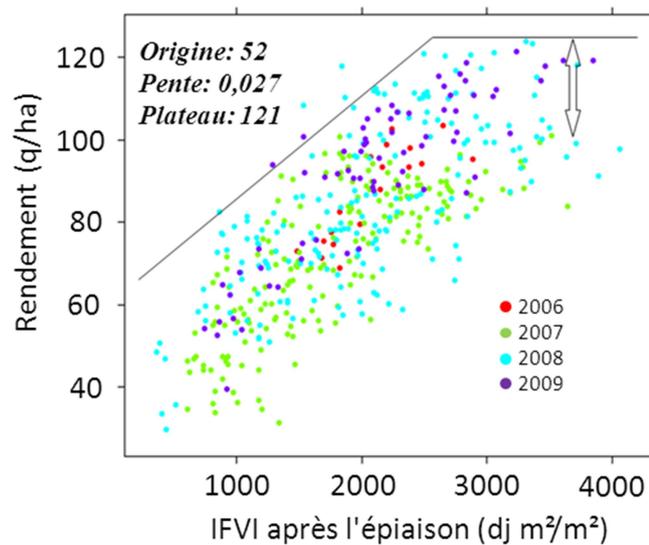


Ce schéma permet de repérer 3 étapes durant lesquelles il est possible de voir la tolérance se manifester.

D'autres approches similaires, toutes basées sur la prise en compte de la dynamique de surface verte pendant la phase de remplissage du grain, ont permis d'élaborer un certain nombre d'hypothèses supplémentaires. En Angleterre, il a été proposé que la tolérance et le potentiel de rendement seraient négativement corrélés (Paveley, 2002; Parker, 2004; Foulkes, 2006). Cependant, l'approche développée dans ces travaux ne tient notamment pas compte du caractère curvilinéaire de la relation IFVI – rendement : les relations utilisées sont linéaires, sans plateau. Dans ces travaux, la taille de la feuille drapeau est évoquée comme une source possible de tolérance. Des éléments comme la force de puits ou les réserves contenues dans les tiges, pourtant souvent évoquées comme sources de tolérance dans le cas des stress hydriques, sont étonnamment négativement corrélées à la tolérance à la septoriose dans ces travaux. Enfin, notons que Bancal et al. (2008) ont montré que des indicateurs comme l'IFVI pouvaient également avoir un rôle important dans la compréhension et l'étude du rendement en azote, et donc du taux de protéine, des grains.

Il est important de noter que la loi de Monteith qui est centrale dans le raisonnement ci-dessus correspond à une hypothèse d'élaboration du rendement dans des situations où l'interception lumineuse est le principal facteur limitant. Or, ceci peut ne pas systématiquement s'avérer être le cas. Ainsi, on peut imaginer la relation IFVI – rendement comme une « courbe-enveloppe », c'est-à-dire que pour un IFVI donné, les valeurs de rendement peuvent être très variables entre situations pédoclimatiques, et les valeurs maximales de rendement correspondent s'approchent du potentiel dicté par la loi de Monteith.

Les données historiques acquises par Arvalis avant le projet montrent en effet ce type de comportement : On observe en effet la particularité de 2007 qui en tendance conduit pour un même IFVI à un rendement inférieur à celui observé les autres années, du fait de facteurs limitants autres que l'interception lumineuse qui ont été prégnants en 2007.



2) Plan de présentation des travaux du rapport

Nous présenterons premièrement une description de l'ensemble des jeux de données acquis et/ou utilisés lors du projet, et les objectifs associés à cette acquisition de données. La présentation des résultats d'analyse de données du projet sera ensuite découpée en 3 sections. La 1^{ère} section restituera les résultats d'une démarche d'analyse des données associant modélisation et exploitation des données expérimentales pour identifier et quantifier l'apport de certains traits de fonctionnement du couvert en matière de tolérance. On terminera cette section en discutant certains résultats intermédiaires obtenus directement à partir des données expérimentales, qui pourraient faire l'objet d'études suivant une démarche similaire.

La 2^{nde} section traitera de la capacité à identifier des tolérances variétales par l'exploitation directe des relations IFVI – rendement.

Enfin, la 3^{ème} section traitera des différentes possibilités identifiées de simplification de l'acquisition de la mesure d'IFVI.

On résumera dans une dernière partie les conclusions des travaux du projet.

II) Matériel & méthodes : données expérimentales acquises et/ou exploitées pour le projet

Deux grands types d'expérimentations ont été mises en œuvre pour le projet. Dans les deux types, l'élément commun est de chercher à créer, par des ITK différenciés, des gammes de variation d'IFVI importantes. La 1^{ère} famille d'expérimentations visait à mettre en œuvre un ensemble de mesures détaillées permettant de décomposer finement les étapes de l'élaboration du rendement et de la tolérance. Cette famille d'expérimentations a été mise en œuvre par les partenaires Arvalis, INRA-EGC et Lasalle-Beauvais. Pour ces analyses, des données « historiques », acquises avant le projet par Arvalis ou INRA-EGC ont également été exploitées.

Le 2nd type d'expérimentations visait à acquérir des données IFVI – Rendement sur une plus large gamme variétale afin d'établir un plus grand nombre de comparaisons de variétés. Pour ceci, on s'est appuyé sur des expérimentations des Unités Expérimentales INRA de Rennes, (Le Rheu), Le Moulon et Lusignan où sont implantés des essais du réseau « Blés Rustiques » où des variétés sont croisées avec des ITK à niveau d'intrants très différents.

L'ensemble des données expérimentales acquises dans le cadre du projet ont été regroupées en une base de données (Description succincte Annexe 3). Celle-ci est disponible auprès de Pierre Bancal à l'INRA EGC (bancal@grignon.inra.fr)

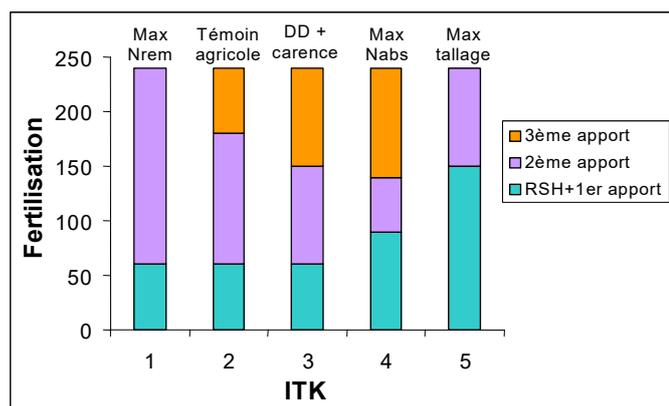
1) Données historiques regroupées

a) Arvalis :

Essai	Années	Sites	Variétés	Conduites	Mesures
Epidemsepto	-2006 -2007 -2008	Villiers-le-Bâcle (91) Rots (14)	Soissons	✓ Traité – non-traité ✓ Différentes modalités de densité et date de semis	cf. INRA EGC sauf les mesures de biomasse et statut azoté qui sont faites au niveau du couvert
Varsepto	2007	Le Subdray (18) Plélo (22) Cesseville (27) St Hilaire (51) Villiers-le-Bâcle (91)	Apache Toisonдор Roysac Charger Paledor Dinosor	✓ Traité – non-traité	cf. INRA EGC sauf : aucune mesure de biomasse & statut azoté
	2008	Le Subdray (18) Plélo (22) Cuperly (51) Villiers-le-Bâcle (91)	Koreli, Sogood et Rosario (que dans le 91)		

b) INRA EGC :

Il s'agit d'un essai conduit en 2007-2008 sur le site de Grignon, comportant 5 conduites azotées croisées avec deux niveaux de fongicide (couverture complète et non-traité). 3 variétés ont été suivies : Soissons, Autan et Bastide. Des mesures de stades, composantes du rendement, surface verte, biomasse et statuts azotés par organe ont été réalisées.



2) Expérimentations réalisées

a) Expérimentations « détaillées »

Les expérimentations détaillées réalisées sont décrites succinctement dans le tableau ci-dessous :

Partenaire	Site	Année	Nb Variétés	Modalité N	Modalité F
ARVALIS	Villiers-le-Bâcle (91)	2009	6	N1 - N2	F1 - F2 - F3 - F4
		2010	6	N1 - N2	F1 - F2 - F3 - F4
		2011	6	N1 - N2	F1 - F2
INRA EGC	Grignon (78)	2009	8	N1 - N2 - N3	F1 - F2
		2010	9	N1 - N2 - N3	F1 - F2
		2009	5	N1 - N2	F1 - F2
La Salle	Beauvais (60)	2010	5	N1 - N2	F1 - F2
		2011	5	N1 - N2	F1 - F2

Le protocole détaillé « type » de ces essais est décrit en annexe 4. Il s'agit de celui mis en œuvre à Arvalis.

Toutes les mesures envisagées dans ce protocole type n'ont pas forcément été réalisées partout. Par exemple l'acquisition de données avec une approche indirecte a été réalisée uniquement sur le site Arvalis. Plus important, un certain nombre d'éléments essentiels n'ont pas pu être mesurés sur le site de Lasalle-Beauvais. Le bilan des mesures de surfaces vertes (essentielles pour le calcul d'IFVI) effectivement exploitables est résumé ci-dessous :

Site	Année	Données LAI	Notation maladie	Nb de dates du suivi	Photos verticales	Nb de dates du suivi
Arvalis	2009	ok	ok	F1 - F4 : 4 - 5	ok	4
				F2 - F3 : 0		
	2010	ok	ok	F1 - F4 : 5	ok	3
				F2 - F3 : 1		
2011	ok	ok	ok	F1 - F4 : 5	ok	4
				F2 - F3 : 1		

Site	Année	Données LAI	Notation maladie	Nb de dates du suivi	Photos verticales	Nb de dates du suivi
EGC	2008	ok	ok	F1 – F2 : 8	x	x
	2009	ok	ok	F1 – F2 : 8	x	x
	2010	ok	ok	F1 – F2 : 8	x	x
Lasalle	2009	x	ok	6 (1 seule date post-épiaison)	x	x
	2010	x	ok	4 (1 seule date post-épiaison)	x	x
	2011	x	ok	3 (1 seule date post-épiaison)	x	x

b) Expérimentations « caractérisation variétale »

Le protocole type est décrit en annexe 5. Il s'agit de celui diffusé au réseau en 2010.

La particularité de ces essais est la mise en œuvre de méthodes indirectes d'acquisition des mesures de LAI et de surfaces vertes permettant de calculer l'IFVI. Ces méthodes, décrites avec le protocole de l'annexe 5, utilisent la prise de photos numériques verticales et l'analyse d'images pour estimer les surfaces vertes. Un outil de traitement d'image mis au point par l'INRA EMMAH a été utilisé : le logiciel SATVA, dont l'utilisation est décrite annexe 6 (<http://www4.paca.inra.fr/emmah/Production-Documentation/Outils-et-modeles/SATVA>).

Les expérimentations mises en place sont décrites ci-dessous :

Partenaire	Site	Année	Nb Variétés	Modalité N	Modalité F
Réseau « Blé rustique »	Le Moulon (91)	2010	24	3 itinéraires techniques: - N1 x F1 - N2 x F2 - N3 x F3	
		2011	24		
	Lusignan (86)	2010	24		
		2011	24		
	Rennes (35)	2009	24		
		2010	24		
		2011	24		

Comme précédemment, tous les essais n'ont pas pu être pleinement valorisés car certaines données indispensables au calcul de l'IFVI n'ont pas toujours pu être acquises. L'état des lieux est présenté ci-après :

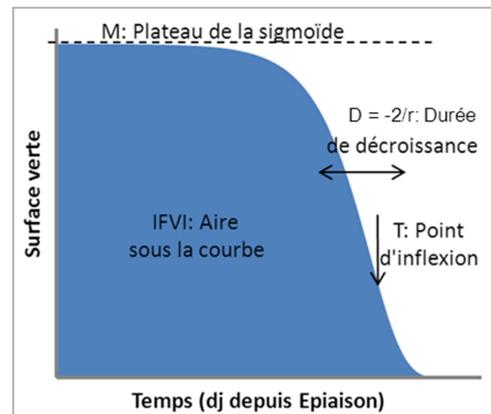
Site	Année	Données LAI	Notation maladie	Photos verticales	Nb de dates du suivi
Rennes	2009	ok	ok	ok	2
	2010	x	ok	ok	4
	2011	ok	ok	ok	4
Le Moulon	2010	ok	ok	ok	4
	2011	ok	ok	ok	5
Lusignan	2010	ok	ok	ok	5
	2011	ok	ok	ok	4

3) Analyses de base réalisées

L'analyse de base des données consiste à ajuster une courbe sigmoïde de décroissance de la surface verte (%SV) aux données acquises sur chaque parcelle. Dans notre cas, on a ajusté une courbe de Gompertz. Cette courbe permet d'extraire des paramètres importants décrivant la cinétique. Intégrée sur la durée du remplissage, elle permet de calculer l'IFVI. Le cas le plus simple est décrit ci-après.

Un ajustement du %SV à une sigmoïde Gompertz a été obtenu pour chacun des 4 niveaux supérieurs de feuilles (l'essentiel du vert à l'épiaison), ainsi que pour l'ensemble du couvert non stratifié. Dans le cadre de ce rapport, on ne présentera que les résultats obtenus par ajustement de l'ensemble du couvert complet non stratifié. On force le paramètre M à 100% de surface verte. Donc le plateau de GLAI (indice foliaire vert) est posé égal au LAI (indice foliaire, c'est-à-dire m^2 de couvert / m^2 sol) du couvert, et on n'ajuste que deux paramètres, T et r. le paramètre T est le point d'inflexion de la courbe, qui dans une Gompertz est atteint quand la surface verte est descendue à 37%: T indique si la sénescence est précoce ou tardive. Le paramètre r est le taux de décroissance originel de la Gompertz. Je préfère figurer $D = -2/r$ qui indique la durée de chute entre 80% et 20% de SV, donc si la sénescence est rapide ou lente. Le rapport entre LAI et D a la dimension d'une vitesse de sénescence, mais n'est pas un bon indicateur, car dans une Gompertz, il n'y a pas de période linéaire: la chute est de type exponentielle jusqu'à T. Enfin l'IFVI est l'intégrale de la courbe qui doit être réalisée par triangulation.

Signification des paramètres issus d'un ajustement des courbes de surface verte à une sigmoïde Gompertz



Néanmoins, il faut noter que ce cas simple peut être rendu plus difficile dans certains cas précis. En effet, dans notre exemple, le dernier point disponible correspond à une date où la surface verte est à zéro. Or, si la mesure n'a pas été faite assez tard, ceci peut ne pas être le cas. Ce point est surtout problématique dans le cas des mesures indirectes car les photos mesurent également la surface verte des épis. Dans le cas des peuplements malades, cette surface est loin d'être négligeable lors des dernières mesures. On peut régler le problème en considérant que la surface verte de la dernière date ne correspond qu'à la surface des épis. Cela suppose toutefois que la dernière photo ait été prise à une date où les surfaces foliaires sont entièrement sénescentes. C'est effectivement le cas sur la plupart des essais, mais cela s'est avéré peu réaliste pour les essais de Rennes. Ainsi, le fait de considérer la surface verte foliaire comme étant nulle à la dernière date de prise de photo avait peu d'influence sur les ajustements effectués pour les essais de Lusignan et du Moulon, alors qu'à Rennes cette stratégie simple posait problème.

4) Expérimentations retenues

Pour les analyses plus poussées, les essais retenus ont donc été ceux de Grignon, d'Arvalis, du Moulon et de Lusignan.

III) Résultats

1) Identification de traits conférant de la tolérance par une approche couplant données expérimentales et modélisation

a) Principe général

Cette section va détailler une démarche s'appuyant sur les données expérimentales décrites précédemment pour évaluer certains traits de tolérance. Cette démarche s'appuie premièrement sur une caractérisation grâce aux courbes de Gompertz de l'ensemble des cinétiques de surfaces vertes observées. Par ce biais, on peut construire des couverts "virtuels" sains (traités avec fongicides) ou malades (sans traitement) dont les caractéristiques sont représentatives de ce qui a été observé. On peut ensuite faire varier certains des paramètres (taille maximale, date de perte de surface, vitesse de perte de surface) de ces couverts, tout en continuant à garder, grâce aux données expérimentales, des paramètres réalistes.

La possibilité de simuler une grande diversité de couverts virtuels apporte une plus-value essentielle aux données expérimentales : elle permet de tester la tolérance "toutes choses égales par ailleurs", ce qui est très difficile en exploitant directement les données expérimentales, car chaque essai a ses spécificités.

L'approche présentée ci-après ne concerne que la 1^{ère} étape de l'élaboration du rendement et de la tolérance, à savoir l'interception lumineuse. En effet, cette étape est modélisable simplement. Le calcul de la tolérance d'un couvert virtuel consiste donc à étudier le rapport entre l'interception lumineuse du couvert malade et celui du couvert sain. Dans ce cas, plus la valeur est élevée, plus la proportion de rayonnement perdu du fait de la maladie est petite, et donc plus grande est la tolérance du couvert. Ce travail a été réalisé en considérant le couvert globalement (moyenne des 4 derniers étages foliaires). Après la présentation des résultats, les perspectives offertes par cette démarche et les approfondissements de celle-ci seront évoqués.

b) Résultats

- Description des données expérimentales d'IFVI et rendement

Des mesures directes de surface verte des limbes étaient disponibles pour deux stations du contrat de branche ("Grignon": scanner; "Villiers": échelle de Dart). Dans la base Villiers, les traitements fongicides F2 et F3 ne sont pas pris en compte. Il reste des maladies dont l'impact peut aller jusqu'à 49% de perte de Rdt (médiane 12%). D'autre part, l'impact des maladies étant très faible dans la base Grignon en 2008-2010 (maximum 33%, médiane 7%), j'ai complétée celle-ci par quelques données historiques sur Soissons. Enfin, j'ai ajouté les résultats de l'expérimentation VarSepto en 2007-2008 (base "VarSepto") réalisée sur diverses parcelles du réseau Arvalis, avec des variétés différentes, mais un impact important des maladies (maximum 69%, médiane 30%). On a au final 161 cultures (les trois blocs étant regroupés pour une meilleure lisibilité).

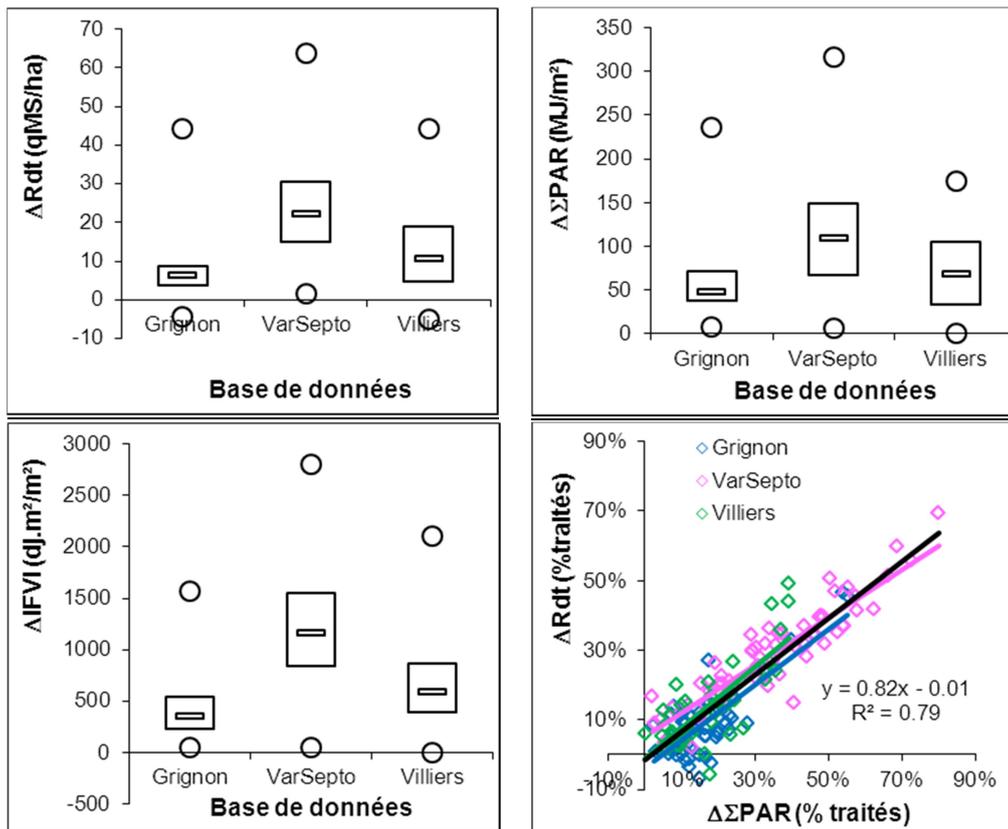


Figure 1: Effet du traitement fongicide dans les trois bases de données sur le rendement en MS, la somme de PAR accumulée et l'Indice Foliaire Vert Intégré après l'épiaison.

L'IFVI a été obtenu par triangulation sur les ajustements Gompertz des 4 dernières strates foliaires (cf ci-dessous) avec un pas de temps de 5 dj entre 0 et 900 dj. Le ΣPAR indiqué est calculé à partir des relevés météo propres à chaque culture en stratifiant le couvert avec un K_{PAR} foliaire de 0,68. La représentation en box-plots indique la médiane et les 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour chaque base. On y a ajouté les valeurs extrêmes (cercles). Le dernier graphe indique les corrélations entre $\Delta \Sigma PAR$ et ΔRdt (en couleur pour chaque base, en noir pour tous les points).

On a calculé (voir ci-dessous) l'IFVI et le ΣPAR absorbé après l'épiaison pour chaque culture. Bien que la relation de l'IFVI à ΣPAR (et au Rdt) ne soit pas linéaire, les pertes d'IFVI de ΣPAR et de Rdt sont linéairement corrélées dans les trois bases (de plus en plus étroitement de la base Grignon à la base VarSepto). Le r^2 obtenu en groupant toutes les données atteint 0,8 entre $\Delta \Sigma PAR$ (ou $\Delta IFVI$) et ΔRdt . Contrairement à ce que j'avais noté pour les rapports intermédiaires, je ne vois plus d'amélioration entre $\Delta IFVI$ et $\Delta \Sigma PAR$, autrement dit la variabilité "climatique" de la tolérance, qui devrait s'insérer à ce niveau, disparaît dans la marge d'erreur des mesures.

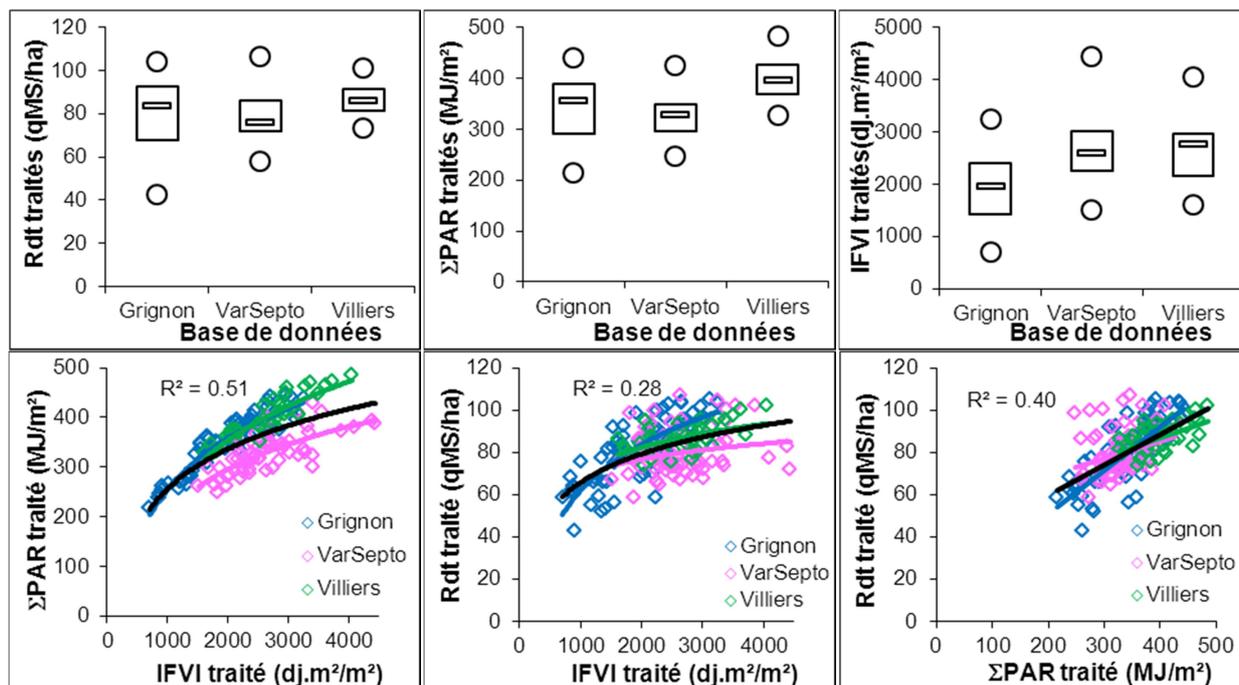


Figure 2: Rdt, Σ PAR et IFVI dans les trois bases de données pour les cultures qui ont reçu un traitement fongicide.

Les couverts traités de la base Grignon ont une médiane et des maxima de Rdt comparables à ceux des autres bases, mais une variabilité plus importante et des minima très bas à cause à la fois de l'utilisation d'un ITK à faible apport azoté et d'une variété (Lona) à faible potentiel. Si la distribution des Σ PAR dans les trois bases ressemble à celle des Rdt, celle des IFVI montre une dispersion supérieure et un décalage entre la base Grignon et les autres. On pourrait y voir un effet de la non-linéarité entre IFVI et Σ PAR (ou Rdt) un IFVI plus faible n'est pas forcément pénalisant en terme de Σ PAR ou de Rdt. D'autre part, la relation entre IFVI et Σ PAR semble commune aux bases Grignon et Villiers, mais elle est manifestement différente dans la base VarSepto à cause du climat particulier à cette base. Comme indiqué dans les rapports précédents, un calcul du Σ PAR sous climat standard conduit à une relation entre IFVI et Σ PAR commune aux trois bases (figure 3).

Il est regrettable que seule la base Grignon explore la gamme des IFVI < 2000 dj m²/m² car cette base présente peu de maladies importantes, et pas dans cette gamme.

Enfin la relation entre Σ PAR et Rdt semble commune aux trois bases, mais une analyse plus fine révélerait des effets années, ITK et variété.

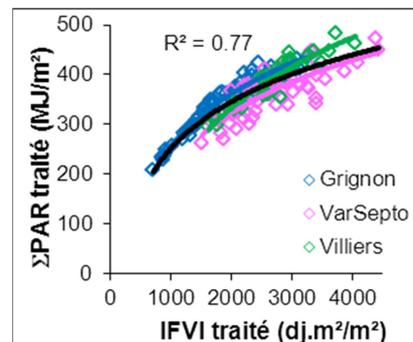
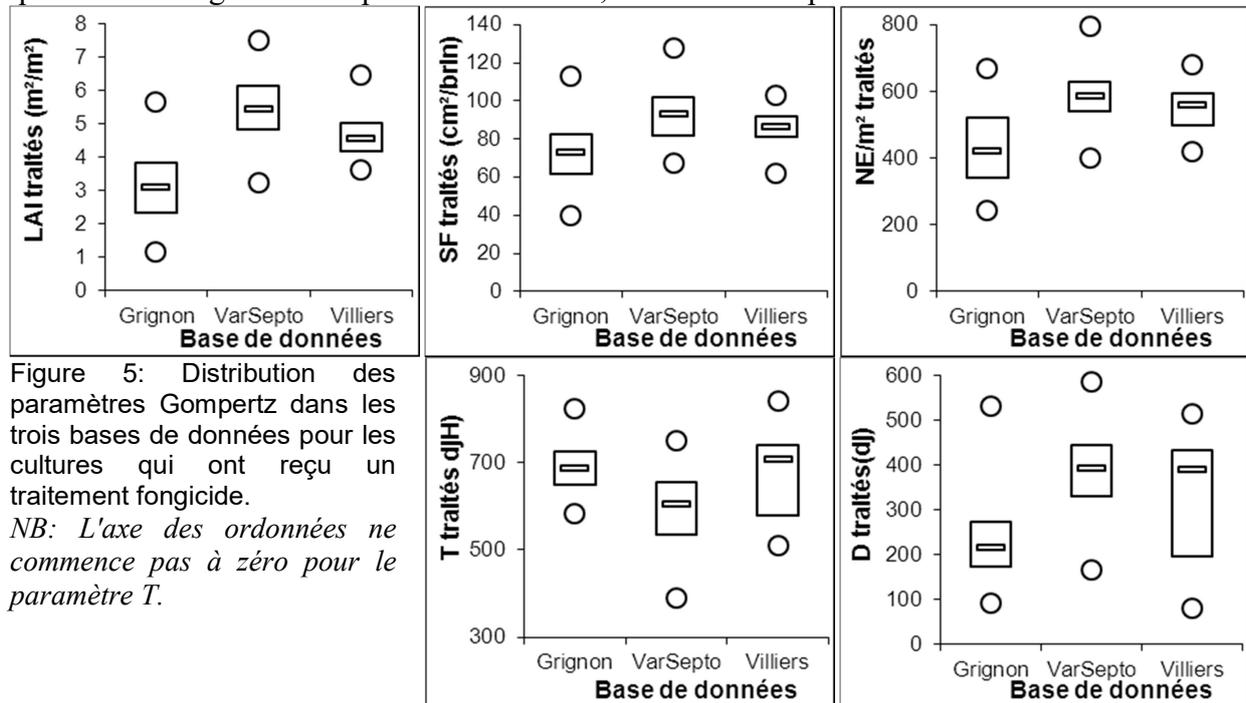


Figure 3: Relation entre IFVI et Σ PAR normalisé (calcul en substituant un climat normalisé aux relevés météo propre à chaque culture)

- Exploration des paramètres des courbes décrivant les cinétiques de surface verte

Les couverts ne sont pas équivalents dans les trois bases de données (figure 5): le LAI est nettement plus faible dans la base Grignon (médiane 3,1 contre 4,5 m²/m² dans la base Villiers), mimant plus ou moins la distribution des IFVI (figure 2). La différence entre bases vient aussi bien de la surface foliaire par brin (médiane 73 contre 92 cm²/brin dans la base

Villiers) que du NE/m² (médiane 420 contre 594 dans la base Villiers). La sénescence est aussi plus rapide à Grignon (médiane de D à 214 contre 387 dj dans la base Villiers), peut-être par artefact: à Grignon, seuls les maîtres brins (qui font l'essentiel du Rdt) sont suivis, alors qu'ailleurs il s'agit de brins prélevés au hasard, dont des talles plus tardives.



Enfin comme les variabilités de T et de D sont plus marquées dans la base Villiers, une ANOVA multifactorielle a été réalisée pour chacune des deux bases Grignon et Villiers (figure 6). La comparaison des résultats des ANOVA confirme que le LAI est toujours plus faible à Grignon, même sous forte fertilisation. Comme la figure 2 indiquait une relation commune entre IFVI (ou Σ PAR) et Rdt, la différence d'IFVI n'est probablement pas un artefact lié aux techniques de mesures (comptage des épis et estimation de la surface foliaire par brin). D'autre part si des différences variétales apparaissent, elles sont peu importantes, alors qu'il y a un effet Année \times Site marquant: à Villiers la sénescence est précoce en 2011 (T faible), rapide en 2010 (D faible), ce qui explique la variabilité sur ces paramètres constatée en figure 5. Cela suggère un effet climatique, que je n'ai pas déterminé précisément, et me fait regretter l'absence d'essai à Grignon en 2011 (on irrigue à Grignon, tandis que je crois me souvenir d'un début de stress hydrique pendant le remplissage 2011 à Villiers).

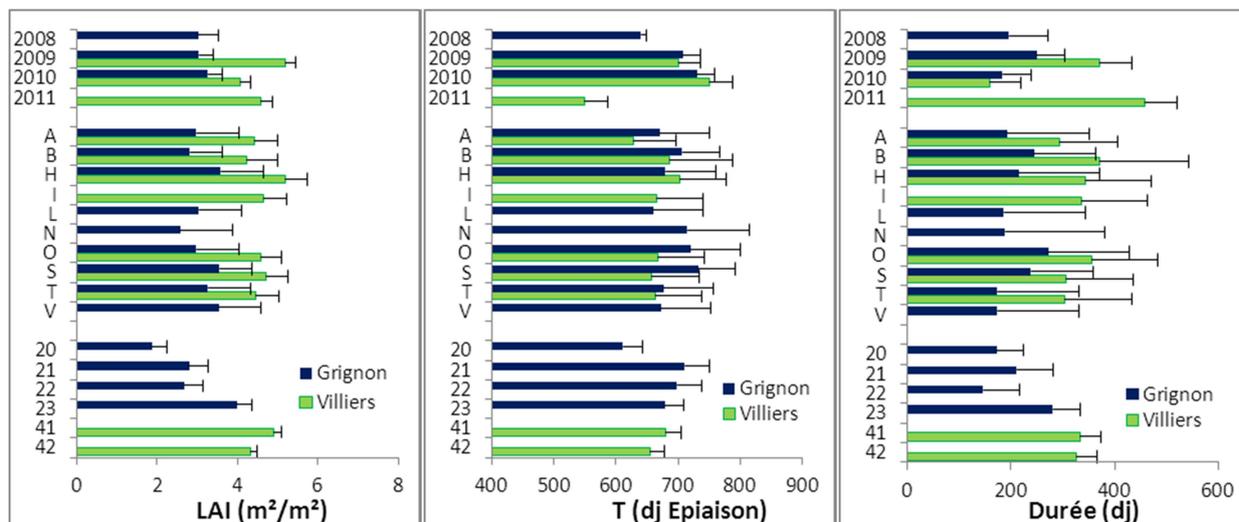


Figure 6: ANOVA multifactorielles dans la base Grignon et dans la base Villiers.

Les deux ANOVA ont été réalisées séparément sur les couverts ayant reçu un traitement fongicide. Les barres d'erreur représentent l'écart de signification par le test de Bonferroni. Les trois facteurs étudiés étaient la saison de culture (2008-2009-2010-2011), la variété (A=Aubusson, B=Bastide, H=Hysun, I=Toisondor, L=Lona, N=Autan, O=Oratorio, S=Soissons, T=Trémie, V=Orvantis) et l'ITK suivi (dont la définition est indiquée dans la base v.1). Comme le traitement 20 de la base Grignon correspond à une sous-fertilisation carencée d'impact trivial sur les paramètres LAI-T-D, les résultats indiqués pour les facteurs année et variété se réfèrent à une base Grignon restreinte aux trois ITK (21-22-23) ayant reçus une pleine fertilisation.

Relation entre paramètres Gompertz des couverts traités.

Si on regroupe les trois bases de données, on constate que les paramètres Gompertz ne sont pas complètement indépendants (figure 7), bien que leur corrélation soit souvent faible. Ainsi T varie peu avec le LAI ($r^2=0,12$). On peut supposer que l'augmentation de T avec LAI en deçà de $4 \text{ m}^2/\text{m}^2$ dans la base Grignon correspond à des couverts carencés en azote et pourrait indiquer des degrés différents de stress. Inversement, dans les couverts denses, la sénescence des feuilles inférieures pourrait commencer plus tôt. Cependant T reste toujours élevé à Grignon jusqu'à son maximum de LAI ($5,7 \text{ m}^2/\text{m}^2$). C'est aussi le cas à Villiers en 2009 et 2010, tandis qu'en 2011 la sénescence y est plus précoce de 200 dj (figure 6). Enfin dans la base VarSepto, où les LAI varient de $3,2$ à $7,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$, T est très variable, avec un effet Année \times Site marquant ($P < 10^{-4}$), modulé par l'effet variété ($P = 0,02\%$).

La relation croissante entre LAI et D ($r^2=0,42$) se vérifie dans chacune des trois bases: les couverts les plus denses mettent plus longtemps à être dégradés. Enfin la relation décroissante très lâche ($r^2=0,09$) entre T et D suggère que les couverts à sénescence précoce soient aussi ceux où elle est la plus lente.

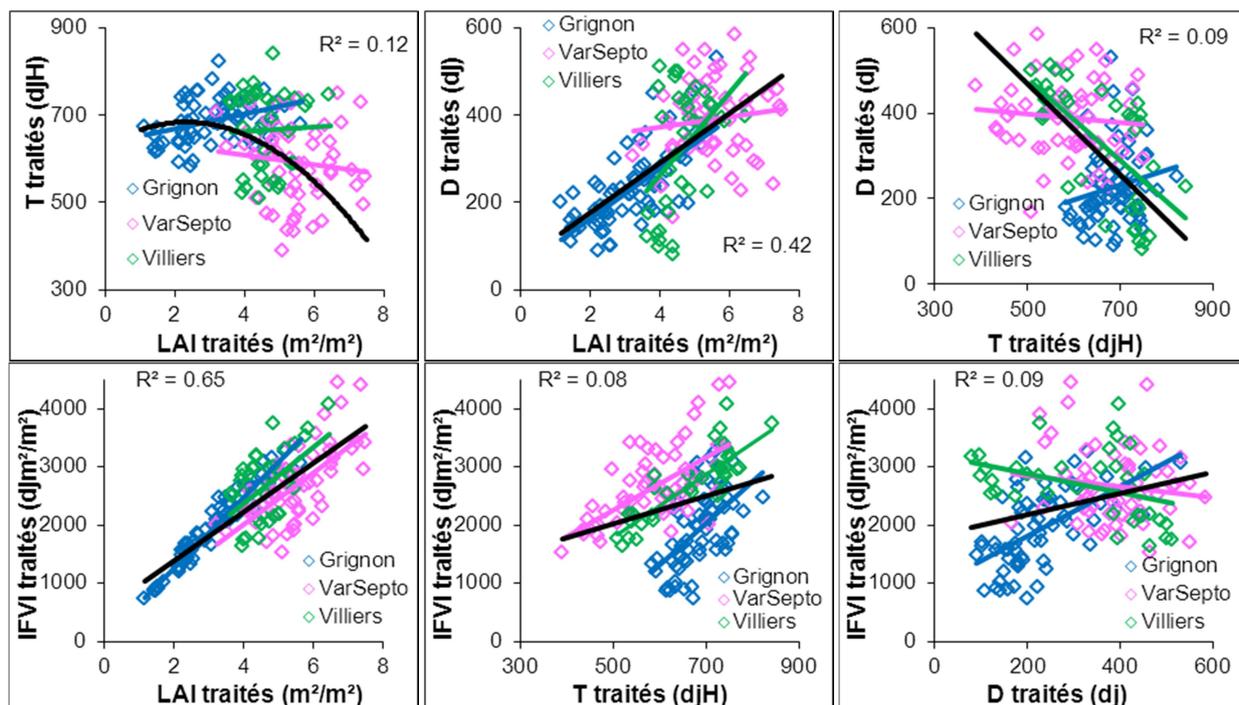


Figure 7: Relation des paramètres Gompertz entre eux et avec l'IFVI dans les trois bases de données pour les cultures qui ont reçu un traitement fongicide

NB: Les axes correspondant au paramètre T ne commencent pas à zéro.

Sur l'ensemble des trois bases, le LAI est le paramètre le mieux lié à l'IFVI ($r^2=0,65$). Cependant cette relation est différente dans les trois bases sans doute à cause de la variabilité de T: le r^2 atteint 0,9 à Grignon où toutes les sénescences sont tardives, il descend à 0,5 à cause de l'année 2011 à sénescence précoce; enfin le r^2 ne dépasse pas 0,3 dans la base Villiers où les effets Année \times Site sont les plus variés. A première vue le paramètre T influence peu sur l'IFVI. Cependant son r^2 global de 0,08 résulte de la juxtaposition de trois nuages de points parallèles correspondant aux trois bases avec des r^2 compris entre 0,4 et 0,7.

Effet des maladies sur les paramètres Gompertz et le rendement

Dans les trois bases de données, le LAI est plus élevé d'environ 5% dans les parcelles traitées, avec une variabilité (premier quartile -1%) qui fait que cet effet n'apparaît pas de prime abord. Cependant l'effet est toujours significatif et il correspond à un manuscrit que j'ai revu récemment qui l'interprète comme un effet secondaire des fongicides avec ou sans maladies. Il faudrait une étude plus fine selon les molécules. J'ai vérifié que l'effet est significatif à la fois sur les surfaces foliaires /brin et sur les peuplements épis (cette donnée n'est pas disponible dans la base VarSepto). Son impact sur le Rdt n'est pas significatif, ce qui est logique vu son amplitude et correspond à l'article cité plus haut.

L'impact des maladies s'exprime surtout par une sénescence prématurée, avec une distribution des ΔT mimant celle des ΔRdt (figure 1). La variation de T est proportionnelle à celle du rendement, avec un r^2 qui atteint 0,8 dans la base VarSepto (moins dans les deux autres, mais avec une même pente). Dans les trois bases, une variation de 10% de T entraîne donc une variation de 7% du Rdt. On remarquera qu'il n'y a pratiquement pas de gain entre la corrélation de ΔT à ΔRdt , et celle de $\Delta \Sigma PAR$ à ΔRdt (figure 1) qui prend pourtant en compte les autres paramètres du couvert et la variabilité climatique.

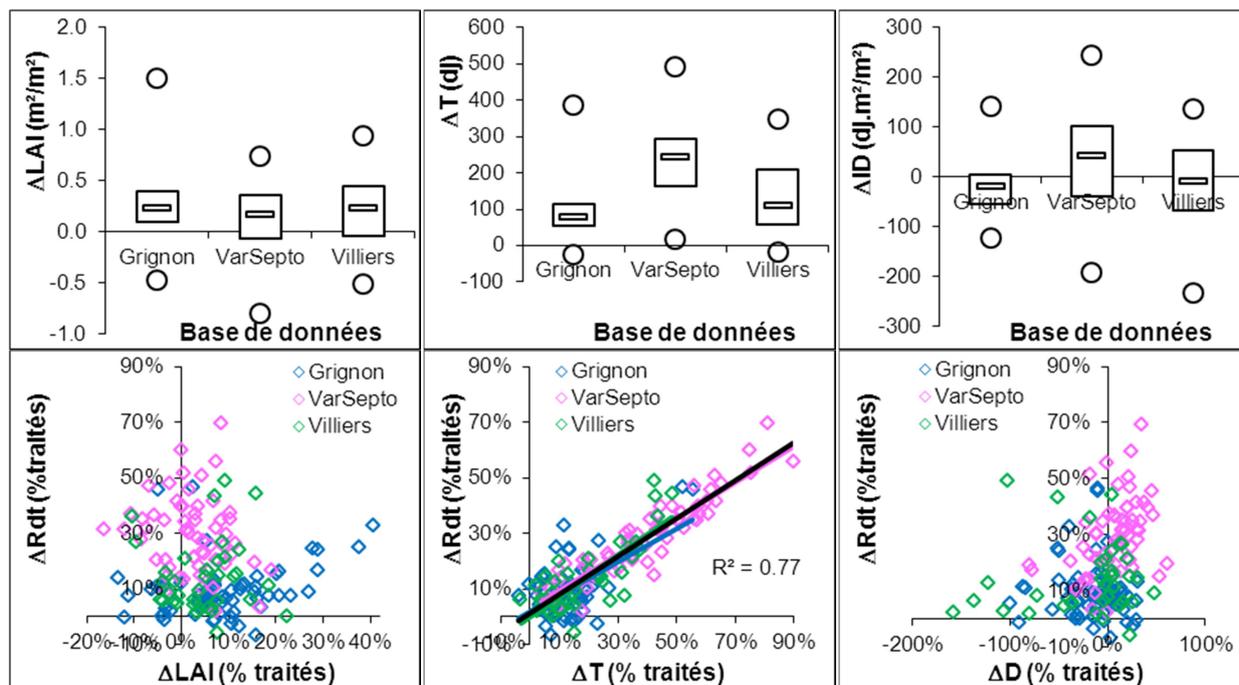


Figure 8: Effet du traitement fongicide dans les trois bases de données sur la distribution des paramètres Gompertz et relation entre les variations de ces paramètres et celles du Rdt.

NB: les pertes en LAI, T, D et Rdt sont exprimées positivement en % de la valeur enregistrée pour le témoin avec traitement fongicide.

Enfin la variabilité sur ΔD est énorme (1^{er}/3^{ème} quartiles -19% / +15% du témoin), centrée sur zéro (médiane -2%) et semble orthogonale à la variabilité de ΔRdt . C'est donc indépendamment de leur effet sur le rendement que les traitements fongicides augmentent la variabilité de la durée de sénescence (3^{ème}-1^{er} quartile = 211 dj sous protection fongicide contre 161 dj en l'absence de traitement). Si l'on exprime la durée de sénescence des couverts non traités en fonction de celle des couverts traités correspondants (figure 9), on obtient une droite ne passant pas par l'origine: $Y = 0,60 (\pm 0,04) \cdot X + 120 (\pm 14)$. Si la durée de sénescence des couverts traités est inférieure à 300 dj, elle augmente en l'absence de traitement, sinon elle diminue. L'importance de l'épidémie ne semble pas jouer sur ce phénomène qui pourrait lui aussi être un effet secondaire aspécifique des fongicides.

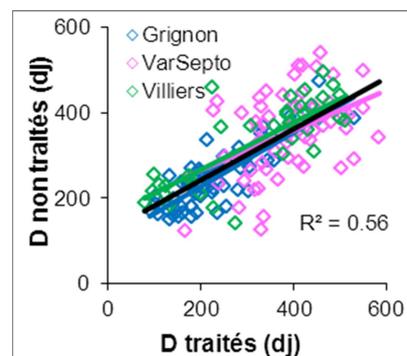


Figure 9: Effet des traitements fongicides sur la durée de la sénescence des couverts

- Modélisation de couverts virtuels pour l'étude de la tolérance

Vers une modélisation empirique de l'effet des maladies.

L'irrégularité des épidémies, tout comme celle de la dynamique des couverts sains impose le recours à la modélisation. Comme on l'a vu plus haut (figure 7), l'IFVI est d'abord sensible au LAI, mais T, qui n'est pas indépendant du LAI, joue aussi son propre rôle. Les maladies interviennent surtout via leur effet sur T, mais le non traitement agit aussi sur D et le LAI (figures 8-9). Enfin la relation entre IFVI et ΣPAR ou Rdt est bruitée par le climat après l'épiaison (figures 2-3). Je propose donc de créer une série de couverts virtuels où le LAI varie librement dans la gamme de 1,5 à 7,5 avec T et D corrélés au LAI selon les équations

empiriquement obtenues sur les bases de données. On appliquera ensuite à ces couverts virtuels des épidémies virtuelles caractérisées par leur ΔT (mais induisant de manière aspécifique les ΔLAI et ΔD constatés). La nuisibilité de ces maladies sera caractérisée par le $\Delta \Sigma PAR$ résultant en faisant fonctionner ces couverts virtuels, malades ou non, sous un climat post-épiaison donné. Ce climat (en fait des séries de températures et d'éclairement journaliers) pourra lui-même être soit normalisé (pour étudier l'influence d'un paramètre sur la nuisibilité), soit refléter la variabilité naturelle, par exemple en utilisant des relevés météorologiques. Dans ce cas, le modèle permettra une analyse climatique fréquentielle de la nuisibilité.

Création de couverts de maladies virtuelles.

Comme indiqué plus haut, la relation entre le LAI et T ne répond pas à une prévision simple. Cependant dans la base Grignon, T est systématiquement élevé; c'est aussi le cas dans la base Villiers en 2009-2010, ainsi que de certains couverts de la base VarSepto. Sur l'ensemble de ces couverts montrant des LAI bien répartis entre 1,1 et 7,4 m^2/m^2 , on peut parler d'une sénescence "tardive" et T répond au LAI selon l'équation:

$$T(\text{tardifs}) = -5.47 \cdot LAI^2 + 53.2 \cdot LAI + 581 \quad r^2=0,14$$

Le coefficient de corrélation est très faible parce que l'équation ne prédit qu'une variabilité de 60 dj pour T sur la plage de LAI considérée. Or les couverts "tardifs" s'écartent de ± 50 dj par rapport à cette courbe (figure 10). Cependant les autres couverts s'en écartent bien d'avantage, ce qui permet de leur attribuer une sénescence moyenne, voire nettement précoce. Comme seule la base Grignon propose des LAI faibles, il n'y a pas d'exemple de couverts à sénescence précoce avec un LAI inférieur à 4 m^2/m^2 , ce qui ne veut pas dire que ce cas ne peut pas exister. J'ai choisi de représenter les couverts précoces par un simple décalage de 200 dj par rapport aux couverts tardifs:

$$T(\text{précoces}) = -5.47 \cdot LAI^2 + 53.2 \cdot LAI + 381$$

Tous les couverts répondent à la même relation entre le LAI et D

$$D = 57 \cdot LAI + 63 \quad r^2=0,42$$

La relation entre T et D découle des précédentes.

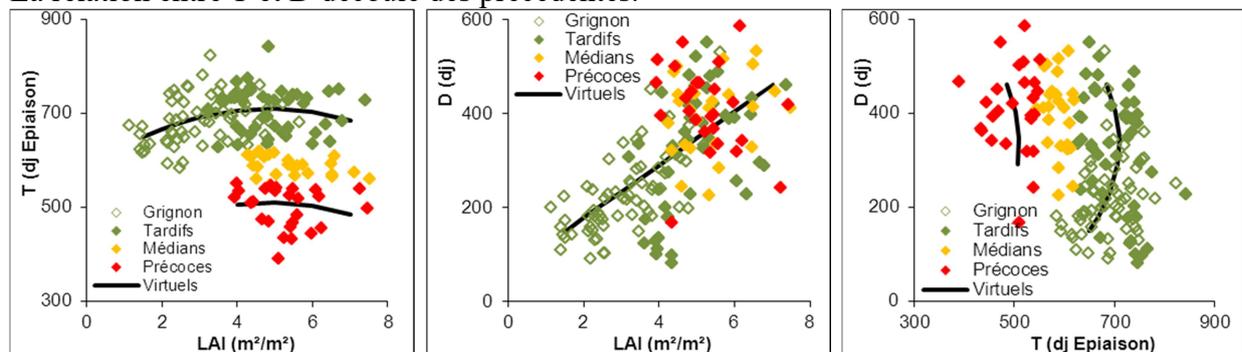


Figure 10: Relation entre les paramètres Gompertz dans les couverts virtuels.

Les données des trois bases ont été réattribuées arbitrairement à un type de sénescence (précoces /médiants /tardifs) d'après la relation observée entre le LAI et T. La ligne en gras indique les relations proposées pour les couverts virtuels

A partir des relations précédentes, on peut calculer l'IFVI et le Σ PAR (avec des variables climatiques normalisées) pour les couverts virtuels, et les comparer aux données des trois bases (figure 11).

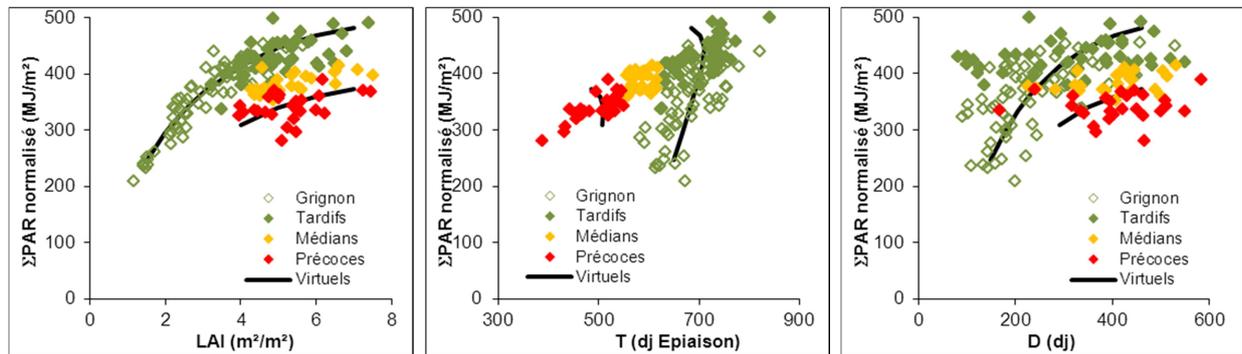


Figure 11: Relation entre les paramètres Gompertz et le Σ PAR des couverts virtuels.

Les couverts virtuels encadrent bien les données pour la relation entre LAI et Σ PAR, mais pas celle entre T et Σ PAR. Dans ce cas, les points des bases Villiers et VarSepto suivent une relation assez serrée distincte des points de la base Grignon et des couverts virtuels. En fait il faut considérer que (1) le Σ PAR indiqué est calculé avec des variables climatiques normalisées identiques pour chaque couvert, donc seuls les paramètres Gompertz influent sur le Σ PAR. D'autre part, (2) dans les bases Villiers et VarSepto, le LAI est toujours élevé, donc sa variabilité influe peu sur celle du Σ PAR contrairement aux points de la base Grignon.

Comme indiqué ci-dessus, l'absence de traitement fongicide induit un effet aspécifique sur le LAI et la durée de sénescence

$$\text{LAI}(\text{non traité}) = 1,02 \cdot \text{L}(\text{traité}) - 0,26$$

$$\text{D}(\text{non traité}) = 0,60 \cdot \text{D}(\text{traité}) + 120$$

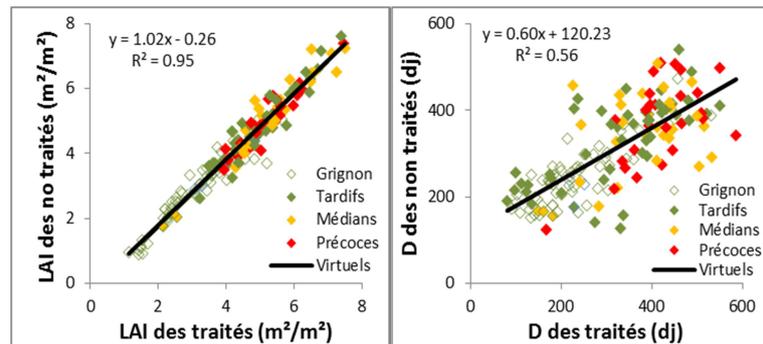


Figure 12: Effets aspécifiques des fongicides sur les paramètres Gompertz dans les couverts virtuels.

L'impact des maladies se traduit essentiellement sur T, avec ΔT très corrélé au ΔRdt (figure 8). Cependant, puisqu'on a distingué des couverts à sénescence 'naturelle' précoce ou tardive, on peut se demander, si le développement des maladies n'est pas prématurément bloqué sur les couverts à sénescence précoce. Dans le cas contraire, cela induirait une forme d'échappement à la maladie. Inversement on pourrait aussi penser que les couverts à sénescence naturelle précoce se défendent moins bien que les autres. Or les données de la base permettent de trancher. En effet, la précocité de la sénescence naturelle est définie par l'écart à l'équation liant LAI et T dans les couverts traités tardifs. Si la précocité de la sénescence naturelle joue sur la sévérité de la maladie (à épidémie constante), alors on doit voir une relation entre cet écart et le ΔT , au moins à l'intérieur de chaque Année \times Site (figure 13).

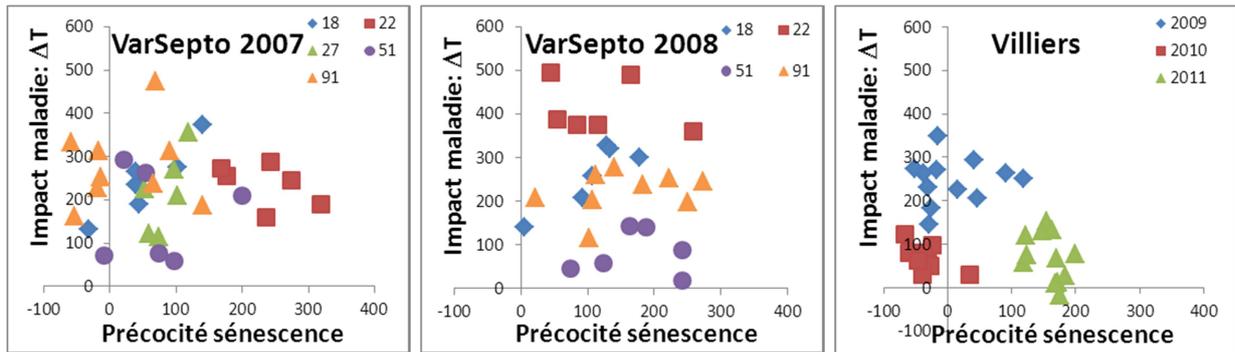


Figure 13: Relation entre précocité de la sénescence naturelle et impact de l'épidémie dans les bases VarSepto et Villiers.

La précocité de la sénescence naturelle est caractérisée par l'écart entre la valeur de T dans les couverts traités et celle obtenue selon l'équation $T = -5.47 \cdot LAI^2 + 53.2 \cdot LAI + 581$. L'impact de la maladie est caractérisé par le ΔT entre couvert traité ou non. Chaque point représente une variété et les Année \times Site sont indiquées par les différents symboles.

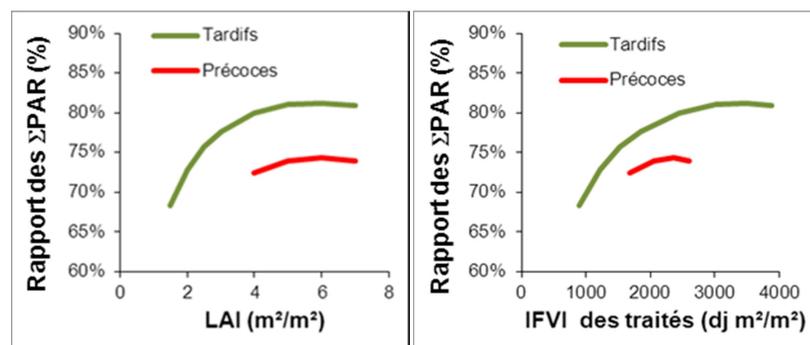
Bien entendu, la résistance intrinsèque des variétés serait susceptible de bruite le signal, mais on peut voir sur la figure 13 que pour chaque Année \times Site (chaque couleur de points), la variabilité de ΔT est toujours plus faible que celle de précocité de la sénescence. En fait, il n'y a aucun indice permettant de suspecter une relation entre la précocité et ΔT . Dans notre modèle, la maladie sera donc caractérisée par un ΔT indépendant de la précocité de la sénescence naturelle des couverts virtuels considérés.

Paramètres des couverts et nuisibilité de la maladie.

Je n'ai pas cherché à modéliser un rendement en grain, ce qui nécessiterait des hypothèses supplémentaires sur le RUE et les réserves carbonées. La tolérance aux maladies sera caractérisée par le rapport entre le ΣPAR des couverts non traités à celui des couverts traités correspondants. Cet index varie de 0% (tolérance nulle) à 100% (tolérance absolue); une tolérance plus faible révèle une plus grande nuisibilité et vice versa.

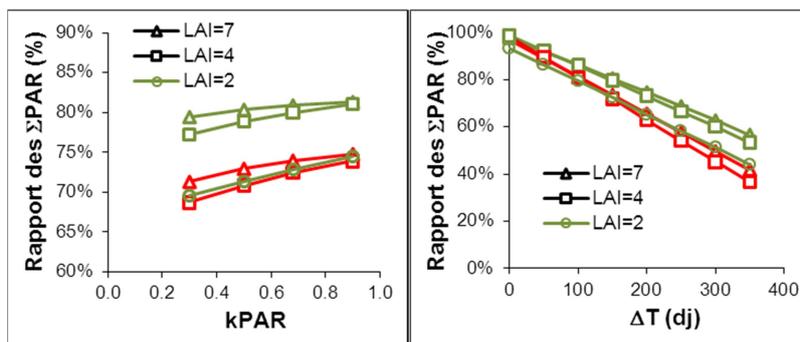
Figure 14: Impact du LAI et de la précocité de sénescence sur la tolérance aux maladies des couverts virtuels.

Les ΣPAR ont été calculés avec des variables clima-tiques normalisées. Le K_{PAR} était fixé à 0,68, et le ΔT de l'épidémie à 150 dj.



Le rapport des ΣPAR augmente non linéairement avec le LAI pour se stabiliser au-delà de 4 m^2/m^2 (figure 14). Cependant puisque la précocité de sénescence naturelle ne joue pas sur ΔT (figure 13), il en résulte que les couverts précoces sont moins tolérants que les tardifs à LAI équivalent. D'autre part, la précocité diminue aussi l'IFVI, donc le décalage de tolérance dû à la précocité est moindre si l'on compare les couverts en fonction de leur IFVI

Figure 15: Impact de quelques paramètres sur la tolérance aux maladies des couverts virtuels. Les ΣPAR ont été calculés avec des variables climatiques normalisées.



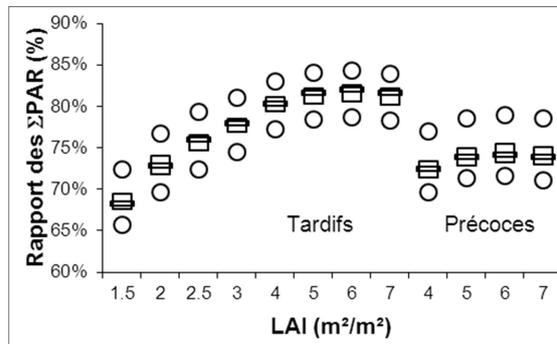
En première analyse, l'impact du port des feuilles, exprimé par le paramètre K_{PAR} , semble assez limité, nettement inférieur à celui du LAI ou de la précocité de sénescence (figure 15). Une stratification du couvert avec une analyse du développement de l'épidémie reste à faire et pourrait nuancer cette conclusion. D'autre part, quel que soit le LAI ou la précocité des couverts, le rapport des ΣPAR reste linéairement corrélé au ΔT induit par la maladie. Si on figurait le $\Delta \Sigma PAR$ entre couverts traité ou non, on retrouverait la relation quasi proportionnelle observée sur les données entre ΔT et ΔRdt (figure 8). Lorsque $\Delta T=0$, on simule l'influence aspécifique du traitement fongicide en absence de maladie. Cette influence n'est pas tout à fait nulle, mais est inférieure à 5% dès que le LAI dépasse 2 m^2/m^2 ; elle est donc peu susceptible d'apparaître dans les essais.

Analyses climatiques fréquentielles.

Si au lieu de variables climatiques normalisées, on utilise des séries d'enregistrements météorologiques sur 30 ans, on constate que la tolérance d'un même couvert à une même épidémie varie selon l'année considérée (figure 16).

Figure 16: Analyse fréquentielle de la tolérance des couverts virtuels selon leur LAI et leur précocité.

Les ΣPAR ont été calculés à partir de 30 années climatiques enregistrées à Grignon. Le K_{PAR} était fixé à 0,68, et le ΔT de l'épidémie à 150 dj. La représentation en box-plots indique la médiane et les 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour chaque LAI. On y a ajouté les valeurs extrêmes (cercles).



Sur l'exemple considéré, la variabilité entre extrêmes du ΣPAR des couverts traités dépassait 35 % (non figuré). Celle du rapport de ΣPAR non traité /traité est plus restreinte, elle approche les 10%, mais la moitié des années donne un rapport de ΣPAR dans une fourchette de $\pm 1\%$ autour de la médiane. La tolérance semble donc assez peu affectée par la variabilité climatique. Ceci rejoint l'analyse des données initiales où la prise en compte du climat réel des essais (*via* le calcul des $\Delta \Sigma PAR$) n'expliquait finalement pas mieux la perte de Rdt que le simple ΔT .

Il est intéressant de constater que la variabilité sur le rapport des ΣPAR n'est affectée ni par le LAI, ni par la précocité de sénescence naturelle. Ceci pourrait permettre de mettre en commun des données issues d'années contrastées pour étudier la sensibilité de la tolérance à ces paramètres. Inversement, en rendant compte de cette sensibilité *via* la modélisation, on pourrait regrouper des données pour estimer une tolérance variétale.

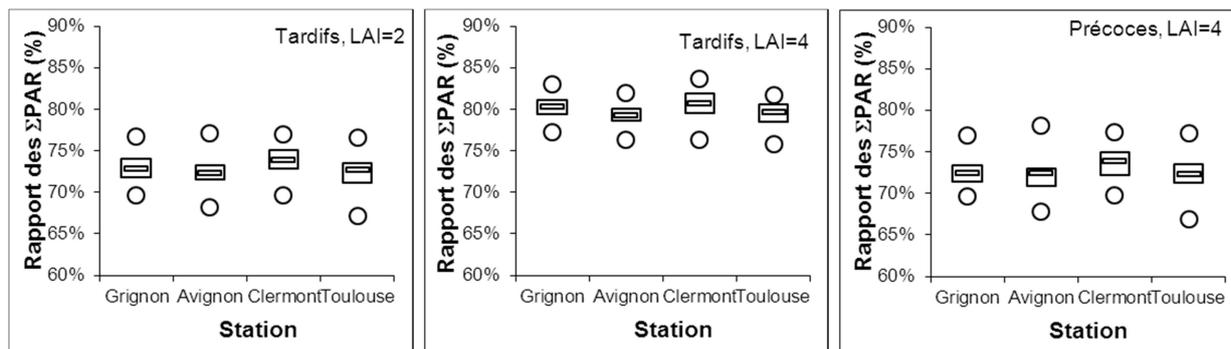


Figure 17: Analyse fréquentielle de la tolérance des couverts virtuels sous différents climats
 Les ΣPAR ont été calculés à partir des enregistrements météorologiques sur 30 ans à Grignon, Avignon, Clermont-Ferrand et Toulouse. La date d'épiaison est fixée chaque année au 15 Mai à Grignon, au 30 Avril à Avignon, au 13 Mai à Clermont Ferrand et au 4 Mai à Toulouse. Le K_{PAR} était fixé à 0,68, et le ΔT de l'épidémie à 150 dj.

On peut aussi comparer les résultats d'analyses fréquentielles à partir de lieux différents pour estimer l'impact de leur climat respectif sur l'estimation de la tolérance (figure 17). Le potentiel de Rdt des quatre stations est très différent et pour les couverts traités, l'écart entre la médiane de ΣPAR des quatre stations atteint 25 % (non figuré). Cependant aussi bien la médiane que la variabilité du rapport de ΣPAR non traité /traité ne semblent pas très affectées par le climat. Comme on l'a indiqué plus haut (figures 6-7-10), le LAI et la précocité de la sénescence naturelle sont fortement influencés par l'effet Année \times Site, donc vraisemblablement par le climat. Cependant, avec un modèle prenant en compte LAI et précocité, on pourrait comparer des données issues de milieux différents.

c) Perspectives

La démarche développée ci-avant apporte 2 éléments essentiels.

Premièrement, elle valide le fait qu'un couvert à fort LAI est plus tolérant qu'un couvert à faible LAI, et permet de quantifier ce gain. A l'initiation de projet, cette démarche avait été présentée (Bancal et al. 2009) et une question importante posée était de savoir si le gain de tolérance apporté par les LAI initiaux élevés ne risquait pas d'être annulé si la pression de maladie dans ces couverts s'avérait plus forte. En modélisant la relation entre les paramètres des couverts sains et malades grâce à nos données expérimentales, on a tenu compte de cet effet, et l'intérêt du trait "LAI initial élevé" pour la tolérance reste. Cette démarche a également permis de montrer que cette tolérance semble stable en fonction des différents milieux : en effet, en utilisant des analyses fréquentielles sur plusieurs lieux, on remarque que tant la moyenne que la gamme de variation de la tolérance reste stable. La tolérance apportée par un LAI élevé reste pertinente dans le cas de couverts sains avec une sénescence précoce.

Deuxièmement, cette démarche a permis de développer une méthodologie d'exploitation des données expérimentales acquises dont la déclinaison peut s'envisager de 2 manières : l'une à caractère opérationnel, pour étudier par simulation l'adéquation variétés-conduites aux différents pédo-climats français ; l'autre relevant d'une poursuite de l'approche, en intégrant d'autres traits et mécanismes, comme la stratification du couvert ou les rapports sources-puits. Le modèle permettant de créer et de simuler des couverts virtuels réalistes développé ici prend en entrée 2 paramètres clés : le LAI maximal et la précocité d'attaque de la maladie. Ces 2 paramètres sont eux-mêmes fonction des contraintes pédoclimatiques et des pratiques agricoles. Plus spécifiquement, le LAI maximal est contraint par le pédoclimat via le stress

hydrique. Ensuite, à l'intérieur de cette contrainte, c'est la conduite de la fertilisation azotée qui détermine largement le LAI maximal. La précocité d'attaque de la maladie est quant à elle liée à la pression climatique et aux traitements fongicides, l'objectif de ces derniers étant justement de retarder au maximum les attaques. On peut donc imaginer étendre le simulateur de couverts développé ici en un outil de simulation voire d'optimisation technico-économique pour les deux facteurs de production majeurs de la culture du blé en France que sont les engrais azotés et les fongicides. Cela nécessiterait de calculer la relation entre quantité d'azote apporté et LAI maximal. Ceci peut être fait assez simplement en s'appuyant sur des formalismes issus des modèles de culture: un travail en ce sens est d'ailleurs en cours à Arvalis. On peut aussi s'appuyer sur une démarche de modélisation directe comme celle développée par Sylvester-Bradley¹. De même, la précocité d'attaque de la maladie peut être modélisée en fonction de la quantité de fongicides appliqués : ce type de travail est pour l'essentiel déjà réalisé par Paveley et al². La combinaison de ces différents éléments permettrait de bâtir un simulateur permettant d'évaluer une diversité de choix d'investissement en intrants fongicides et azotés sur une très large gamme de pédoclimats.

Enfin, cette démarche peut être prolongée pour intégrer d'autres traits potentiels de tolérance dont on souhaite évaluer la pertinence. Nous présenterons ci-après quelques résultats intermédiaires obtenus pour 2 types de traits qui ont été mis en avant par certains auteurs comme pouvant impacter la tolérance : la stratification du couvert (part de surface liée à chaque étage foliaire) et les rapports source-puits.

L'idée prégnante derrière la notion de stratification du couvert est qu'une perte de surface verte d'une feuille contribuant peu à la photosynthèse, parce qu'elle est fortement ombragée par les feuilles supérieures par exemple, a un impact beaucoup moins important. Or, les maladies foliaires susceptibles de créer des pertes de rendement en France, en particulier la septoriose, touchent plus souvent les feuilles basses avant les feuilles hautes : l'idée serait donc, à surface foliaire totale équivalent, de faire en sorte que cette surface foliaire soit plutôt répartie vers le haut du couvert. Mais il faut toutefois être attentif au fait qu'une trop forte proportion d'interception sur le haut du couvert est également peu rentable en situation traitée, car la photosynthèse à l'échelle de la feuille sature³. Une fois de plus, un travail de

¹ Sylvester-Bradley, Scott, Stokes and Clare. 1997. The significance of crop canopies for N nutrition. *Annals of Applied Biology* **50**: 103–116

² Paveley, N.D., R.K. Scott, J. Craigan, and W. Day. 2001. Steps in Predicting the Relationship of Yield on Fungicide Dose. *Phytopathology* **91**: 708–716.

Milne, A., N. Paveley, and E. Audsley. 2007. A model of the effect of fungicides on disease-induced yield loss, for use in wheat disease management decision support systems. *Annals of Applied Biology* **151**: 113–125

³ Long, S.P., X. Zhu, S.L. Naidu, and D.R. Ort. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields ? *Plant, Cell and Environment* **29**: 315–330.

modélisation des relations entre paramètres des cinétiques de surface des feuilles individuelles pourrait être intégré en un modèle permettant ensuite d'évaluer l'intérêt de différentes stratifications du point de vue du rendement sain et du point de vue de la tolérance. Nos analyses du jeu de données "Varsepto" d'Arvalis ont en effet montré qu'il existe une diversité de profils dans les variétés cultivées actuelles qui pourrait tout à fait être exploitée. Plus précisément, plusieurs analyses de variance ont été conduites sur les surfaces foliaires mesurées par étage foliaire dans l'ensemble des essais "Varsepto". La première, à effets fixes, présentée ci-dessous, permet de mettre en évidence que la part de variance expliquée par l'interaction Variété × Etage foliaire est une des plus importantes, et dépasse largement la part de variance expliquée par l'interaction Milieu × Etage foliaire, ainsi que la variance résiduelle (qui comprend l'erreur expérimentale et l'interaction Variété × Etage foliaire × Milieu). Autrement dit, la stratification de l'indice foliaire est un trait variétal qui s'exprime de manière suffisamment stable pour pouvoir être utilisée relativement facilement.

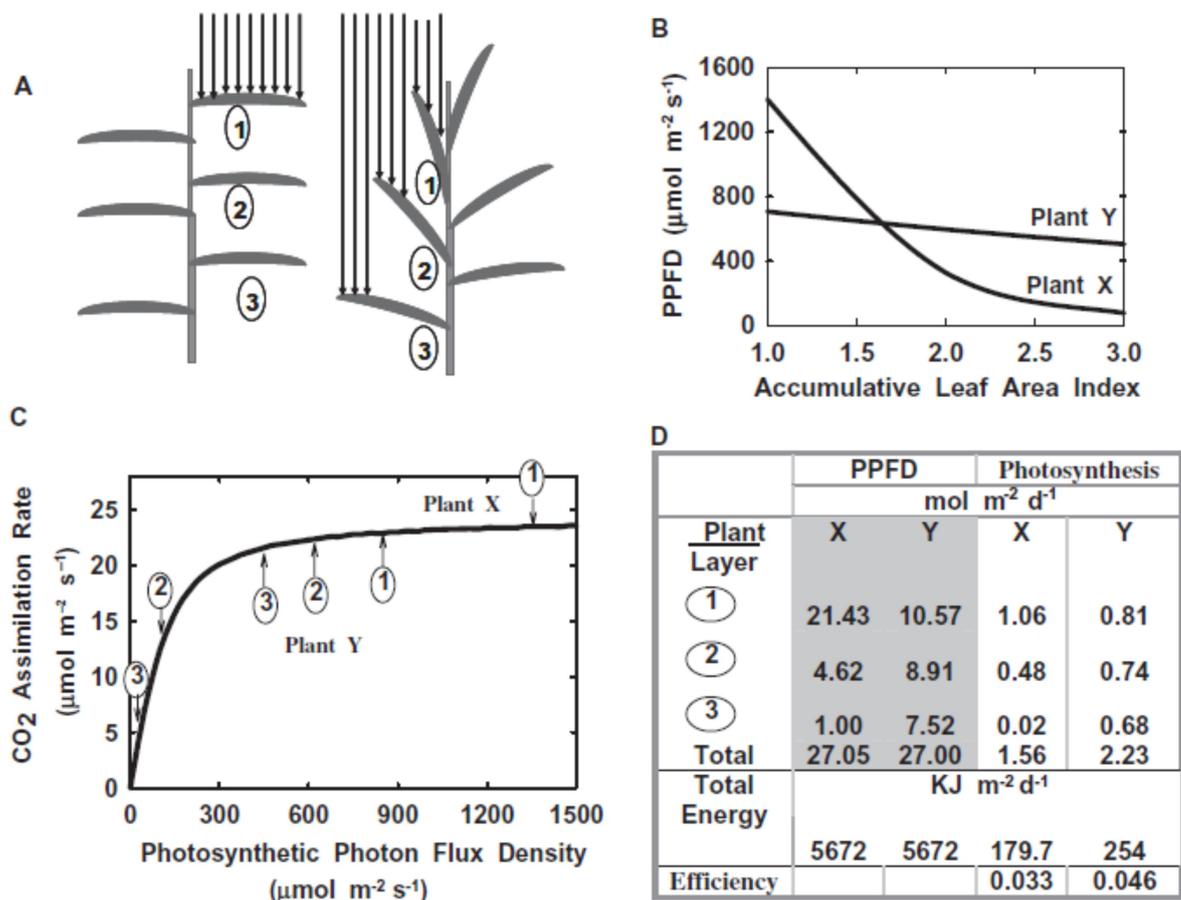


Figure 1. (a) Plant X has mostly horizontal leaves, such that the upper layer (1) intercepts most of the incoming solar energy, shading the lower layers [(2) and (3)]. Plant Y has vertical leaves at the top, becoming more horizontal near the bottom. This arrangement spreads the light more evenly between layers (derived from Ort & Long 2003 and Long *et al.* 2005b). (b) The predicted average photosynthetic photon flux density (PPFD) at noon at different canopy depth represented by accumulative leaf area index for plant X and plant Y. The simulation is done using Windows Intuitive Model of Vegetation response to Atmosphere and Climate Change (WIMOVAC) (Humphries & Long 1995) for the 190th day of year at a latitude of 52° N assuming a leaf area index of 3, and a constant canopy temperature of 25 °C. Parameters and method as detailed in Long (1991). (c) The response of photosynthetic CO₂ uptake rate to PPFD. Arrows below the curve indicate the average PPFD at the three leaf layers of canopy in plant Y, and arrows above the curve indicate the average PPFD for three leaf layers of canopy in plant X. (d) From graph c, the diurnal course of PPFD for three layers in plants X and Y and the diurnal photosynthetic CO₂ uptake rates are calculated and integrated. The amount of solar energy and the photosynthetic CO₂ uptake for each leaf layer and their totals for the two plants are given. The efficiency is calculated as the ratio of solar energy stored in the form of carbohydrate to total intercepted solar energy by the two plants.

Analysis of Variance Table

Response: surf.mean

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
variéte	8	1019.66	127.46	48.3993	< 2.2e-16 ***
num.feuille	3	1813.17	604.39	229.5042	< 2.2e-16 ***
milieu	8	1243.75	155.47	59.0359	< 2.2e-16 ***
variéte:num.feuille	24	1128.46	47.02	17.8545	< 2.2e-16 ***
variéte:milieu	43	319.53	7.43	2.8218	7.126e-06 ***
num.feuille:milieu	23	285.79	12.43	4.7183	1.405e-08 ***
Residuals	110	289.68	2.63		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

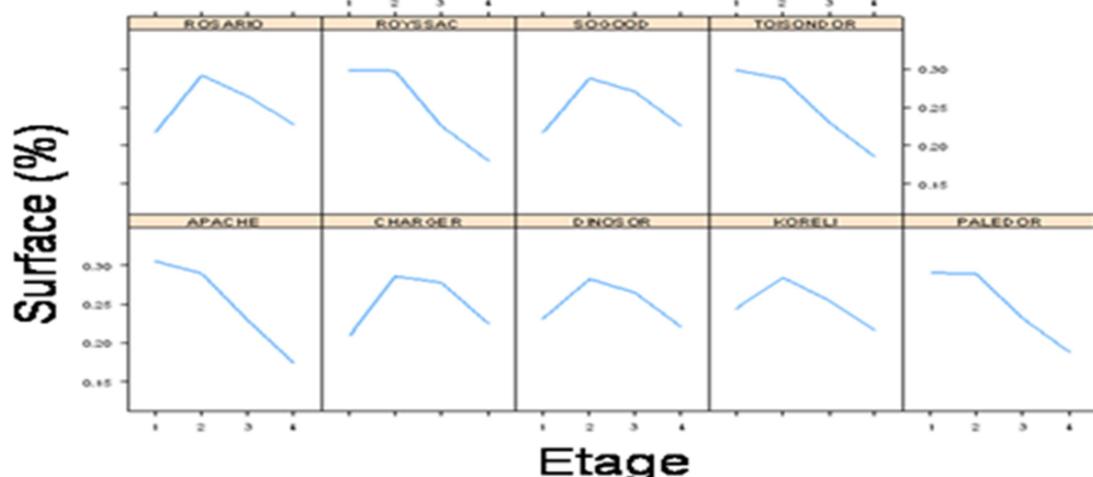
Tableau d'analyse de variance des surfaces foliaires des 4 premiers étages foliaires mesurés sur 9 variétés (dont 6 communes à tous les essais) dans la base "Varsepto"

Sur la base de cette première analyse, un modèle mixte considérant les effets liés au milieu comme aléatoires a permis d'établir des moyennes ajustées des surfaces foliaires. Les valeurs ainsi estimées ont ensuite permis d'établir que les variétés étudiées peuvent être séparées en 2 groupes distincts, l'un possédant une dernière feuille (F1) plus grande que la précédente (F2) alors que dans le second groupe, la F2 est plus grande que la F1. Ces résultats se sont montrés robustes en utilisant comme critère la proportion de surface pris par la F1 ou la différence de surface entre F1 et F2.

Test Tukey sur surface F1 (proportion)			Test Tukey sur surface F1 – F2 (cm ²)		
a	APACHE	0.2753791	a	SOGOOD	6.958716
a	ROYSSA	0.2729223	a	ROSARI	6.548632
a	TOISON	0.2714182	a	CHARGE	5.528416
a	PALEDO	0.2708393	a	DINOSO	4.435519
b	DINOSO	0.259892	a	KORELI	3.961817
b	CHARGE	0.2583002	b	PALEDO	-0.1633744
b	KORELI	0.2551678	b	TOISON	-0.734807
b	SOGOOD	0.2502422	b	ROYSSA	-1.245531
b	ROSARI	0.2492081	b	APACHE	-2.061380

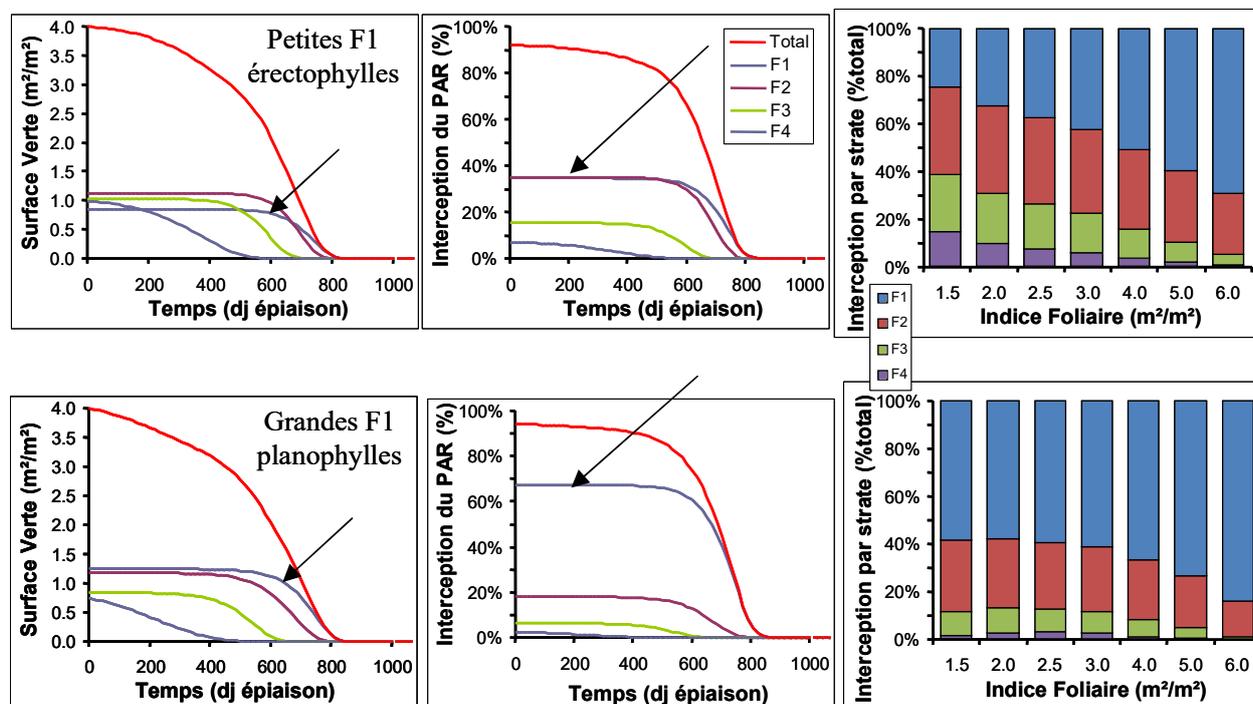
Tableau récapitulatif de comparaison de la stratification de l'indice foliaire pour les 9 variétés testées dans les essais "Varsepto". Les lettres différentes indiquent des différences significatives à 5%.

Les profils verticaux de surface foliaire sont représentés ci-dessous :



Profils verticaux de surface foliaire moyenne pour les 9 variétés des essais "Varsepto": proportion de la surface totale contribué en fonction du numéro d'étage foliaire (étage 1 = F1 = feuille drapeau)

Ces variations peuvent ensuite induire des différences importantes dans la part d'interception de rayonnement attribuable à chaque étage : nous proposons un exemple de calcul qui montre que la stratification va agir sur la proportion interceptée par chaque feuille en interaction avec la taille (LAI) maximale du couvert. Enfin, notons que l'angle foliaire, qui a également été modifié dans ce calcul, interagira également. On observe ainsi sur la figure ci-dessous que la proportion d'interception lumineuse attribuable à la dernière feuille peut varier du simple au double : on pense que ceci peut avoir des conséquences non-négligeables sur la tolérance.



Simulation de la part d'interception attribuable à chaque étage foliaire pour 2 types de couverts : ligne du haut = couvert à petite F1 érectophylle ; ligne du bas = couvert à grande F1 planophylle. Colonne de gauche = Surface verte (LAI) totale (m^2/m^2) et par étage foliaire en fonction du temps pour un couvert avec un LAI maximal de $4m^2/m^2$. Colonne centrale = Proportion (%) de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) intercepté au cours du temps pour un couvert avec un LAI maximal de $4m^2/m^2$. Les flèches indiquent la F1. Colonne de droite : part d'interception de chaque étage foliaire dans l'interception totale pour des couverts de LAI maximal variant de 1 à $6 m^2/m^2$.

Enfin, en matière d'interception de rayonnement, des résultats préliminaires ont été acquis montrant que les épis interceptent une quantité non-négligeable. Les épis étant touchés par les maladies plus tardivement que les feuilles, et par des maladies différentes, ils pourraient également représenter une piste d'amélioration de la tolérance. Toutefois, leur contribution à la photosynthèse du couvert reste mal connue, mais c'est une piste de travail qui commence à être traitée pour améliorer les rendements du blé⁴.

En conclusion, les résultats expérimentaux acquis dans le projet devraient permettre d'intégrer au modèle de simulation de couverts virtuels les effets de stratification de l'indice foliaire. Ceci permettra d'évaluer l'intérêt de différentes architectures comme source de tolérance, au

⁴ Parry MAJ, Reynolds M, Salvucci ME, Raines C, Andralojc PJ, Zhu X-G, Price GD, Condon AG, Furbank R. (2011) Raising Yield Potential of Wheat: (II) Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *Journal of Experimental Botany* 62 453-468

même titre que le travail présenté ici sur l'effet du LAI maximal. A terme, le rôle des épis pourrait également être intégré.

L'approche développée jusqu'ici ne se focalise que sur la 1^{ère} étape d'élaboration du rendement et de la tolérance, à savoir l'interception lumineuse. Cela implique que les étapes de conversion de l'énergie lumineuse en biomasse et d'allocation de la biomasse aux grains restent à traiter. Nos résultats expérimentaux semblent indiquer qu'il y aurait effectivement intérêt à focaliser des travaux sur la dernière étape, à savoir l'allocation de la biomasse aux grains. Nous avons en effet cherché à savoir quelle étape explique mieux la tolérance globale. Ce travail a été réalisé sur l'essai de Villiers en 2009. Pour chaque variété, on calcule la perte de rendement divisée par la perte d'IFVI entre la modalité traitée et la modalité non-traitée : cela constitue une mesure d'intolérance (plus la valeur est élevée, plus on perd de rendement par unité de surface verte perdue). On calcule ensuite l'intolérance à chaque étape de l'élaboration du rendement $IFVI \rightarrow PAR \rightarrow \text{biomasse} \rightarrow \text{rendement}$: perte de PAR divisée par perte d'IFVI, perte de biomasse divisée par perte de PAR et perte de rendement divisée par perte de biomasse. On a ensuite calculé la corrélation entre ces mesures d'intolérance par étape et l'intolérance globale. On remarque ainsi que les étapes 1 et 3 semblent les plus explicatives du comportement global de tolérance, alors que l'étape $PAR \rightarrow \text{biomasse}$ semble peu explicative. L'intolérance de la dernière étape est corrélée à l'intolérance globale à 78% dans l'essai 2009 de Villiers. Cet ordre de grandeur est tout à fait similaire à celui de la corrélation entre intolérance de l'étape 1 et intolérance globale, évaluée elle sur un jeu de données plus large (historique Arvalis + Villiers 2009), qui est de 84%.

Une dernière analyse préliminaire, conduite sur les données historiques d'Arvalis a permis de montrer que l'allocation avait certainement un rôle important à jouer dans la tolérance. L'ensemble des points de la relation IFVI–rendement a fait l'objet de l'ajustement d'une courbe enveloppe (droite + plateau). Les écarts à cette courbe enveloppe, qui représente le rendement théoriquement accessible pour une valeur d'IFVI donnée, ont été étudiés. La composante de rendement la plus corrélée à cet écart est le nombre de grains par épi (corrélation de 41%). Ainsi, plus le nombre de grains par épi est élevé, plus la parcelle se rapproche du potentiel atteignable pour une même quantité de surface verte.

Afin d'approfondir cette piste, une démarche couplée expérimentation + modélisation telle que celle présentée ici est envisagée. Les modèles à mettre en œuvre seraient des modèles sources-puits. Une thèse franco-anglaise, en collaboration entre INRA EGC, Arvalis, ADAS et University of Nottingham est en cours de montage pour réaliser ce travail : cette thèse (cf. Annexe 7) devrait s'appuyer entre autres sur les données acquises lors du projet.

2) Approches et limites de comparaison variétale de la tolérance via la relation IFVI – Rendement

a) Introduction

Comme présenté ci-dessus, les expérimentations menées dans le cadre du projet ont consisté à extrémiser par le biais des traitements (fongicides et azote) la gamme d'IFVI. Il s'agissait de proposer un outil de diagnostic du comportement variétal face aux stress. Le diagnostic devait être à la fois robuste et simple pour sa mise en œuvre sur un grand nombre de variétés ou génotypes en cours de sélection. De ce fait, le dispositif expérimental retenu ne permet pas une analyse classique des données car si les variétés étaient communes, les traitements variaient entre sites. Les données analysées dans cette partie sont essentiellement celles de Grignon (INRA) et de Villiers (Arvalis) où ont été réalisés les suivis fins. Nous présenterons trois approches d'analyse de ces données visant à établir des différences éventuelles entre le

comportement des variétés. Ensuite, nous montrerons comment ceci a pu être décliné vers les données du réseau « Blés rustiques », qui nous est apparu limité pour réaliser ces analyses : nous discuterons les raisons à cela. Enfin, nous terminerons par une discussion plus générale sur ces différentes approches.

Nous envisageons 3 approches de traitement des données. La 1^{ère} consiste à ajuster une courbe-enveloppe par variété. En effet, comme on l'a rappelé en introduction, la relation IFVI–rendement, très serrée dans un essai donné, est bien plus bruitée lorsqu'on intègre des données issues de plusieurs essais. Cela est dû au fait que la relation IFVI–rendement intègre l'interception lumineuse comme facteur explicatif du rendement. Or, entre essais, d'autres facteurs limitants peuvent également intervenir. La représentation sous forme de courbe-enveloppe permet de circonvenir ce problème : physiologiquement, on considère effectivement que l'interception lumineuse est le premier facteur limitant du rendement, mais que les autres interviennent ensuite. Ainsi, les valeurs de rendement les plus élevées pour un IFVI donné correspondent au potentiel permis par l'interception lumineuse, alors que les valeurs de rendement plus faibles pour ce même IFVI correspondent à des situations où ce potentiel a été limité par ailleurs. On peut donc imaginer ajuster une courbe-enveloppe par variété, dont les paramètres représentent les spécificités de la variété. La 2^{ème} approche se base également sur une courbe-enveloppe, mais cette fois-ci générale. L'indicateur variétal représentera l'écartement à la courbe générale. Enfin, la 3^{ème} approche consiste à ajuster spécifiquement une courbe (moyenne et non enveloppe) par variété dans chaque essai et d'en analyser les paramètres. Cette approche est néanmoins rendue difficile par le fait que toutes les variétés ne sont pas représentées sur tous les années × sites du jeu de données : nous avons donc procédé à cette approche *via* l'utilisation d'un modèle mixte.

Pour l'ensemble de ces approches, la première étape consiste à décrire le jeu de données et à proposer un formalisme de courbe représentant efficacement la relation IFVI × rendement et peuvent être interprétés sur le plan biologique. Un modèle hyperbolique Michaëlien a été initialement choisi :

$$Rdt = Vm \cdot IFVI / (K + IFVI)$$

(où Vm et K sont des paramètres à signification biologique). Ce formalisme représente bien la réalité biologique de l'augmentation du rendement avec la durée de vie verte des feuilles, saturant aux fortes valeurs de substrat. La validité de ce choix a été vérifiée *a posteriori* sur les courbes obtenues, mais sa formulation a été modifiée pour minimiser la corrélation entre paramètres; l'équation retenue dans la suite est donc la suivante :

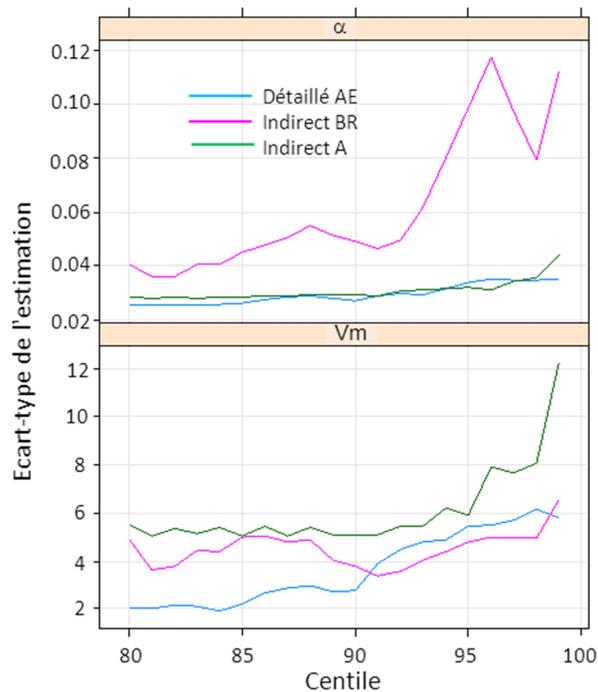
$$Rdt = Vm \cdot \alpha \cdot IFVI / (Vm + \alpha \cdot IFVI).$$

avec α et Vm les paramètres à étudier

b) Courbes enveloppes par variétés

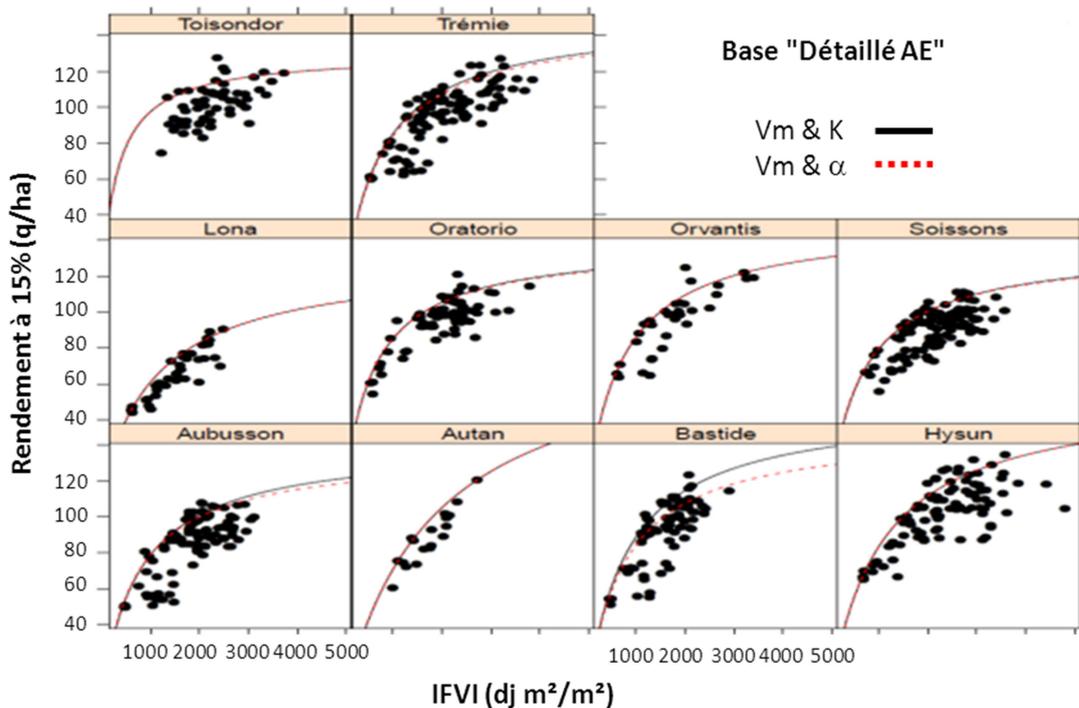
L'ajustement de courbes -enveloppe peut se réaliser par régression quantile : nous l'avons obtenue à l'aide du package 'quantreg' du logiciel R. Il est essentiel lors de l'utilisation de la régression quantile de bien définir le quantile utilisé pour ajuster une courbe-enveloppe⁵. Nous avons testé plusieurs centiles, allant du 80^{ème} au 99^{ème}. Pour toutes les courbes-enveloppes ainsi obtenues, nous avons extrait l'écart-type de l'estimation des deux paramètres : nous avons ensuite recherché un quantile élevé permettant toutefois d'obtenir une estimation précise des paramètres (écarts-types faibles). Cette analyse a été conduite sur 3 jeux de données différents : les données détaillées (obtenues par prélèvements de feuilles) des sites Arvalis et EGC, et les données obtenues par méthode indirecte à l'échelle du couvert (prises de photo) (Arvalis ou réseau Blés rustiques). Nous avons, à la lumière de ces résultats présentés ci-dessous, opté pour le 87^{ème} centile.

Les ajustements obtenus ainsi que les valeurs de paramètres sont décrits ci-dessous. Les écarts-types permettent d'emblée d'établir que l'estimation du paramètre V_m d'Autan et du paramètre α de Toisonдор sont entachés d'une grande erreur. Ceci s'explique en regardant les nuages de points: Autan, présente peu de valeurs car cette variété n'a été expérimentée qu'une année, et ne couvre pas suffisamment la gamme d'IFVI élevée pour permettre une estimation fiable de V_m , qui décrit la zone de plateau. A l'inverse, Toisonдор, variété très résistante à la septoriose, présente peu de valeurs d'IFVI faibles : la pente de la courbe dans cette zone, qui est décrite par le paramètre α , ne peut donc être bien estimée.



Erreur d'estimation moyenne des paramètres α et V_m en fonction du centile utilisé pour la régression quantile, pour trois jeux de données : 'Détaillé AE' = données détaillées Arvalis + EGC ; 'Indirect BR' = données du réseau Blés rustiques (acquises avec l'approche indirecte à l'échelle du couvert) ; 'Indirect A' = données Arvalis acquises avec l'approche indirecte à l'échelle du couvert

⁵ Makowski, D., T. Doré, and H. Monod. 2006. A new method to analyse relationships between yield components with boundary lines. *Agronomy for sustainable development* 27: 1–10.

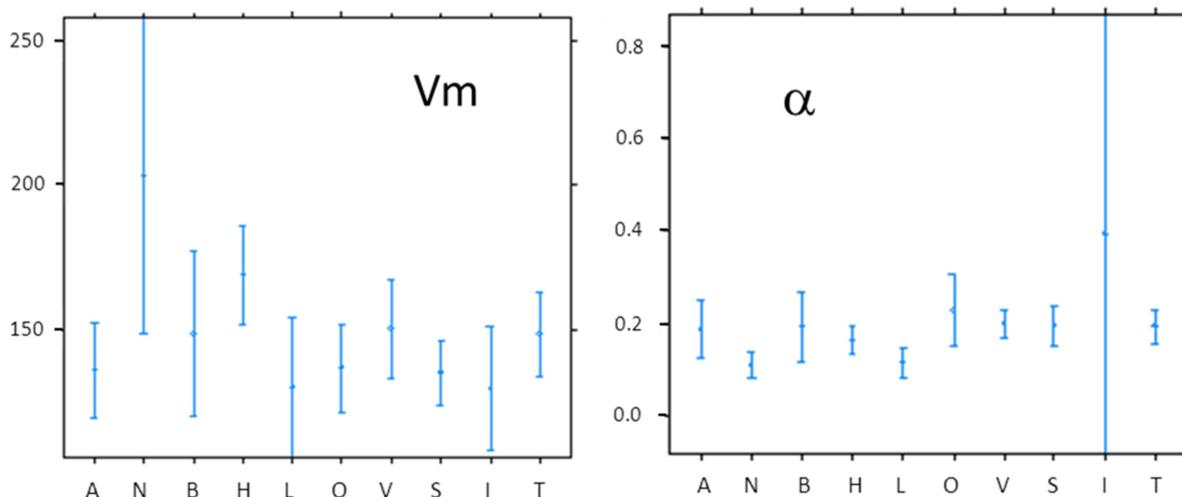


Rendement (q/ha à 15% d'humidité) en fonction de l'IFVI (base 'Détailé AE', i.e. IFVI calculé avec les données détaillées par étage foliaire) et courbes enveloppes ajustées, en noir selon le formalisme Michaelien classique et en rouge selon le formalisme Michaelien modifié retenu pour les analyses.

Variété	Vm	SD (Vm)	α	SD (α)
Aubusson	136.0	8.5	0.188	0.032
Autan	203.0	27.8	0.109	0.015
Bastide	148.5	14.6	0.194	0.039
Hysun	168.9	8.8	0.164	0.015
Lona	130.1	12.3	0.115	0.017
Oratorio	136.7	7.7	0.229	0.040
Orvantis	150.4	8.6	0.200	0.015
Soissons	135.1	5.8	0.195	0.022
Toisonдор	129.7	10.9	0.394	0.244
Trémie	148.5	7.58	0.194	0.019

Valeurs des paramètres et écarts-types associés pour les courbes enveloppes de la relation IFVI-rendement

Nous avons ensuite procédé au calcul de l'intervalle de confiance à 95% des valeurs de paramètres (valeur estimée plus ou moins 1.96 fois l'écart-type). Ces intervalles sont figurés ci-dessous. Il est d'emblée aisé de voir que lorsqu'on compare des variétés deux à deux, les intervalles se chevauchent dans la quasi-totalité des cas : ceci indique que les valeurs de paramètres ne sont pas significativement différentes au seuil de 95%.



Valeurs par variété (A=Aubusson, B=Bastide, H=Hysun, I=Toisonдор, L=Lona, N=Autan, O=Oratorio, S=Soissons, T=Trémie, V=Orvantis) des paramètres des courbes-enveloppes de la relation IFVI–rendement et intervalles de confiance à 95% associés (base Détaillé AE)

Pour le paramètre V_m , seul Hysun semble pouvoir être décrit comme différent de plusieurs autres variétés, par exemple Soissons, Oratorio, et dans une moindre mesure Lona et Toisonдор. Pour le paramètre α , il semble que seuls Lona et Autan pourraient être décrits comme significativement différentes des autres. Toutefois, pour ces 2 variétés, le peu de données dans une gamme d'IFVI élevée laisse quelques doutes quant à la fiabilité de l'estimation de ce paramètre.

En conclusion, cette approche, bien qu'intéressante, semble limitée, dans le jeu de données développé ici, pour mettre en évidence des différences significatives. Développer cette approche implique probablement d'obtenir un nombre de points plus important que ceux déjà obtenus, et surtout d'obtenir ces points sur une gamme d'IFVI suffisamment large, ce qui peut s'avérer complexe pour certaines variétés.

c) Ecart à une courbe enveloppe générale

Une approche alternative peut être d'utiliser une courbe enveloppe générale comme référence. Comme nous l'évoquerons plus bas, il est apparu préférable d'ajuster une courbe enveloppe pour les 3 jeux de. Les résultats d'estimation des courbes enveloppes au 87^{ème} centile sont donnés ci-dessous.

Base	Coefficient	valeur	Erreur-Type	Student t	$P(> t)$
Détaillé AE	V_m	148.5	2.6	57.63	0.00000
	α	0.194	0.007	25.99	0.00000
Indirect A	V_m	155.8	5.1	30.41	0.00000
	α	0.120	0.009	13.31	0.00000
Indirect BR	V_m	138.5	5.0	27.46	0.00000
	α	0.260	0.032	8.06	0.00000

L'exploitation envisagée de ces courbes enveloppes générales est présentée ci-après, pour les données 'Détaillé AE'. Il faut noter que la courbe enveloppe utilisée est issue d'une analyse légèrement différente de celle présentée ci-dessus.

La figure 1-7 montre les cas que l'on veut pouvoir analyser au titre de la tolérance. Quand deux variétés sont soumises à deux traitements azotés ou fongicides (Fig.7A), quel indicateur utiliser pour statuer sur leur degré de tolérance relative à cette différence de traitement,

sachant qu'elles n'ont ni le même potentiel ni la même gamme de variation d'IFVI (cf. la partie 1) ? De la même manière, comment quantifier la tolérance d'une variété à plusieurs conduites (N ou F) sachant que la réponse du couvert végétal va se faire tant sur l'IFVI que sur le rendement (Fig.7B)?

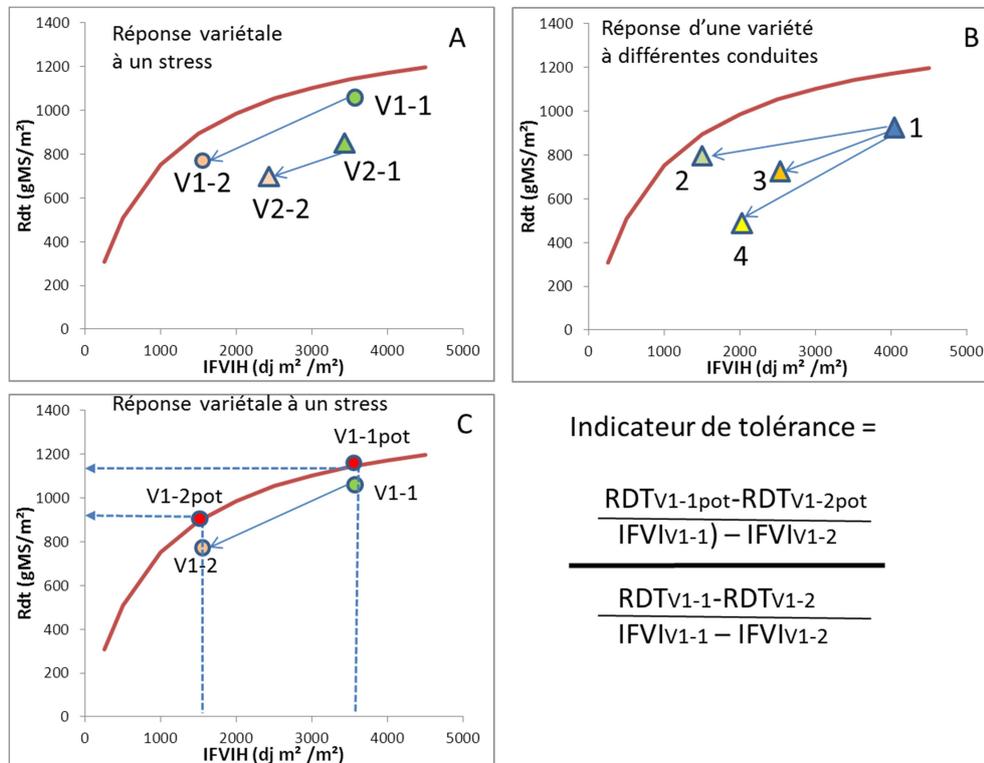


Figure 1-7 : Proposition d'un cadre d'analyse de la tolérance variétale aux stress fongiques (A) ou aux conduites (B) et d'un indicateur de tolérance (C) basé sur la courbe enveloppe spécifique.

Définition de la tolérance et déclinaison d'un indicateur de tolérance basé sur l'IFVI.

En prenant l'IFVI comme indicateur de stress, nous ne prenons effectivement en compte que la tolérance variétale des couverts de blé aux variations d'IFVI. L'expression de la tolérance est dans ce cas la variation de rendement entre deux traitements rapportée à la variation d'IFVI générée. Comme la relation potentielle spécifique entre IFVI et rendement est curvilinéaire (Fig.1-7), la comparaison entre variétés de l'effet d'un traitement va donc dépendre de la gamme d'IFVI parcourue par chaque variété. Afin de s'affranchir de ce biais lié à l'élaboration du rendement de chaque variété, nous proposons de ramener cette variation à la variation potentielle de rendement correspondant aux différences d'IFVI observées pour chacune des variétés (Fig.1-7C). L'indicateur qui en résulte sera donc inférieur à 1 en cas d'intolérance, supérieur à 1 en cas de tolérance, et enfin centré sur 1 sinon.

La figure 1-8 montre par variété et essai, l'effet du traitement fongicide sur la baisse conjointe d'IFVI et de rendement ainsi que son positionnement par rapport à la baisse de rendement potentielle attendue pour le même delta d'IFVI. Cette représentation permet d'une part de retrouver quelques caractéristiques variétales importantes : niveau d'IFVI faible (Autan, Bastide, Lona) ou élevé (Hysun, Trémie), valorisation de l'IFVI en rendement faible (Lona) ou élevée (Hysun, Orvantis, Trémie), mais également, la pente de la relation entre couples d'essais (traités ; non traités) en regard de celle du potentiel permet de visualiser les comportements tolérants ou les comportements erratiques (augmentation de rendement avec baisse d'IFVI).

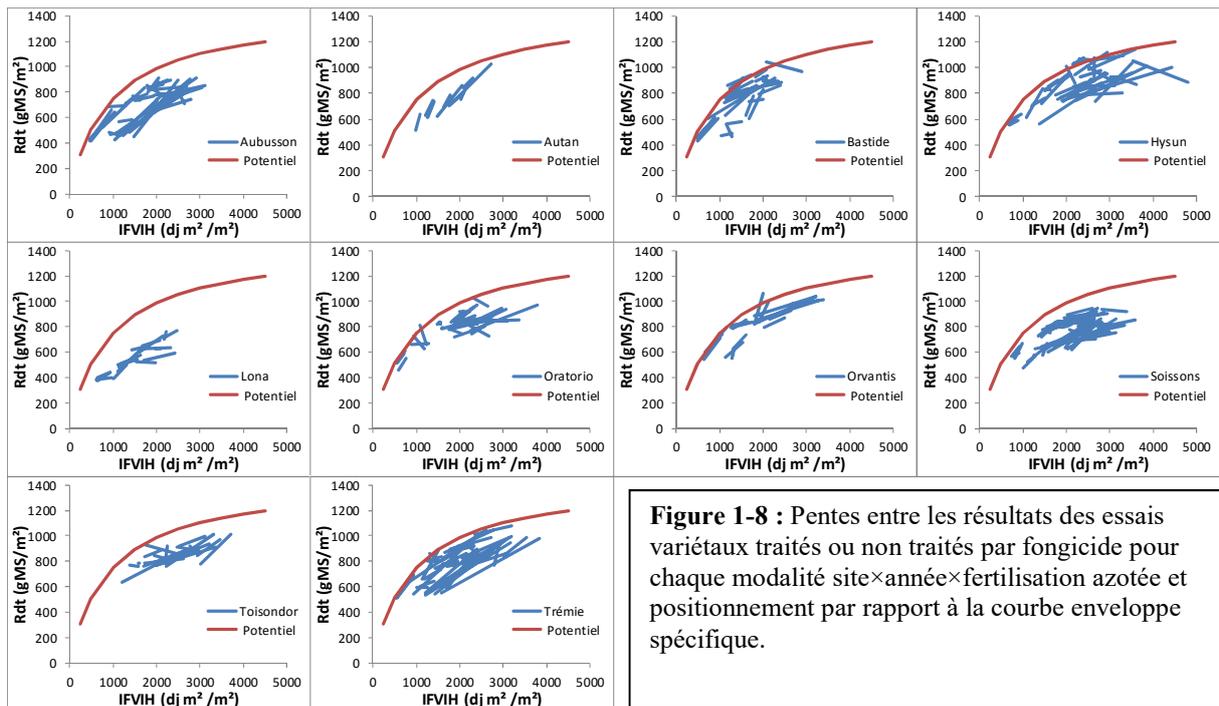


Figure 1-8 : Pentes entre les résultats des essais variétaux traités ou non traités par fongicide pour chaque modalité site×année×fertilisation azotée et positionnement par rapport à la courbe enveloppe spécifique.

Comme l'indicateur de tolérance proposé ci-dessus est un rapport de pentes, il sera très sensible aux erreurs dans le cas de faibles variations de l'IFVI ; ainsi les essais aboutissant à des variations d'IFVI inférieures à 10% (idem avec 5%) sont éliminés ; de même les augmentations de rendement consécutives à une baisse d'IFVI > 10%. De ce fait, 25% des couples sont éliminés et la base comporte 204 couples de comparaison pour l'ensemble des variétés étudiées.

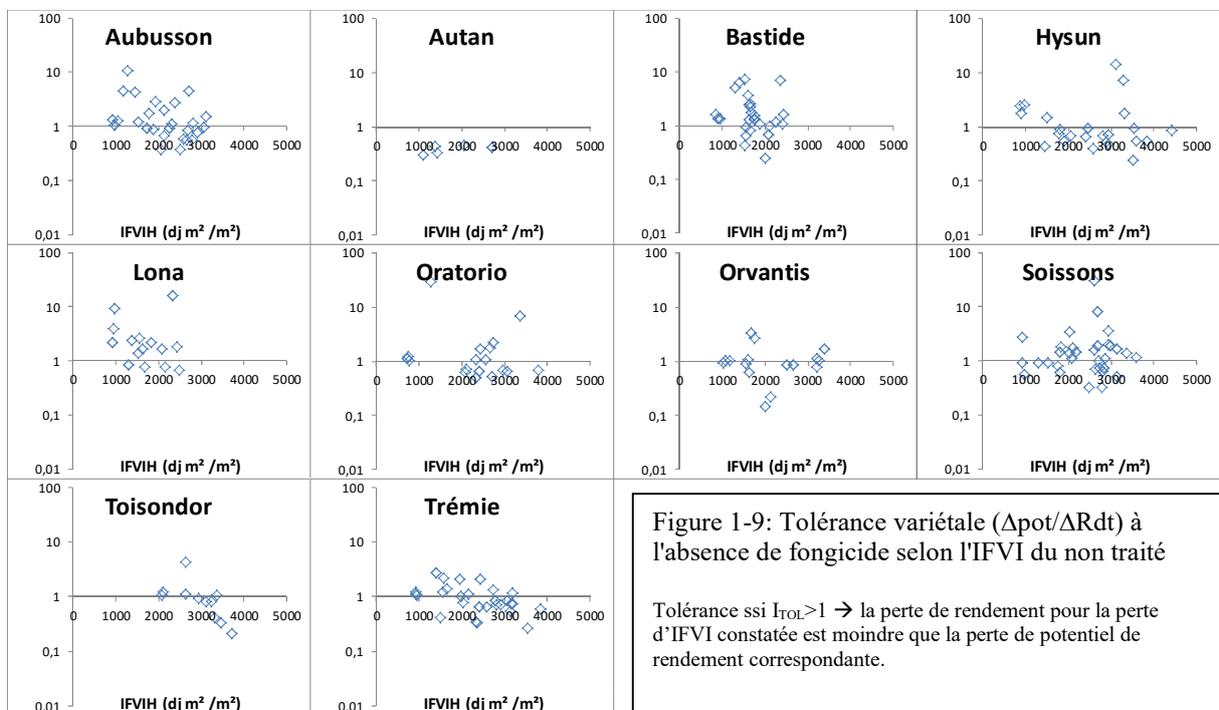


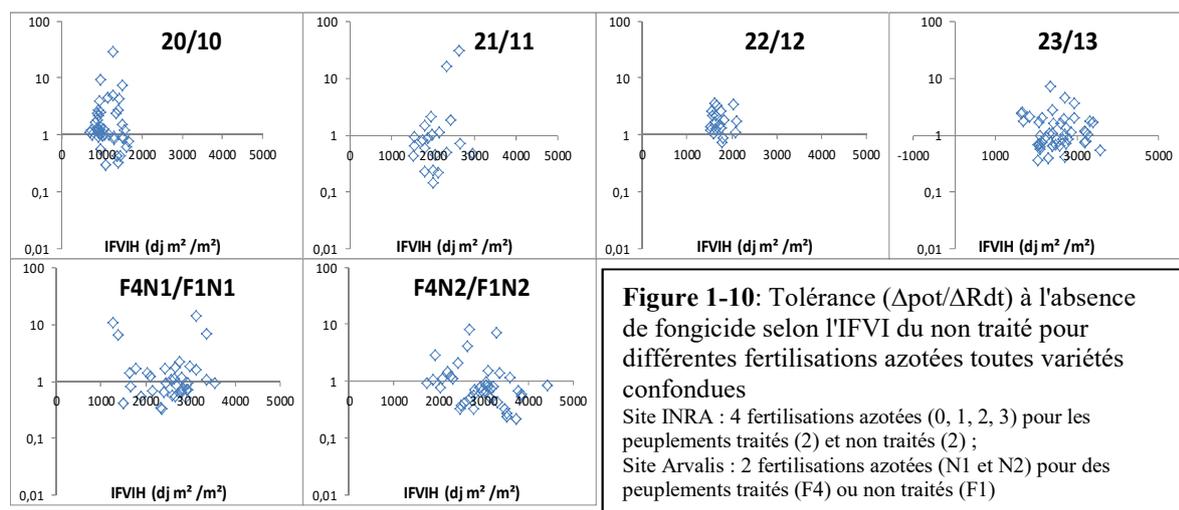
Figure 1-9: Tolérance variétale ($\Delta\text{pot}/\Delta\text{Rdt}$) à l'absence de fongicide selon l'IFVI du non traité

Tolérance ssi $I_{\text{TOL}} > 1 \rightarrow$ la perte de rendement pour la perte d'IFVI constatée est moindre que la perte de potentiel de rendement correspondante.

La **figure 1-9** permet de visualiser par variété le comportement globalement tolérant ou non aux maladies foliaires, l'indicateur étant représenté sur un axe exponentiel. Tout en restant prudent en raison du faible nombre d'observations pour certaines variétés, des comportements variétaux plus ou moins tolérant ou intolérant peuvent être distingués : Autan, Orvantis et

Toisondor auraient des comportements plutôt intolérants ; Aubusson, Bastide, Lona, Soissons des comportements plutôt tolérants ; Hysun et Trémie, indifférents. On peut remarquer que le degré de tolérance ne semble lié ni à la gamme variétale de l'IFVI, ni au potentiel de rendement de la variété. Ainsi Lona, variété qui parcourt une gamme de faibles valeurs d'IFVI et reste loin du potentiel permis par l'IFVI qu'elle développe (Fig.1-8), montre néanmoins un comportement tolérant (Fig1-9), à l'inverse de Trémie ou Orvantis, proches du potentiel de rendement permis par un gamme d'IFVI élevée, et qui ont néanmoins un comportement neutre à intolérant.

La **figure 1-10** permet également de comparer le comportement globalement tolérant ou non de l'ITK azoté aux maladies foliaires, toutes variétés confondues. Ainsi, la gamme de tolérance et d'intolérance varie largement avec les pratiques de fertilisation azotée ; ainsi sur le site INRA, la tolérance est maximale en cas d'absence d'apport d'azote (fertilisation 0), la gamme de réponse tolérante minimale dans le cas de la fertilisation 2 et maximale dans le cas de la fertilisation 1. En conséquence, des leviers variétaux et agronomiques semblent conjointement mobilisables pour générer un comportement tolérant à la septoriose. Malheureusement dans cette base, nous disposons de trop peu de points par variété pour analyser les interactions variété \times azote aboutissant aux comportements les plus tolérants ou intolérants, voire aux comportements neutres

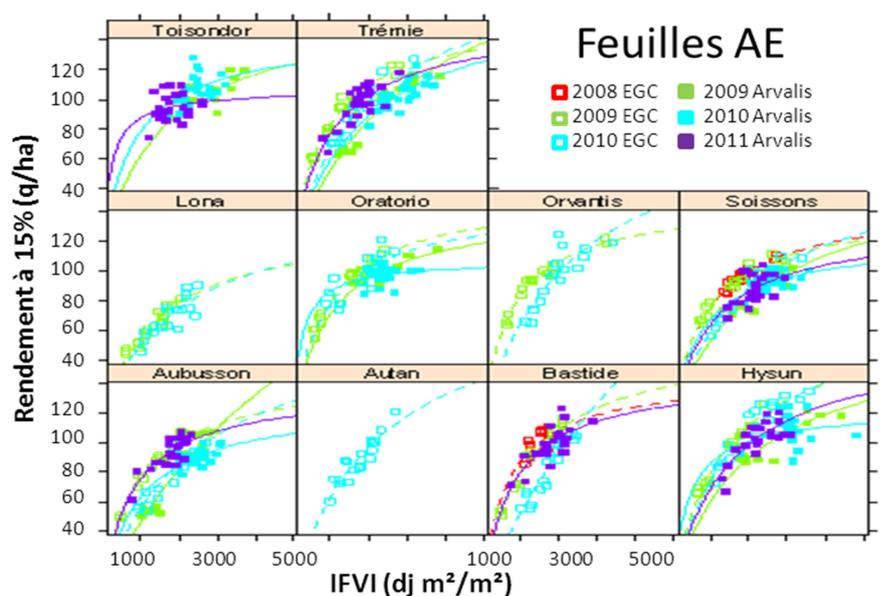


d) Courbes par variété \times essais analysées par modèles mixtes

La dernière option envisagée est de calculer une courbe par variété et par essai. Le déséquilibre du jeu de données rend difficile la comparaison des courbes obtenues : si on réduit le jeu de données à un jeu « complet » où toutes les variétés ont été observées sur tous les sites \times années, seules 4 variétés sont analysées, ce qui est peu pour mettre en évidence des différences variétales. Ceci est illustré par le graphique ci-dessous.

Nous avons donc opté pour une approche par modèle mixte. Ce modèle mixte considère que les valeurs des paramètres V_m et α dépendent de la variété et de l'essai (un essai = une combinaison site \times année). L'effet de la variété sur V_m et α est considéré comme un effet fixe. L'effet de l'essai sur ces 2 paramètres est lui considéré comme aléatoire. On a également précisé que les effets fixes sur V_m et α étaient corrélés ; de même pour les effets aléatoires. Ce modèle a été utilisé pour extraire des valeurs de paramètres V_m et α par variété, ajustées du déséquilibre du jeu de données. Enfin, on a également comparé la variance résiduelle de ce modèle à des modèles n'intégrant ni effet variété ni effet essai, ou l'un ou l'autre. Ceci permet

de quantifier la part de variation expliquée par les effets des essais ou des variétés sur les paramètres V_m et α .



Ajustement de la relation IFV-Rdt pour chaque variété et chaque essai (couple Année × Site).

Premièrement, on remarque que le modèle Michaelien modifié explique presque 57% de la variance des rendements (296.2). Le modèle complet, avec effets variété et essai, en explique lui 83%. La prise en compte de ces deux effets, variété et essai, sur les paramètres V_m et α permet donc d'expliquer 26% supplémentaires de la variance des rendements. Ceci est à comparer aux 17% de variance inexpliquée par le modèle complet : cette variance résiduelle (47.9) regroupe à la fois l'erreur expérimentale et l'interaction variété × essai sur les paramètres. Il est difficile de chiffrer la part de variance due à l'erreur expérimentale dans notre cas, même si cela devrait être possible en s'appuyant sur les répétitions disponibles dans les données d'essais. On peut toutefois dire que la part de variance représentée par l'effet d'interaction variété × essai sur les paramètres représente probablement entre la moitié et le tiers de celle expliquée par l'effet variété et l'effet essai pris de manière additive. On peut également comparer la variance résiduelle du modèle sans effet variété, qui est de 98.8, au modèle sans effet essai, qui est de 77.3. En prenant comme point de référence le modèle sans effet essai et sans effet variété, dont la variance résiduelle est de 126.8, on se rend compte que l'apport en termes de variance expliquée de l'effet variété est de 39%, contre seulement 22% pour l'effet essai. L'ensemble de ces éléments laisse penser que les valeurs variétales des paramètres estimées par le modèle peuvent décrire les différences variétales avec une précision satisfaisante.

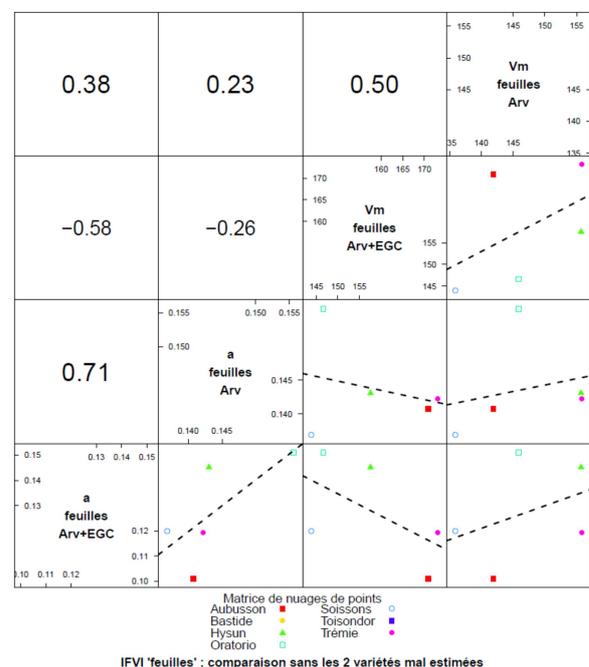
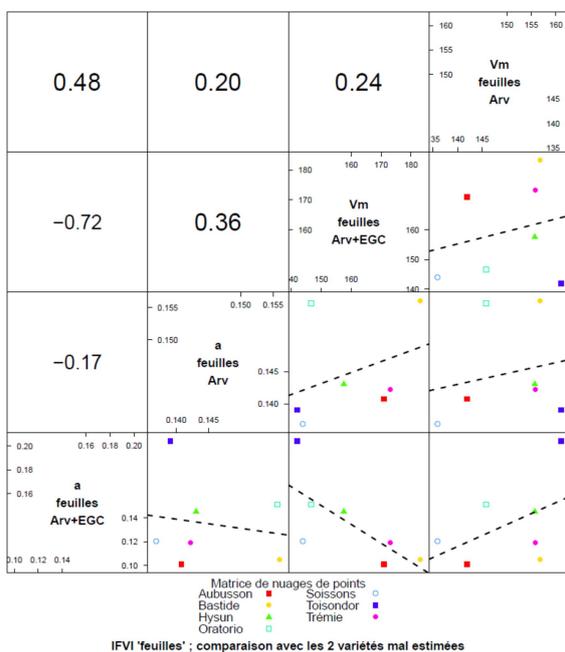
Les paramètres extraits du modèle et leurs intervalles de confiance associés sont représentés ci-dessous.

Variété	V_m	V_m basse	V_m haute		α	α basse	α haute	
Aubusson	170.9	152.1	189.7	ab	0.1010	0.0741	0.1279	ab
Autan	177.1	107.0	247.2	abc	0.1155	0.0905	0.1404	bc
Bastide	183.2	170.9	195.4	a	0.1051	0.0963	0.1138	bc
Hysun	157.6	145.0	170.1	bd	0.1451	0.1309	0.1594	c
Lona	104.7	88.9	120.5	c	0.1057	0.0912	0.1203	ab
Oratorio	146.6	131.9	161.3	b	0.1510	0.1330	0.1690	c
Orvantis	161.5	145.1	177.8	ab	0.1282	0.1148	0.1416	ac
Soissons	143.9	131.9	155.8	b	0.1200	0.1091	0.1308	ab
Toisonedor	141.9	124.3	159.6	b	0.2041	0.1364	0.2719	c
Trémie	173.1	161.5	184.7	ad	0.1191	0.1101	0.1282	ab

Valeurs de paramètres et des bornes hautes et basses des intervalles de confiance à 95% associés pour les courbes IFVI – rendement ajustées par modèle mixte.

Les variétés ayant des lettres en commun pour un paramètre ne sont pas significativement différentes à 95% pour ce paramètre. Etant donné que les largeurs des intervalles sont différentes entre variétés, l'allocation de lettres pour représenter les différences deux à deux a été réalisée en s'appuyant sur les algorithmes disponibles dans le package 'multcomp' de R.

Cette approche apparaît donc nettement plus satisfaisante que les précédentes. Néanmoins, il nous a semblé utile de vérifier la validité de nos estimations. Pour cela, nous avons recalculé ce modèle, mais uniquement pour les données Arvalis. A première vue, les corrélations entre les deux séries de résultats sont apparues mauvaises. En observant de plus près, on remarque que les deux variétés à l'origine de cette mauvaise corrélation sont celles pour lesquelles l'estimation des paramètres est entachée de la plus grosse erreur⁶. En ôtant ces deux variétés, les corrélations sont nettement améliorées.



Corrélations entre paramètres estimés sur le jeu de données complet (Arvalis+EGC) et le jeu de données Arvalis seul, pour toutes les variétés

Corrélations entre paramètres estimés sur le jeu de données complet (Arvalis+EGC) et le jeu de données Arvalis seul, après exclusion des 2 variétés dont les paramètres étaient mal estimés

Ce résultat indique donc qu'il faut également manier cette approche avec précaution : les variétés présentant des estimations trop peu précises sont à éliminer des conclusions.

e) Application aux données « Blés rustiques » : limites du jeu de données

Nous avons cherché à appliquer successivement aux données du réseau « blés rustiques » (BR) les méthodes testées précédemment. Le Réseau BR semble en effet au premier abord correspondre exactement au type d'expérimentations requises pour essayer d'établir une

⁶ Toisondor est mal estimée pour α dans le jeu de données Arvalis+EGC, Bastide est mal estimée pour α et Vm dans le jeu de données Arvalis

caractérisation variétale de la tolérance. En effet, il met en jeu des itinéraires techniques différenciés (ITK2 = raisonné ; ITK3 = bas intrants ; ITK4 = très bas intrants) tant en terme de densité de semis que d'apports azotés et fongicides : ceci nous a conduit à penser que ces essais permettraient donc de créer une gamme de variation d'IFVI assez large, nécessaire à l'évaluation de la tolérance via la relation IFVI – rendement. Nous avons testé successivement les trois approches développées précédemment sur les jeux de données détaillées en les transposant aux données du réseau BR. Les données d'IFVI du réseau BR ont été acquises avec le protocole indirect à l'échelle du couvert (mesure de LAI au LICOR LAI-2000 et mesure de surfaces vertes par appareil photo). Or, (cela sera présenté de manière plus détaillée en 3^{ème} partie des résultats), cela induit des valeurs pouvant être différentes des analyses issues de mesures d'IFVI acquises avec le protocole "détaillé" (mesures directes des surfaces totales et vertes). Le jeu de données Arvalis ayant fait l'objet d'une acquisition de données avec les 2 méthodes, nous afficherons régulièrement au sein de cette section des comparaisons avec les données Arvalis acquises avec la méthode indirecte.

La stratégie d'analyse par modèle mixte n'a pas donné de résultats : il n'a pas été possible de faire converger le modèle mixte. Même avec une spécification du modèle plus simple (pas de corrélation entre les effets aléatoires sur Vm et α) la convergence n'a pas pu être obtenue. Une voie à poursuivre pourrait être d'éliminer spécifiquement certaines variétés du jeu de données, lorsque les points acquis pour celles-ci sont très mal décrits par le formalisme Michaelien.

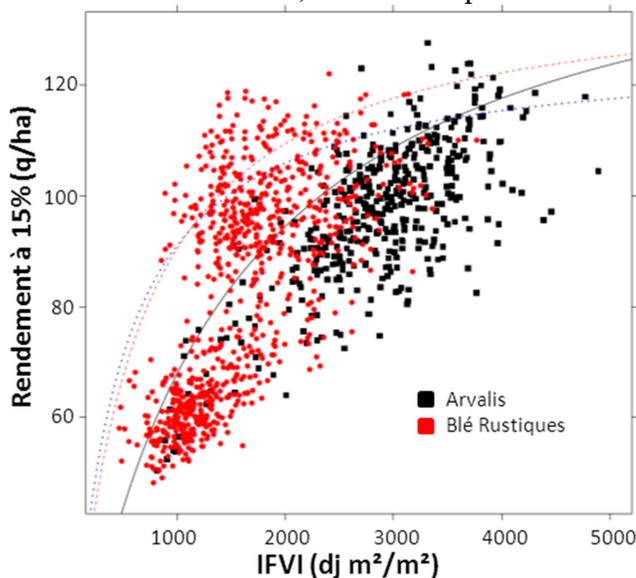
L'ajustement de courbes enveloppes par variété a également été testé. Comme pour les données "Détaillées AE", les résultats obtenus dans "Indirect BR" sont entachés d'une incertitude conséquente, qui ne permet guère de différencier les variétés.

Variété	Vm	α	sd (Vm)	sd (α)
Accroc	118.332449	0.40181061	21.7465134	0.54795584
Aldric	139.89335	0.2302249	16.2177492	0.06969463
Aligator	126.662501	0.32309157	25.2091089	0.30117088
Altigo	138.432038	0.32781084	59.1069544	0.54329403
Amador	1729.78148	0.05549975	8673.26094	0.01615384
Ambition	158.754554	0.1372699	71.9691823	0.08705532
AO07119	126.662501	0.32309157	17.1536292	0.2422586
Arezzo	126.662501	0.32309157	40.9074709	0.35798127
Atlass	126.662501	0.32309157	20.3833212	0.22577683
Aubusson	148.65214	0.11164104	7.59283918	0.0112718
Barok	156.102371	0.17899391	55.7786832	0.11016286
Bastide	148.565792	0.17484045	18.9241123	0.04949729
Bermude	164.655864	0.17782442	33.0457059	0.06785572
Boregar	157.366885	0.19610922	23.7695941	0.05942798
Caph+Tra+Pre+At	240.732144	0.10788571	119.110795	0.03613025
Caphorn	118.141937	0.40870934	19.5441179	0.3537896
CF04119	203.875393	0.12735311	111.765639	0.08618734
DI08013	149.158447	0.28238519	70.9543038	0.37728353
Expert	115.889714	0.84837898	21.6426951	1.6136731
Garcia	132.695691	0.24374938	35.4965568	0.18814292
Goncourt	128.003509	0.30314344	31.9672651	0.25224624
Hystar	131.185715	0.38722203	14.5648826	0.30294394
Hysun	164.980051	0.11674719	10.4210647	0.01498883
Koreli	118.506846	0.39326782	40.9343809	0.75546151
Oakley	115.905664	2.01084297	24.9352144	12.527392
Oratorio	144.067906	0.13135095	10.061467	0.02791226

Valeurs des paramètres et écarts-types associés pour les courbes enveloppes de la relation IFVI- rendement obtenues sur les données du réseau Blés rustiques et des expérimentations Arvalis (surlignés en gris), acquises avec la méthode indirecte à l'échelle du couvert

Oxebo	116.984103	0.39448864	17.9222833	0.33432992
Premio	202.44771	0.11680247	72.3094463	0.047491
RE05043	126.662501	0.32309157	31.2904495	0.34307302
Rustic	110.325301	1.24974007	18.7395699	3.79523212
Scor	132.249529	0.26794092	49.1923893	0.27765802
Soissons	116.482565	0.20717905	11.6019708	0.11428525
Solehio	151.555115	0.17626823	28.3531218	0.06853564
Swinggy	112.833955	0.31164825	22.6980134	0.34318782
Toisondor	159.227613	0.11885027	17.107977	0.03000931
Trapez	141.060048	0.37504282	28.5445003	0.267458
Trémie	166.721076	0.10206196	16.9811474	0.01917862

En effet, si on calcule les intervalles de confiance à 95%, on observe que ceux-ci se superposent quasi systématiquement pour toutes les comparaisons deux à deux de variétés et pour les 2 paramètres. En regardant les valeurs de paramètres obtenues sur le réseau BR comparativement à celles sur les essais Arvalis, on remarque également que les valeurs de α sont plus élevées pour le réseau BR, signifiant une pente plus importante. Lorsqu'on observe l'ensemble des données, ceci se comprend bien :

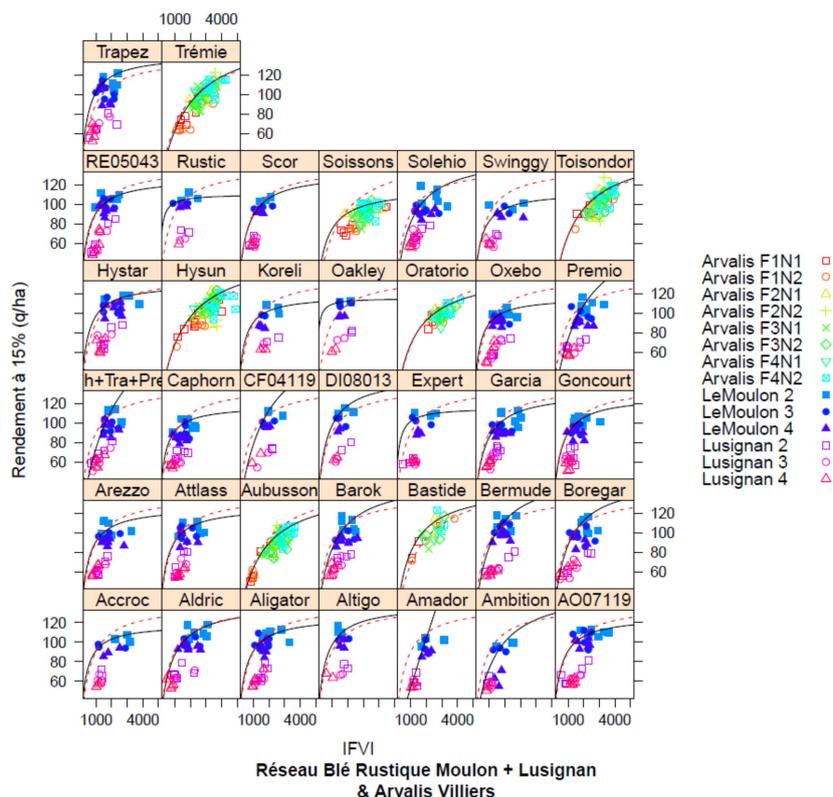


Rendement (q/ha à 15% d'humidité) en fonction de l'IFVI obtenu par méthode indirecte à l'échelle du couvert pour le réseau Blés rustiques (BR) et les essais Arvalis. La courbe en trait noir plein représente la courbe enveloppe générale obtenue sur les données Arvalis ; en trait rouge pointillé celle obtenue sur le réseau BR et en trait bleu pointillé la courbe commune à toutes les données

La répartition des points du réseau BR apparaît assez différente de celle d'Arvalis, avec une gamme d'IFVI visiblement plus restreinte pour une gamme de rendement équivalente, d'où des pentes calculées plus importantes. On remarque également que les données du réseau BR semblent se structurer en 2 groupes distincts. Le graphique ci-dessous permet de mieux analyser cette répartition :

Cette représentation permet de mettre en évidence 2 aspects importants des jeux de données du réseau BR. Premièrement, le fait que les deux sites utilisés lors des deux années d'expérimentation, 2010 et 2011, se différencient énormément sur leur rendement : de fait, la pente de la relation IFVI rendement observée représente avant tout les différences entre sites d'études. Le 2^{ème} aspect important, qui découle aussi du 1^{er}, est que les variations d'ITK ont finalement créé des gammes de variation d'IFVI (et de rendement) faibles, comparativement aux essais Arvalis où c'est la variation des ITK qui crée une large gamme de variation d'IFVI et de rendement

Données 'couvert'



Rendement (q/ha à 15% d'humidité) en fonction de l'IFVI obtenu par méthode indirecte à l'échelle du couvert pour le réseau Blés rustiques (BR) et les essais Arvalis pour chacune des variétés. Les symboles représentent les différentes combinaisons Site × ITK. La courbe en trait noir plein représente la courbe enveloppe spécifiquement obtenue pour chacune des variétés; celle en trait rouge pointillé est la courbe générale commune à toutes les données.

Ces deux constats conduisent à conclure que les expérimentations menées sur les 2 sites du réseau BR pendant 2 ans n'ont pas permis d'obtenir le jeu de données initialement envisagé. Nous formulons plusieurs hypothèses quant à cela. Premièrement, on ne peut pas exclure des différences dans l'acquisition des données d'IFVI. Plus précisément, l'acquisition des suivis de surface verte par photo peut difficilement être incriminée, car l'analyse d'images a été réalisée *a posteriori* par le même opérateur sur tous les jeux de données. Par contre, l'acquisition du LAI avec le LICOR LAI-2000 est plus sujette à caution. L'expérience montre que ce type d'appareil peut se dérégler et fournir des résultats parfois peu robustes. Les appareils utilisés sur les 2 sites étant différents, il semble possible que les valeurs de LAI du Moulon aient été sous-estimées, ou celles de Lusignan surestimées. La 2^{ème} explication possible des gammes de variation IFVI-rendement observées concerne les spécificités climatiques des années 2010 et 2011. Ces 2 années sont en effet marquées par un manque de pluies printanières ayant conduit à du stress hydrique, à des carences azotées induites précoces et à une faible pression de maladies foliaires. Ce phénomène a particulièrement touché le Poitou-Charentes, et donc le site de Lusignan, lors de ces 2 années.

Ces différents phénomènes contribuent largement à expliquer les différences de rendement entre Lusignan et Le Moulon, mais on aurait pu penser que cela conduise à de plus grandes différences d'IFVI que celles observées. La prédominance des stress azotés ou hydriques sur les stress liés aux maladies foliaires lors de ces 2 années peut aussi expliquer le fait que les ITK n'ont pas permis de créer de grandes gammes de variation d'IFVI, à la fois parce que l'ensemble des ITK a du souffrir de carence azotée, et parce que la faible pression de maladies n'a pas permis de créer de grandes différences d'épidémies entre les ITK, une faible protection suffisant largement à les limiter. Cette hypothèse conjoncturelle nous conduit également à une réflexion plus structurelle sur l'intérêt du réseau BR pour obtenir des données IFVI – rendement permettant d'évaluer les variétés pour leur tolérance. En effet, nous faisons l'hypothèse que ces essais permettent de générer des gammes larges de variation d'IFVI. Or, la construction même des ITK consiste à une baisse coordonnée des intrants, visant à compenser la baisse de protection fongicides par une diminution de la pression de

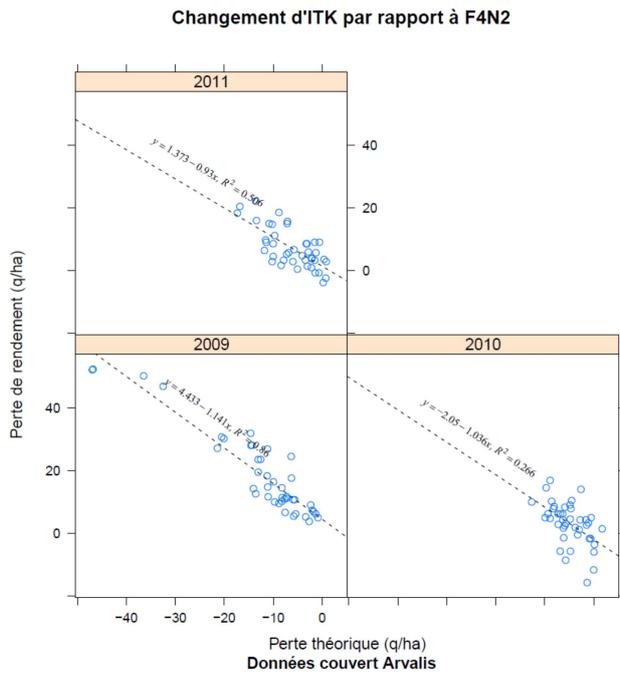
maladie via d'autres leviers comme la densité, l'azote, et bien sûr la résistance des variétés aux maladies foliaires. Une synthèse récente des données du réseau BR⁷ a montré que la pression de maladie était effectivement faible en ITK3 grâce à l'activation de ces différents leviers : ceci peut être une limite à l'obtention de gammes de variation d'IFVI plus larges. Par contre, cette synthèse a aussi montré que la tolérance de certaines variétés au passage de l'ITK2 à l'ITK3 semblait liée au fait que ces variétés, qui produisent un nombre élevé d'épis/m², supportent bien la perte d'un nombre important de ceux-ci. La composante épis/m² étant fortement liée à l'IFVI, on pourrait supposer que ce constat correspond en fait au trait de tolérance identifié qu'est un LAI maximal élevé. Nos données n'ont toutefois pas permis de confirmer cette hypothèse.

Enfin, nous avons cherché à déployer la méthode de calcul d'écart à la courbe enveloppe. Nous avons cependant modifié légèrement l'approche. En effet, dans l'approche proposée plus haut, l'indicateur de tolérance est un rapport entre la pente ($\Delta\text{Rendement}_{\text{potentiel}}/\Delta\text{IFVI}$) calculée à partir de la courbe enveloppe et la pente ($\Delta\text{Rendement}_{\text{observé}}/\Delta\text{IFVI}$) obtenue à partir des valeurs observées. Nous avons opté pour une approche similaire, mais en retenant un indicateur plus facile d'interprétation: la différence et non le rapport entre ces pentes. La mesure de tolérance devient l'écart entre les pertes de rendement observée et théorique. Cela permet d'exprimer directement la mesure de tolérance en quintaux par hectare : si la valeur est positive, alors on est dans une situation qui s'est avérée tolérante, le rendement étant supérieur à ce qui aurait été attendu pour la perte d'IFVI considérée.

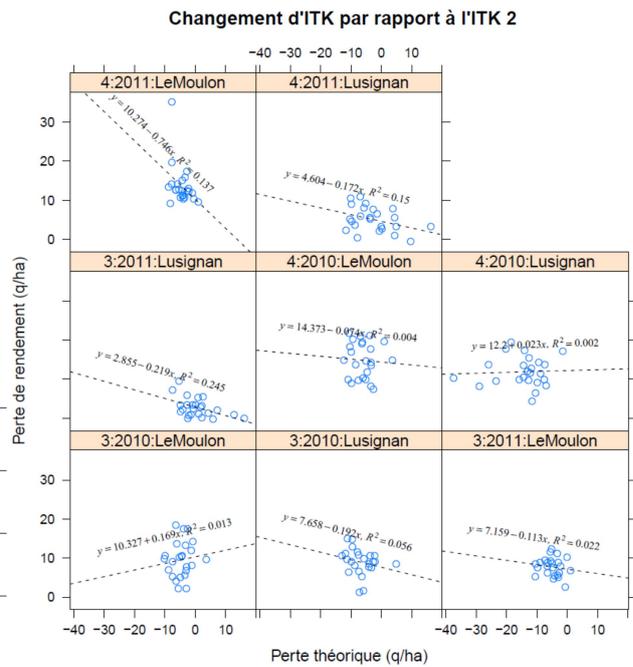
Les valeurs observées sont représentées en annexe 8. On remarque plusieurs choses. Premièrement, on note un nombre important de valeurs négatives. On note aussi que des effets lieux importants semblent exister : le passage à l'ITK 4 à Lusignan lors des 2 années ayant été généralement mieux toléré, alors que le passage à l'ITK4 au Moulon lors des 2 années apparaît moins bien toléré. Ceci est à rapprocher du fait que la courbe enveloppe obtenue est avant tout structurée par les effets lieux plutôt que les effets ITK : cette courbe est donc sujette à caution. Pour cette raison, nous avons préféré que la courbe figure en annexe, car les différences variétales qui en seraient déduites nous apparaissent hasardeuses.

Nous nous sommes également servis de cette approche de la mesure de la tolérance pour essayer d'asseoir notre diagnostic sur les données issues du réseau BR lors de ces 2 années, comparativement aux données Arvalis. Nous avons ainsi calculé cette nouvelle mesure de tolérance sur les essais Arvalis. On a ensuite regardé si la perte théorique de rendement étaient bien reliée à la perte de rendement : si tel est le cas, alors cela signifie que la courbe enveloppe ajustée aux données est satisfaisante pour caractériser l'effet de la perte d'IFVI sur l'élaboration de rendement. A contrario, si ce n'est pas le cas, cela signifie que la courbe enveloppe ajustée rend mal compte de cet effet : il apparaît alors plutôt illusoire d'espérer caractériser la tolérance grâce à un écart à cette courbe. On voit bien que sur les essais Arvalis, la perte de rendement réelle est bien corrélée à la perte théorique, ce qui n'est pas le cas pour le réseau BR.

⁷ Réseau Blés Rustiques 2003-2010 ; Irène Félix et al. ; Rapport d'étude remis dans le cadre du projet Casdar PiCoBlé

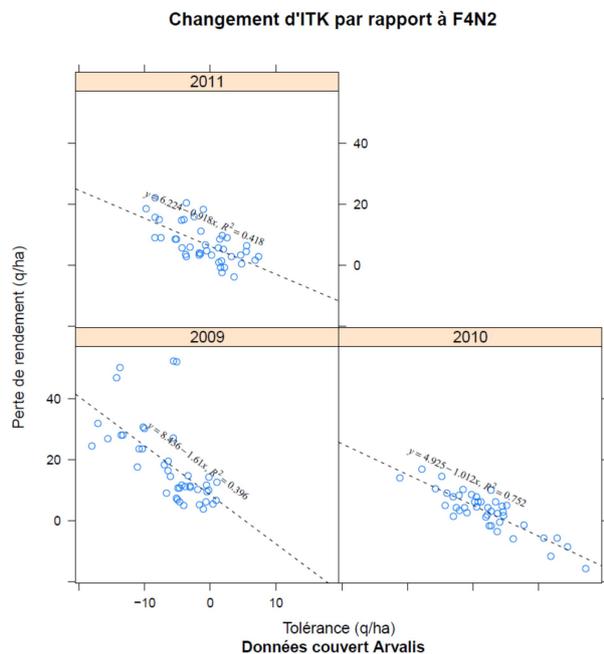


Perte de rendement par rapport à l'ITK de référence en fonction de la perte théorique calculée à partir de la courbe enveloppe : données Arvalis

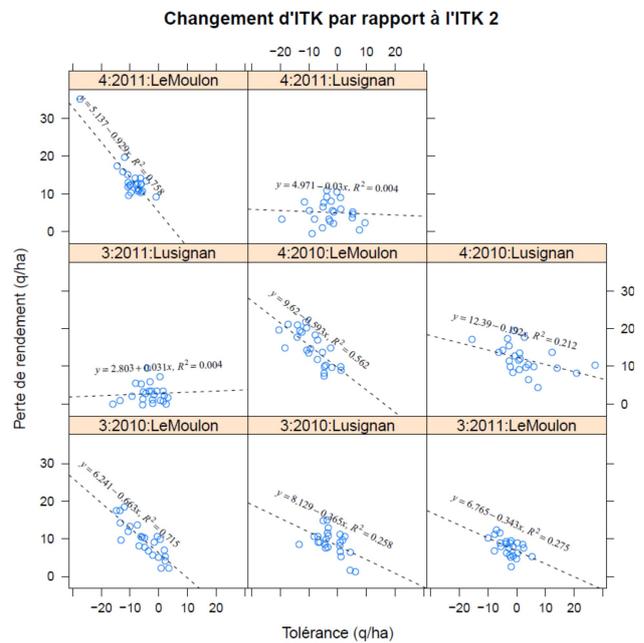


Perte de rendement par rapport à l'ITK de référence en fonction de la perte théorique calculée à partir de la courbe enveloppe : données réseau Blés rustiques

En conséquence, la tolérance calculée à partir de cette courbe enveloppe est elle-même bien plus explicative des pertes de rendement pour les données Arvalis que pour les données BR.



Perte de rendement par rapport à l'ITK de référence en fonction de la tolérance calculée à partir de la courbe enveloppe : données Arvalis



Perte de rendement par rapport à l'ITK de référence en fonction de la tolérance calculée à partir de la courbe enveloppe : données réseau Blés rustiques

f) Intérêts et limites des différentes méthodes

Parmi les différentes méthodes, celle basée sur l'ajustement d'un modèle mixte aux données apparaît comme la plus directe. Elle permet d'obtenir des valeurs de paramètres variétaux entachés d'une plus faible incertitude. Toutefois, l'ajustement numérique de ce type de modèle n'est pas toujours évident. L'approche d'ajustement d'une courbe enveloppe par variété est séduisante intellectuellement, car elle permet de représenter la notion écophysiological selon laquelle l'interception lumineuse (et donc l'IFVI) détermine le potentiel maximal que peut atteindre le rendement, qui est ensuite diminué par d'autres facteurs limitants. Cependant, l'ajustement précis de ce type de courbes pour chaque variété nécessite une importante quantité de données.

Pour les deux méthodes précédentes, le fait que les données des différentes variétés n'aient pas toujours été acquises sur le même ensemble d'essais est une des sources d'incertitude importante sur les ajustements de courbes. La mise en place d'une série d'expérimentations avec un nombre de variétés communes plus important est à recommander. Pour ces deux méthodes, l'idée est ensuite d'exploiter les valeurs de paramètres obtenues pour caractériser les variétés. On peut, grâce à elles, calculer la tolérance comme la perte de rendement par perte d'IFVI pour n'importe quelle gamme de variation d'IFVI. On pourrait ainsi déboucher sur des mesures de tolérance « régionalisées », en considérant que le maximum d'IFVI accessible n'est pas le même suivant les régions, et que la perte d'IFVI dépendra de la pression de maladie de la région.

L'approche consistant à ajuster une seule courbe-enveloppe globale et à utiliser des écarts de comportement à celle-ci a l'avantage d'être moins gourmande en paramétrage. Mais cette approche a un écueil important sur le plan écophysiological : elle ne permet pas de distinguer la tolérance à une perte d'IFVI de la tolérance aux autres facteurs limitants intervenus sur les essais.

Quelle que soit la méthode déployée, nous nous sommes heurtés à une difficulté fondamentale en traitant le jeu de données du réseau Blés rustiques : la gamme de variation d'IFVI générée par les ITK était beaucoup trop faible, contrairement à ce qui était initialement espéré. Comme rappelé ci-dessus, ceci peut en partie être expliqué par les années climatiques très particulières pour le blé en 2010 et 2011. Cet exemple nous montre néanmoins que pour être efficace, nos propositions de caractérisation de la tolérance par la mesure de l'IFVI doivent s'appuyer sur des essais créant une gamme de variation d'IFVI suffisante au sein de chaque essai, et vérifier l'hypothèse que les variations d'IFVI sont bien à l'origine d'une part significative des variations de rendement dans chaque essai. Enfin, bien évidemment, quelle que soit la méthode, la qualité de l'acquisition des données individuelles permettant le calcul de l'IFVI est primordiale. Nous y reviendrons dans la section suivante.

3) Approches de simplification de la mesure: vers des systèmes moyens ou hauts débits

L'acquisition de l'IFVI est une mesure complexe, nécessitant des mesures fréquentes et détaillées. Dans cette dernière partie de présentation de résultats, nous cherchons à tester différentes approches de simplification de cette mesure. Deux idées sont testées : l'une consiste à ne mesurer l'IFVI que d'un seul étage foliaire qui serait représentatif de ce qui se passe sur l'ensemble du couvert ; l'autre correspond à l'utilisation de la méthode indirecte au niveau du couvert. Nous pouvons tester la fiabilité de la 1^{ère} approche sur l'ensemble des essais où la méthode détaillée (mesures de surfaces totales et vertes par étage foliaire) a été mise en œuvre, à savoir les données Arvalis et EGC. Pour la 2^{nde}, nous n'utilisons que les essais Arvalis, sur lesquels les deux méthodes (détaillée et indirecte) ont été déployées. Nous

présenterons d'abord la capacité des deux approches simplifiées à reproduire l'IFVI obtenu selon la méthode détaillée. Nous présenterons ensuite les résultats de comparaison de variétés obtenus avec ces approches simplifiées, et nous les comparerons à ceux obtenus avec la méthode détaillée.

a) Comparaison des mesures d'IFVI approchées avec l'IFVI de référence

Méthode utilisant une seule strate foliaire

On a d'abord étudié l'IFVI de la feuille étendue (F1); en effet la contribution de cette feuille à l'interception du rayonnement par le couvert est majoritaire (supérieure à 50%) dans la littérature, si bien que l'IFVI de cette strate foliaire a déjà été utilisée pour caractériser la durée de vie verte du couvert. On a comparé l'IFVI F1 à l'IFVI total calculé à partir de toutes les surfaces foliaires scannées par étage (ainsi qu'à l'IFVI₁₊₂₊₃ calculé à partir des 3 premiers étages). La figure 2-1 montre la relation entre l'IFVI F1 et l'IFVI total pour toutes les données de la base Arvalis-EGC.

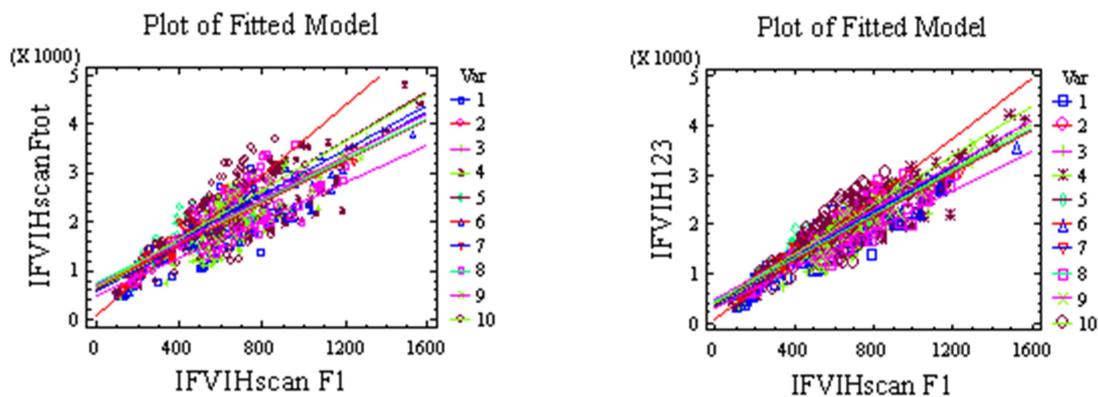


Figure 2-1 : Relation entre l'IFVI de la F1 et l'IFVI total (A) ou l'IFVI des strates 1+,2+3 (B) pour chaque variété de la base (numérotées selon l'ordre alphabétique)

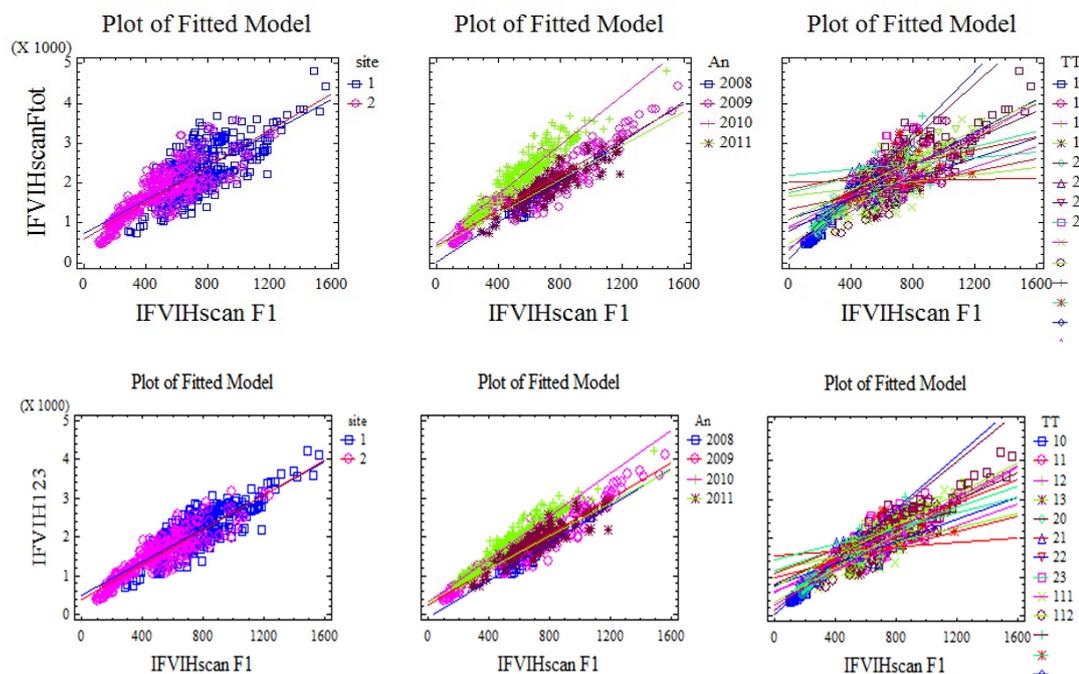


Figure 2-2 : Exploration des sources de variations de la relation: (A,D) le site, (B,E) l'année, (C,F) le traitement (N×F) pour l'IFVI total et pour l'IFVI₁₊₂₊₃.

L'IFVI de la F1 explique 70% de la variabilité de l'IFVI total, la pente et l'origine de cette relation sont significativement différentes de zéro, mais on note l'absence d'effet variétal sur cette relation. L'effet site n'est pas significatif, celui de l'année faiblement significatif (sur la pente et l'origine), celui du traitement ($F \times N$) très significatif. Pour équilibrer les données, les expérimentations des sites ont été analysées indépendamment. Pour le site Villiers l'IFVI F1 explique 53% de la variabilité de l'IFVI total, avec un effet significatif du traitement sur la pente ou l'origine de cette relation. Dans le cas du site de Grignon, l'IFVI F1 explique 79% de la variabilité de l'IFVI total, avec également un effet significatif du traitement et de l'année sur la pente et l'origine de la relation. L'effet variétal par site reste limité. On améliore largement la corrélation générale quand on ne prend en compte pour l'IFVI total que les trois dernières feuilles ($r^2=0.85$) avec les mêmes effets des facteurs que précédemment cités (Fig 2-1 B ; Fig 2-2 DEF).

Quand on réitère cette démarche avec la strate F2, on constate figure 2-3 que l'IFVI de la F2 explique à elle seule 89% de la variabilité de l'IFVI total ; de même que pour la F1 on ne met en évidence aucun effet significatif de la variété sur la pente ou l'origine de cette relation. Il existe un très léger mais significatif effet site sur l'origine de la relation mais pas sur la pente, un effet de l'année sur la pente (<15%) et l'origine, et dans un seul cas l'effet d'un traitement ($F \times N$) sur l'origine.

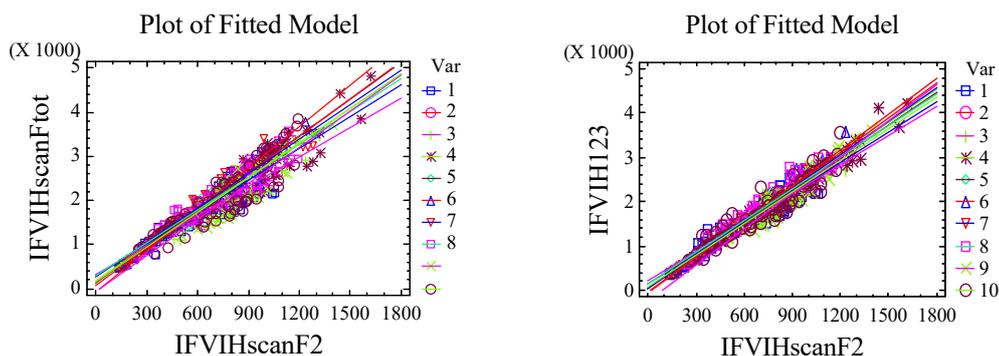


Figure 2-3 : Relation entre l'IFVI de la F2 et l'IFVI total (A) ou l'IFVI des strates 1+2+3 pour chaque variété de la base (numérotée selon l'ordre alphabétique).

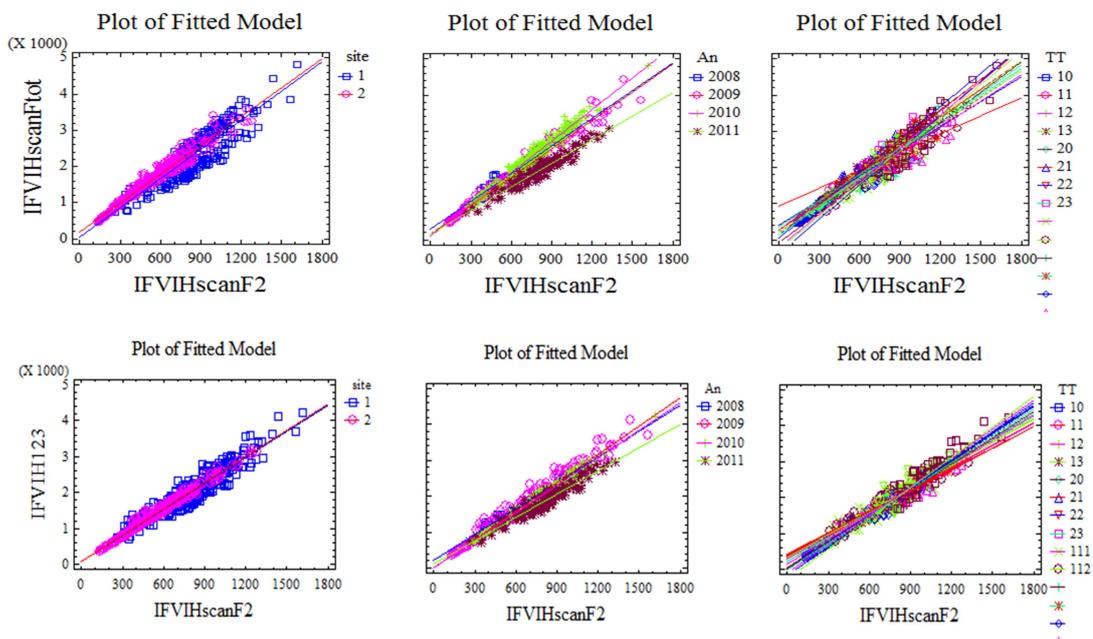
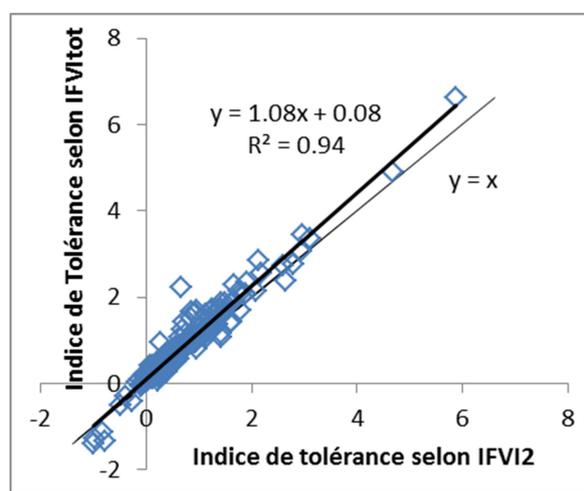


Figure 2-4 : Exploration des sources de variations de la relation: (A) le site, (B) l'année, (C) le traitement (N*F) dans le cas de la relation à l'IFVI total ou à l'IFVI₁₊₂₊₃

Comme précédemment l'analyse sur les sites Arvalis et EGC séparément permet d'analyser des données où les facteurs de variation sont équilibrés. Ceci permet de confirmer l'effet année et l'absence d'effet du traitement sur la relation.

Enfin, quand on substitue à l'IFVI total l'IFVI des strates 1+2+3, la sensibilité aux facteurs site, année et traitements s'estompe totalement et l'IFVI de la F2 explique 96% de la variabilité de l'IFVI₁₊₂₊₃ de manière robuste.

En conclusion, l'IFVI calculé à partir des scans des F2 permet de rendre compte de 90% environ de la variabilité de l'IFVI total. La strate F4 ne joue que marginalement dans l'interception du rayonnement. Sa suppression dans l'estimation de l'IFVI total mérite d'être étudiée. En effet l'IFVI₁₊₂₊₃ est estimé sans biais et avec un très haut niveau de précision par l'IFVI F2. Si on prend en compte la F4, l'estimation de l'IFVI total par l'IFVI F2 est légèrement biaisée selon l'année, ce qui risque de fausser l'analyse des relations IFVI–rendement, d'autant qu'elle risque d'être liée à la pression de maladie de l'année.



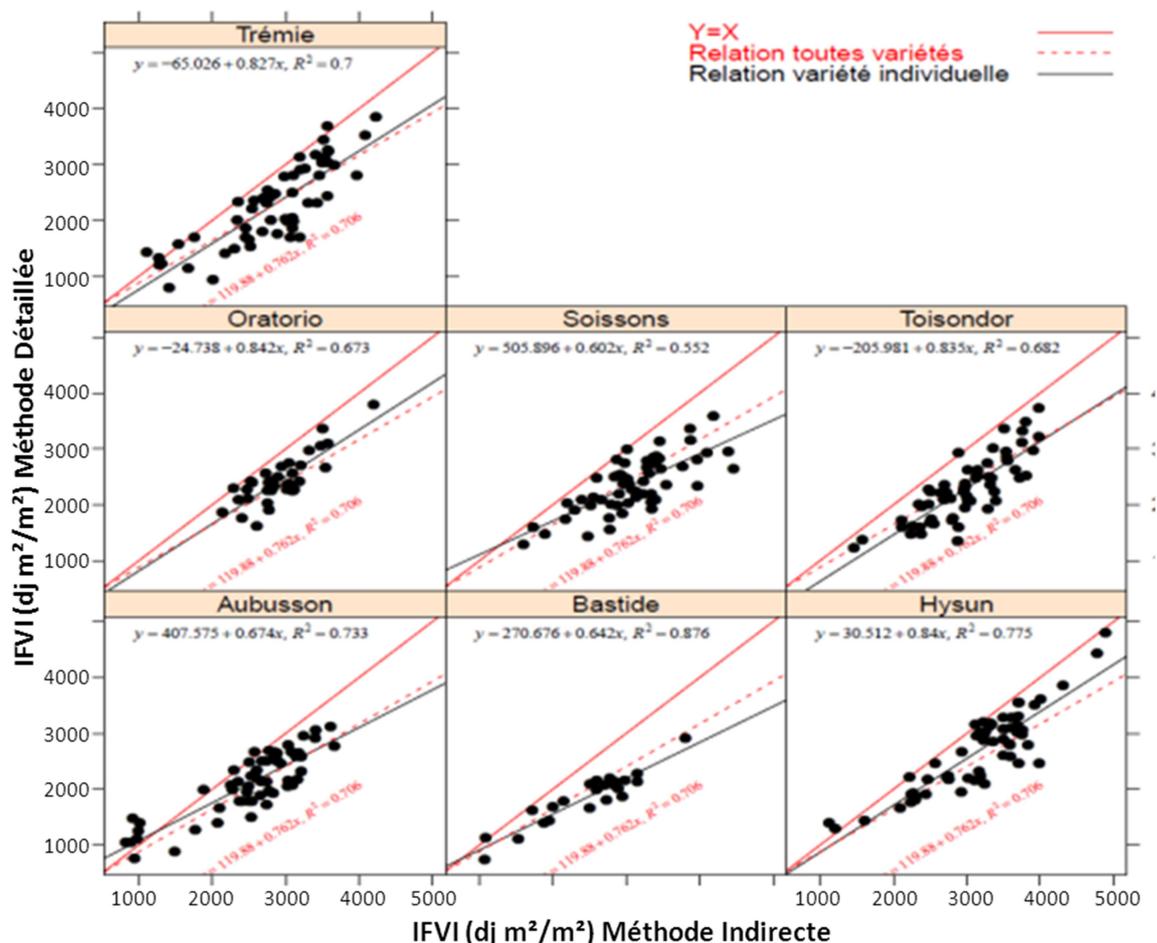
Validation: Le calcul de la tolérance sur la base d'une courbe enveloppe spécifique basée sur les F2 permet de retrouver les mêmes résultats ; les paramètres de la courbe enveloppe sont $V_{F2}=1324$ et $K_{F2}=225$ et la corrélation avec les données utilisées pour sa construction toujours excellente ($r^2= 0.992$). La corrélation entre les indicateurs de tolérance à la maladie calculés pour chaque couple traité-non traité de la base à partir de l'IFVI_{total} et IFVI_{F2} est de 0.97 (fig 2-5 ci-contre); néanmoins, la pente est significativement supérieure à 1, ce qui introduit

un biais de 8% et l'origine significativement différente de zéro. Cette simplification diminue donc la sensibilité de l'indicateur ce qui peut être gênant quand la tolérance exprimée est faible. Ce biais n'est pas lié à l'imprécision des mesures sur les feuilles 4 puisqu'il n'est pas éliminé lorsqu'on réalise la même analyse pour l'IFVI₁₊₂₊₃.

Méthode indirecte

Le graphique ci-dessous met en évidence une plutôt bonne corrélation entre l'IFVI mesuré via l'approche indirecte par rapport à l'IFVI obtenu par la méthode détaillée. Sur l'ensemble des données, le r^2 est de 0,706. Pris variété par variété, le r^2 varie de 0,552 à 0,876.

On remarque aussi que l'IFVI obtenu par la méthode indirecte est supérieur de l'ordre de 20 à 30% à l'IFVI méthode détaillée. Cette différence tient entre autres au fait que les mesures ne sont pas strictement équivalentes. En effet, tant la mesure de LAI maximal que la mesure de surface verte ne représentent pas exactement les mêmes choses. Le LAI maximal mesuré avec la méthode détaillée correspond effectivement à la surface des seuls limbes de feuilles, alors que le "LAI" mesuré au LICOR LAI-2000 pour la méthode indirecte correspond à la surface de l'ensemble des organes : feuilles, tiges et épis. Ensuite, le suivi de surface verte avec la méthode détaillée permet de suivre directement l'évolution de la surface verte des feuilles. A contrario, l'utilisation de l'appareil photo mesure également l'évolution de la surface verte du couvert entier: il tient en particulier compte de la surface des épis.

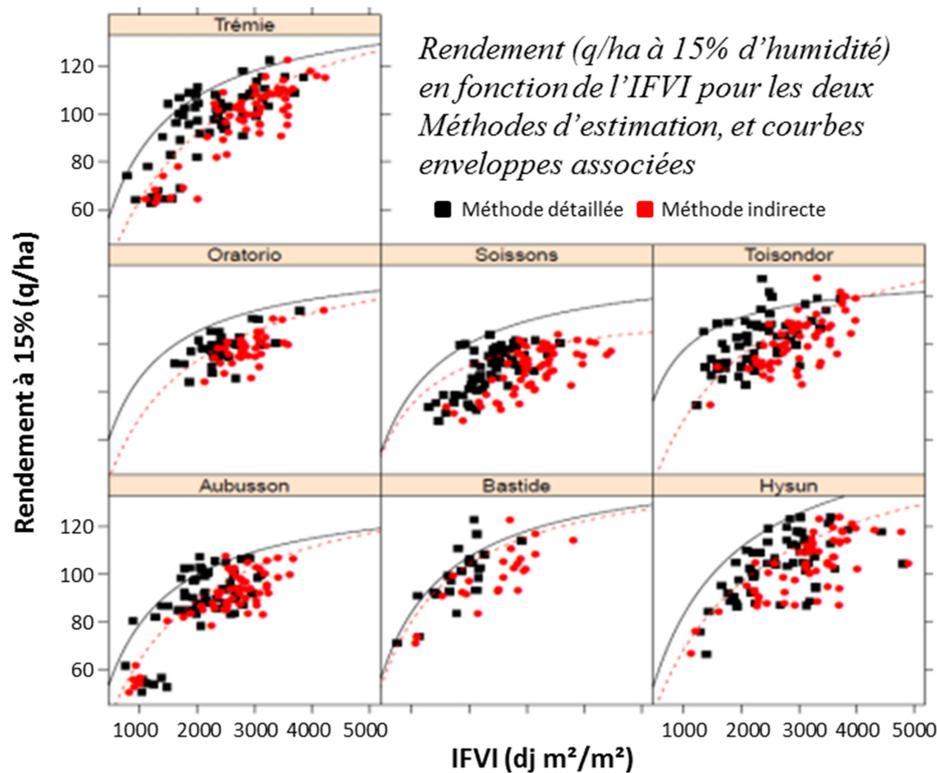


Comparaison entre calcul de l'IFVI selon la méthode détaillée à l'échelle des feuilles et selon la méthode indirecte à l'échelle du couvert

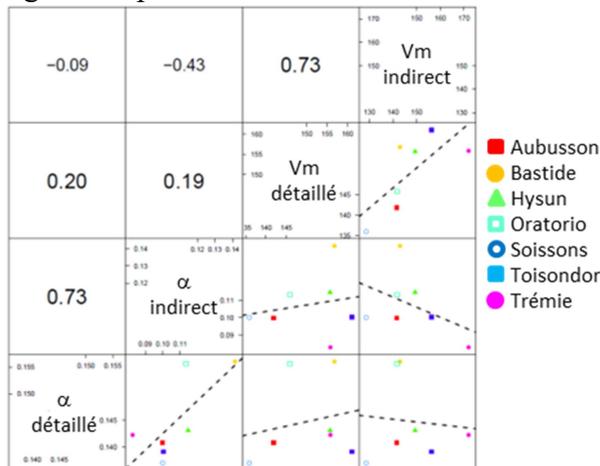
De fait, l'estimation de l'évolution de la surface verte par ajustement d'une courbe de Gompertz est rendu plus complexe, car il reste souvent une surface verte résiduelle correspondant aux épis, qui sénescent plus tard en cas de maladie. Il est donc impératif de bien positionner une dernière photo suffisamment tard dans le cycle, afin que celle-ci permette d'estimer la part de surface verte due aux épis. L'ajustement des courbes de surface verte aux données photos nécessite de faire certaines hypothèses pour gérer le fait que la dernière mesure n'est pas égale à zéro. Les résultats que nous avons présenté jusqu'à maintenant ont été obtenus en forçant un ajustement dont le plancher est égal à zéro

b) Comparaison des classements variétaux obtenus avec les IFVI approchés pour les différentes méthodes de comparaison variétale

La figure ci-dessous représente les points et les courbes-enveloppes obtenues suivant les 2 méthodes de mesure de l'IFVI. On observe assez clairement que les formes des courbes ne varient pas de la même façon suivant les variétés entre les 2 méthodes. Autrement dit, les paramètres ainsi estimés sont mal corrélés entre les 2 méthodes.



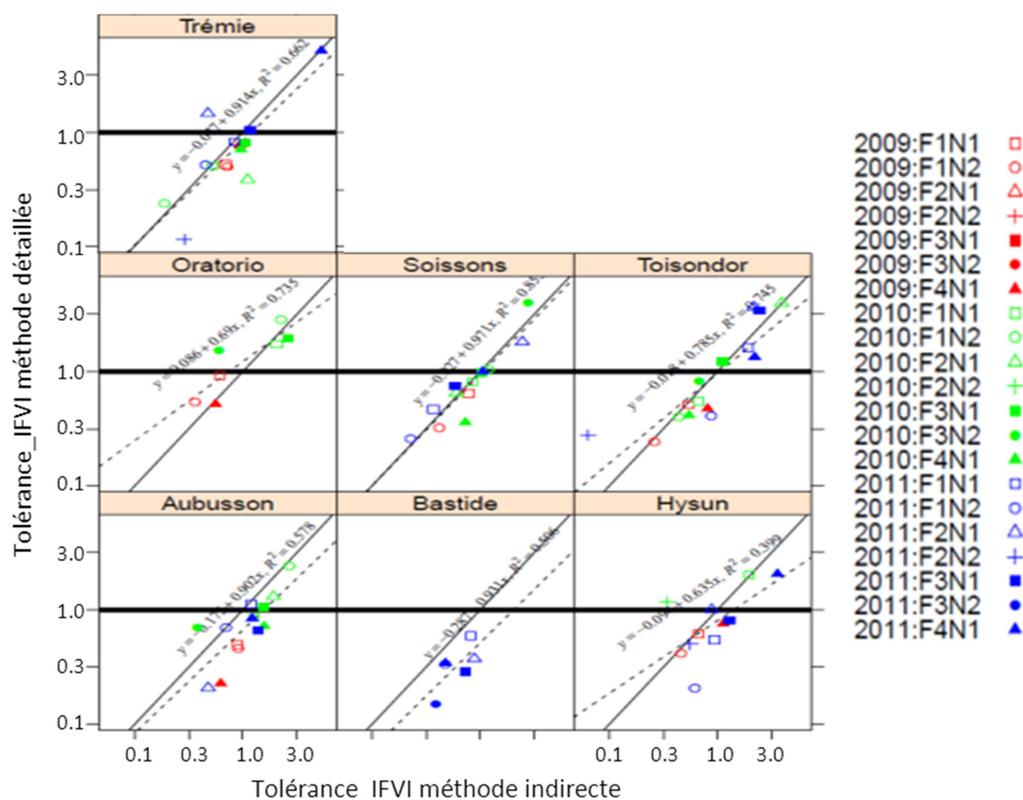
Les paramètres obtenus par modèle mixte sont mieux corrélés entre eux, comme l'indique la figure ci-après :



Graphique des corrélations entre les paramètres des relations IFVI – rendement obtenues avec les 2 types de mesure d'IFVI. Données Arvalis sans Bastide mal estimée

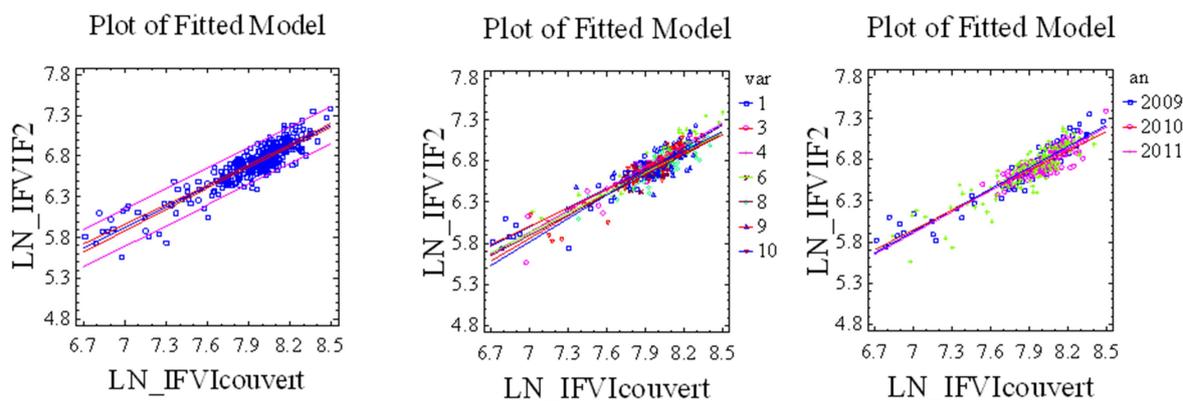
Malgré ces corrélations apparemment plutôt bonnes, l'observation détaillée des points montre que le classement des variétés sur chaque paramètre obtenu entre les deux méthodes est assez différent. Plus important encore, la précision de l'estimation des paramètres avec la méthode indirecte ne permet pas de mettre en évidence de différences variétales significatives au seuil de 5%.

Pour la dernière approche, d'écart à la courbe enveloppe, nous avons figuré le critère de tolérance présenté sur les essais Arvalis et EGC (partie 2c) estimé par les deux méthodes. Nous avons ôté les quelques valeurs négatives, correspondant à des modalités où le rendement était supérieur à celui de la modalité de référence censée avoir obtenu le rendement le plus élevé. On observe que les estimations de ce critère de tolérance sont fortes



Tolérance au changement d'ITK par rapport à la référence F4N2. Relation entre l'indice de tolérance (cf. partie 2c) calculée avec les données d'IFVI calculées selon les méthodes détaillée ou indirecte.

En perspective on peut espérer une amélioration de la corrélation entre méthodes d'estimation de l'IFVI par un passage aux logarithmes. On minimise ainsi le poids des fortes valeurs d'IFVI où l'effet de la méthode semble le plus marqué, alors qu'une imprécision aurait peu d'impact sur la corrélation au rendement. Etonnement (Figure ci-dessous A), c'est avec $\ln(\text{IFVI_F2})$ que corrèle le mieux le $\ln(\text{IFVI_indirect})$: 82% de la variabilité de l'IFVI_F2 étant alors pris en compte par la mesure indirecte à l'échelle du couvert. Si un léger effet variétal subsiste (B), l'effet année est complètement gommé (C).



Ce résultat demande à être confirmé sur une large gamme de site, variétés et ITK, mais permettrait une deuxième amélioration de l'utilisation des mesures non destructives à l'échelle du couvert.

c) Conclusions

La simplification de la mesure d'IFVI semble possible, mais demande à être améliorée. La simplification consistant à ne considérer que la strate F2 apparaît comme la plus fiable. Cette approche, bien que moins chronophage que la mesure de toutes les strates, reste lourde car elle nécessite des prélèvements et le passage d'un ou plusieurs opérateurs dans chaque parcelle pour réaliser les observations. A contrario, l'approche indirecte peut préfigurer un système automatisé à plus haut débit. Pour le moment, malgré des corrélations plutôt bonnes, la précision semble encore insuffisante. L'amélioration de la mesure initiale de LAI est une voie importante pour envisager d'améliorer le calcul de l'IFVI. Ensuite, il est primordial de continuer à mesurer la surface verte suffisamment tard pour appréhender la part de la strate épis dans la surface verte. Enfin, on peut espérer à terme que des informations issues de capteurs plus sophistiqués, en particulier radiométriques, pourraient apporter une précision supplémentaire au suivi des surfaces vertes.

IV) Discussion générale et conclusions

1) Rappel des principaux résultats

- Une méthode de simulation de couverts virtuels crédibles, basés sur l'analyse des données expérimentales obtenues, a permis de démontrer le rôle du LAI maximal comme trait de tolérance et d'évaluer sa stabilité.
- La méthode en question peut être étendue à d'autres traits, et pourrait fournir un simulateur technico-économique simple et intéressant.
- La mise en évidence de différences variétales avec la relation $IFVI \times \text{rendement}$ peut être obtenue avec une approche de type modèle mixte, dont le principe consiste à ajuster une courbe par variété et par essai. Pour cela, il est important d'obtenir de larges gammes de variation d'IFVI au sein de chaque essai, et de s'assurer que ces variations d'IFVI sont bien à l'origine d'une part importante des variations de rendement. Il faut également veiller à disposer d'essais dans lesquels le tronc commun de variétés soit le plus grand possible.
- Les méthodes de mesure indirectes sont à améliorer, en s'appuyant sur de nouveaux outils de mesure améliorés, pour le LAI par exemple, mais aussi en veillant à ce que le protocole de mesure soit scrupuleusement respecté. Il faudra néanmoins valider que dans ces nouvelles conditions, on arrive bien à mettre en évidence des différences variétales.

2) Perspectives

Ce projet à consister à tester une hypothèse physiologique simple, qui attribue les pertes de rendement dues à plusieurs stress différents, en particulier maladies foliaires et stress azoté de fin de cycle, à une perte de surface verte. Le raisonnement écophysiologique sur lequel s'appuie cette hypothèse a pu être retranscrite sous la forme d'un modèle au formalisme simple, alimenté par des données expérimentales acquises à dessein. Ce modèle permet ensuite d'élaborer des conclusions robustes sur la valeur des traits ciblés. Cette approche nous semble pouvoir être étendue à de nombreux travaux sur l'amélioration de l'élaboration du rendement du blé.

L'acquisition de ce type de données est coûteuse en temps et en ressources humaines. Les tests que nous avons effectués pour simplifier cette acquisition de données sont à poursuivre, mais nous semble poser de solides bases pour le développement d'approches plus haut débit.

V) Annexes

1) Communications réalisées

Écrites :

M-O Bancal, P Bancal, R Ben Slimane, P Gate, D Gouache. 2009. Tolérance du blé à la septoriose. In 9ème Conférence internationale sur les maladies des plantes. Tours (France): AFPP

GOUACHE D, BANCAL M.O., BANCAL P., BEN SLIMANE R. 2010. Septoria tritici : une première approche de la tolérance aux stress de fin de cycle. Perspectives Agricoles n°370

BANCAL P., GOUACHE D., SOULARD T., BANCAL M.O. 2010. A general cultivar tolerance to stresses and its modeling in the case of wheat affected by STB (Septoria tritici). AGRO 2010 (European Society for Agronomy Conference 29 aout – 3 septembre 2010 – Montpellier, France

Bancal M.O., Bancal P., Bingham IJ., Foulkes J., Gouache D., Ney B., Paveley N., Smith J. 2012. Crop Architecture and Crop tolerance to biotic stresses - Mechanisms to limit crop losses. Epidemiology and Canopy Architecture Conference. Rennes. 1-5 July 2012

Bancal M.O., Bancal P., Bingham IJ., Foulkes J., Gouache D., Ney B., Paveley N., Smith J. *soumis*. Crop Architecture and Crop tolerance to biotic stresses - Mechanisms to limit crop losses. European Journal of Plant Pathology

Envisagée : une publication basée sur l'approche couplée modélisation – expérimentation reprenant la 1^{ère} section des résultats.

Orales :

Présentation du projet au groupe Céréales à Paille du Département Génétique & Amélioration des Plantes de l'INRA le 16/09/2008

Présentation des 1^{ers} résultats du projet lors de la réunion organisée entre Arvalis et la section céréales à paille de l'AFS (Association Française des Sélectionneurs) le 3 mai 2010 à Boigneville : « Approches écophysiologicals de la plante stressée/malade & perspectives pour l'amélioration variétale »

Présentation interne Arvalis lors des journées « Restitution de projets de recherche » du 13/12/2011

Envisagée : restitution au réseau Blés rustiques des travaux du projet

2) Mémoires encadrés

Yves Le Marchand de St Priest. Etude des facteurs de tolérance variétale chez le blé tendre, dans un contexte de culture à faibles intrants. 2009. Arvalis

(autres stages Arvalis : Adrien Richard – bac+4, 6 mois ; Charlotte Carn – bac+4, 3 mois ; Cyril Bigot – bac+4, 3 mois)

Marion Viguier. Caractérisation du comportement variétal face aux stress azotés chez le blé tendre (*Triticum aestivum*). 2009. INRA EGC

Marion Penon. Caractérisation globale de la tolérance variétale du blé tendre d'hiver aux stress biotiques et abiotiques. 2009. Lasalle-Beauvais

stage bac+4 : Anthony Gérard. Indice foliaire vert intégré (IFVI) et mesure de la tolérance à la septoriose d'une gamme variétale de blé tendre croisée par trois itinéraires techniques. 2009. INRA APBV

Description succincte de la base de données

Description des fichiers de la base de données :

- Chaque fichier "Donnée + nom de la station" est composé de 9 feuilles Excel communes

La feuille 'Pb'	est une description générale de l'essai, avec un relevé des principales difficultés rencontrées
La feuille 'Climat'	présente des données climatiques quotidiennes (température, éclairement, précipitation) pour les années complètes
les lignes sont identiques pour les feuilles suivantes: elles représentent chaque essai (classés selon Année/ITK/Génotype/Répétition)	
La feuille 'ITK'	rappelle les dates de stade et d'interventions, ainsi que les doses d'engrais azoté
La feuille 'Phytos'	rappelle les dates de de traitements fongicide et propose deux calculs d'IFT
La feuille 'Agronomie'	présente trois groupes de données: état vers la floraison; données de Rendement; état à la récolte
La feuille 'Feuilles'	permet le calcul du LAI global ou par strate. Les mesures par Licor et/ou planimétrie sont dans des colonnes distinctes
La feuille 'Notations Septo'	présente des données de sénescence au niveau feuille sans distinguer les notations Darles des mesures par scanner
La feuille 'Photos'	présente le résultat des analyses de photos verticales du couvert
La feuille 'Paramètres'	présente les résultats des ajustements Gompertz des 2 feuilles précédentes, avec les calculs d'IFVI correspondants
La feuille 'aPAR'	n'est présente que lorsque les calculs ont été faits (EGC et Arvalis); organisée comme les précédentes, elle présente des calculs d'absorption

NB: les ajustements Gompertz, les calculs d'IFVI et d'absorption du PAR sont faits grâce à des fichiers complémentaires dont un modèle est présenté à part

- Code couleur: la plupart des données sont en police noire sur fond blanc, **en police bleue lorsqu'elles sont calculées à partir d'autre données de la même feuille**

Les unités en tête de colonne sont présentées sur fond bleu

Les données manquantes sont indiquées sur fond gris.

Lorsqu'une valeur a été reconstituée, elle est en police rouge

Les données aberrantes (ou paramètres forcés dans le cas d'un ajustement) sont indiquées sur fond jaune.

Lorsqu'une valeur a été reconstituée, elle est en police rouge

Les données communes aux trois blocs sont indiquées sur fond vert

Annexe 4

Protocole type des essais « détaillés »



Service Conduites et Systèmes de Cultures

Version 1.5 du 28/04/2010

DIAGNOSTIC DES STRESS BIOTIQUES ET ABIOTIQUES

Protocole 17TPMOD STRESS Action 1

Responsables de protocole : Philippe GATE et David GOUACHE

Code Action : T02 R 17

Rappel des objectifs :

- Mettre en œuvre des observations et outils diagnostiques capables de prendre en charge les effets des stress biotiques et abiotiques sur la croissance, l'élaboration du rendement et de la qualité.
- Quantifier les pénalités engendrées par certains facteurs limitants ou conduites sub-optimales ;
- Identifier les stratégies en conduites sub-optimales permettant de minimiser les préjudices ;
- Identifier les mécanismes et les caractéristiques variétales à la base d'une meilleure tolérance ou maximisant l'échappement.

THEME DE L'ETUDE

On dispose actuellement d'un certain nombre de moyens de contrôle de l'état d'une culture et du milieu (sol et climat) permettant de suivre la culture et d'établir un diagnostic et un pronostic de la culture.

Récemment, l'IFVert intégré au cours du remplissage a été construit pour rendre compte des pénalités engendrées par des stress abiotiques (sécheresse, carence en azote) ou biotiques (maladies foliaires).

En complément d'autres mesures permettent d'enrichir le diagnostic, notamment vis-à-vis de l'absorption et du transfert d'azote, et vis-à-vis de la fertilité des épis et du remplissage des grains.

L'ensemble de ces outils est en œuvre sur la base d'un dispositif expérimental mettant en jeu des conduites de référence et des conduites sub-optimales, menées sur des cultivars à comportement différenciés (tolérance, mode d'élaboration du rendement).

Les résultats de ces essais doivent contribuer à la conception d'ITK en conditions sub-optimales maximisant la marge.

OBJECTIFS DE L'ESSAI

- Contribuer à la conception d'ITK innovants, en conditions sub-optimales, maximisant la tolérance, l'échappement.
- Mettre au point une méthode de caractérisation des variétés « rustiques ».

LIEUX DES ESSAIS

La Minière et Grignon (78) ; Beauvais (60).

Le présent protocole présente les modalités effectuées sur le site de La Minière, les autres sites étant une déclinaison de celui-ci.

FACTEURS ETUDIÉS

Variétés :

Soissons, Trémie, Toisondor, Hysun, Bastide et Aubusson

Protection contre les maladies

		Modalités facteur fongicide			
		F1	F2	F3	F4
Applications	T0 : protection racinaire	type Unix	type Unix	type Unix	type Unix
	T1 : protection foliaire à 2N	0	X	0	X
	T2 : protection foliaire à DFE	0	0	X	X
	T3 : protection feuille & épi	0	X	X	X

Dose d'azote

Modalités pour le facteur azote		Fractionnement		
Nom	Dose totale	Tallage (possibilité d'impasse)	Z30	Z39 dose modulable selon diagnostic azote
N1	X - 60	Y	X - Y - 100	40
N2	X	Y	X - Y - 40	40

La dose X est la dose totale évaluée par le bilan prévisionnel. On mettra en œuvre un outil de diagnostic N (HNTester, sur la variété Soissons), afin de corriger éventuellement la dose totale. L'objectif est d'obtenir un écart de dose de 60 unités.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL - PARCELLES

3 répétitions (3 blocs)

Parcelles doublées pour mesures destructives

Les parcelles auront une superficie d'environ 35 m² (nécessaires pour réaliser les mesures) et seront réalisées soit par un passage de semoir grande culture 2 m x 18 m, soit par 2 passages de semoir Hégé 13 rangs sur environ 10 m de long. On exclura tout semis au semoir Oyjord 6 - 7 rangs.

Hiérarchie des facteurs :

Le facteur variété sera introduit en parcelle élémentaire, randomisé par niveau de protection avec le facteur N mis en sous bloc.

VARIABLES MESUREES

Reportez-vous au tableau joint

Stades :

Attention, tenir compte des différences entre variétés, densités de semis et doses d'azote. Déterminer en premier lieu le stade de la variété la plus précoce (Aubusson, Hysun, Trémie), implantée à la densité la plus élevée (et éventuellement la dose N la plus forte) ; ces facteurs anticipant la date du stade épi à 1 cm.

Les stades demandés impérativement sont la levée, épi 1 cm, épiaison et floraison.

Nombre de tiges à + de 3 feuilles

Comptages à effectuer au stade épi à 1 cm.

Matière sèche et teneur en N à la floraison et à la maturité :

A Floraison :

Attention, nouveauté : on demande une quantification par organe en tenant compte du rang de la feuille (jusqu'à la F4 pour la floraison) en plus de la biomasse classique.

Au cours de cette mesure, effectuer aussi la longueur des entrenœuds sur un sous échantillon de 20 tiges issues du prélèvement pour la biomasse par organe.

A maturité :

Biomasse et teneur en azote sur grains et pailles + nombre d'épis/m²

Indice foliaire à la floraison, puis suivi au cours du remplissage

A la floraison, indice foliaire total calculé par le LICOR + Longueur/largeur et sénescence des feuilles effectués manuellement **ou** à l'aide d'un scanner

Suivi du Remplissage du grain :

Procéder par la méthode des épis entiers en prélevant par date 3 séries de 50 épis consécutifs. Les prélèvements ont effectués à des sommes de T°C depuis le stade épiaison (Z 55). Arrêter les mesures à la maturité physiologique terminée, soit **800 °Cj** après épiaison.

A la maturité, constituer un échantillon moyen d'environ 300g pour une analyse d'azote (méthode Dumas).

Diagnostic de la fertilité des épis

Comptages à faire à la maturité sur 3 séries de 5 épis par parcelle.

Comptage d'épillets et de fleurs totales et fertiles sur 3 rangs d'épillets de l'épi.

Rendement et composantes :

Procéder à un comptage épis à la maturité (ou un peu avant) sur la parcelle destinée à la récolte.

Procéder ensuite à une récolte machine en excluant 2 rangs latéraux de bordure.

Etablir un poids de 1000 grains. Dans le cas d'un Repères et de Farmstar, faire un comptage à la floraison et, si possible, à la maturité.

Pour les autres situations, le comptage est réalisé à la maturité

Notations maladies, notamment Septoriose

Etablir un suivi sur feuille en adoptant la méthode préconisée.

❑ **verse, ravageurs :**

En présence de verse, noter impérativement la date de la verse (indispensable pour estimer son effet sur le PMG).

❑ **Sur le sol :**

Analyse granulométrique (sur l'essai ou sol identique)

Reliquats azotés sortie hiver.

CONDUITE DE L'ESSAI

Assurer une protection complète contre les parasites et les adventices. Se reporter aux modalités pour les apports d'azote et la protection fongicide.

EXPLOITATIONS DES RESULTATS

Saisie progressive des données sur Silena tout au long de la campagne.

Graphiques à insérer dans le dossier d'essai Silena :

- Nombre de tiges/m² en fonction du nombre de plantes/m²
- Nombre d'épis/m² en fonction du nombre de tiges/m²
- Nombre de grains/épi en fonction du nombre d'épis/m²
- Rendement en fonction du nombre de grains/m²
- Evolution de l'accumulation de la matière sèche dans le grain (PMG), de la quantité d'azote accumulée dans les grains (QN en kg/ha) en fonction des degrés jours cumulés depuis le stade épiaison.
- Evolution de l'IFVert intégré en fonction des degrés jours depuis l'épiaison
- Relation entre QN grains et QN Floraison. (appréciation des transferts vers le grain)
- Relation entre QN Floraison et QN parties aériennes récolte (appréciation de l'absorption post floraison).

variables mesurées dans un 17TPMOD STRESS
version 3 du 28/04/2010

STADE	MESURE	MODE OPERATOIRE	ECHANTILLON
Semis	Etat du lit de semence		
Levée	Date du stade Densité	MO 182 MO 184	visuelle, à la parcelle 3 placettes *(2*1) ml , sur 3 blocs (sur parcelles non traitées, parcelle doublée)
Plein tallage - fin tallage	Suivi symptômes septo et sénescence	MO Suivi Septo et sénescence	10 tiges par parcelle (1 seule notation : celles-ci n'ont pas besoin d'être baguées) : Soissons et Trémie uniquement
Epi 1 cm	Reliquats N Hauteur de l'épi à une date Nombre de tiges à plus de 3 feuilles	MO 8 MO 182 MO 183	valeur moyenne sur la parcelle 20 plantes sur 1 bloc 3 séries * 20 plantes * parcelle élémentaire, sur 3 blocs
1N - gonflement	Suivi symptômes septo et sénescence Suivi émission foliaire	MO Suivi Septo et sénescence MO Suivi Septo et sénescence + MO 141	10 tiges (baguées) par parcelle Sur les mêmes tiges que MO Suivi Septo et senescence
Epiaison	Date du stade	MO 182	visuelle, à la parcelle
Floraison	Surfaces foliaires LICOR Date du stade Biomasse et teneur en azote (avec séparation en tiges, épis, feuilles pour certaines parcelles) Longueur entrenœuds	MO Surfaces foliaires & MO 997 (biomasse) MO LICOR MO 182 MO 185 & 997	20 tiges par placette biomasse (soit 60 par parcelle élémentaire) manuellement ou par scanner 4 répétitions par parcelle élémentaire visuelle, à la parcelle 3 placettes par parcelle lignes consécutives sur 1 m linéaire pour un semis de 0,15 à 0,20 m d'écartement lignes pour un semis de 0,08 à 0,12 m d'écartement NOUVEAU : séparer les feuilles, les tiges et les épis sur 10 tiges/placette Sur un sous échantillon de 20 tiges issu du prélèvement pour la biomasse par organe mesurer les distances col épi -->F1, col épi -->F2, col épi -->F3 et col épi -->F4
Epiaison - fin remplissage	Suivi symptômes septo et sénescence ou Suivi surfaces vertes appareil photo	MO Suivi Septo et sénescence ou MO appareil photo	10 tiges (baguées) par parcelle et 2 photos/parcelle
Remplissage	Diagnostic de fertilité des épis Remplissage des grains	MO 998 fertilité_épis MO 189	3 séries de 5 épis/parcelle 3 séries de 50 épis/parcelle à 3 périodes
Récolte	Date de récolte pmg machine Humidité du grain Rendement machine Nombre d'épis (comptage en place ou prélèvement) Teneur en protéine ou teneur en azote grain Teneur en azote paille Rapport grain/paille Note de verse	MO 187 + MO 31 MO 190 + MO 31 MO 184 MO 185 MO 185 MO 185 MO 192	par parcelle par parcelle sur parcelle doublée destinée à cette mesure par parcelle par parcelle par parcelle 3 placettes par parcelle ; 2 lignes consécutives sur 1 m linéaire pour un semis de 0,15 à 0,20 m d'écartement ; 4 lignes pour un semis de 0,08 à 0,12 m d'écartement par parcelle

Autres		Trémie				Soissons										
N2		N1		N2		N1		N2		N1						
F4	F3	F2	F1	F3	F2	F1	F4	F3	F2	F1	F4	F3	F2	F1		
X				X			X				X				Date levée	Levée
X				X			X				X				Nombre de plantes levées / m2	2-3F
X			X				X				X			Reliquat N sol		
														X	Suivi Symptômes Septo et Sénescence	Plein tallage - Fin tallage
X				X			X				X				Nombre de plantes sortie hiver / m2 *	Epi 1cm
X			X				X				X			date et hauteur de l'épi dans la tige		
X			X				X				X			Nb de tiges à plus de 3 feuilles (NT3F)		
				X			X				X			X	Suivi émission des feuilles	1 noué - Confluent : 3 notations
			X				X				X			X	Notations visuelles symptômes et sénescence par étage foliaire	
				X			X				X			X	Date	Epiaison
X				X			X				X			X	Date	Floraison
X				X			X				X			X	Biomasse et teneur en azote	
X				X			X				X			X	LICOR	
X				X			X				X			X	Surfaces foliaires	
X				X			X				X			X	Longueur des entrenœuds	
X				X			X				X			X	Biomasse et teneur en azote (séparer feuilles, tiges, épis)	
X				X			X				X			X	Notations visuelles symptômes et sénescence par étage foliaire	Epiaison - fin remplissage : 4 notations
X				X			X				X			X	Suivis surface verte par appareil photo	
				X			X				X			X	Date du prélèvement	Remplissage : 255+500-550°C ; +650-700°C ; +800°C
				X			X				X			X	Nb d'épis de l'échantillon	
				X			X				X			X	Poids frais de l'échantillon	
				X			X				X			X	Poids sec de l'échantillon	
				X			X				X			X	Nb de grains de l'échantillon	
				X			X				X			X	Poids des grains de l'échantillon	
				X			X				X			X	teneur en azote des grains (N Dumas)	
				X			X				X			X	PMG 0%	
X				X			X				X			X	diagnostic fertilité épis	Méthode
X				X			X				X			X	verse, avec la date de notation	Récolte
X				X			X				X			X	Date de récolte	
X				X			X				X			X	Humidité du grain à la récolte	
X				X			X				X			X	rendement à 15%	
X				X			X				X			X	Nombre d'épis/m2	
X				X			X				X			X	PMG à 15%	
X				X			X				X			X	teneur en N grains (N Dumas)	
X				X			X				X			X	teneur en N pailles (N Dumas)	
X				X			X				X			X	rapport grains/paille	

* seulement si gel hivernal

(1) : une mesure afin de contrôler la qualité de la prise de vue

Annexe 5

Protocole type des essais « Blés rustiques »

Protocole 2009-2010	Indice foliaire vert intégré (IFVI) et mesure de la tolérance à la septoriose d'une gamme variétale de blé tendre croisée par trois itinéraires techniques	INRA UMR Biotechnologies Végétales et Amélioration des Plantes de Rennes Le Rheu Ploudaniel
		Version N° 1.3 Émis le 15/02/2010 Dernière modification le 17 mars 2010
Rédigé par Antony Gérard, David Gouache, Jean-Yves Morlais et Bernard Rolland <i>revu par P. Bertin et D. Gouache</i>		

Protocole IFVI 2009-2010 appliqué sur l'essai rendement « screening ITK variétés rustiques de blé tendre » dans les sites INRA de Dijon, Lusignan, Le Moulon et Rennes

Objectif de l'étude

- Valider sur un grand nombre de couples variété x conduite et plusieurs lieu x année une méthode de suivi de la sénescence de la biomasse foliaire en présence de stress biotique, notamment la septoriose
- Identifier les variétés rustiques adaptées à des conduites économes en intrants chimiques

Dispositif expérimental

4 essais rendement « screening ITK blés rustiques » Ces essais comportent 24 variétés croisées par trois itinéraires techniques (raisonné (ITK2), intégré (ITK3) et extensif (ITK4) dans un dispositif expérimental de microparcelles (6 à 10 m²) en split plot (annexe 2). Soit un total de 216 microparcelles.

Chaque couple « variété x itinéraire technique » est répété trois fois dans le même champ. La date de semis est moyenne. Pas de semis précoce, par exemple dans le quart nord ouest de la France, pas avant dernière semaine d'octobre.

	ITK	semis	N	N (passages)	régulateur	fongicide
ITK2	raisonné	Normal (250 p/m ²)	bilan	3	1	2
ITK3	intégré	60% ITK2 (150 p/m ²)	ITK2 -30u	2	0	1
ITK4	extensif	60% ITK2 (150 p/m ²)	ITK2 -60u	2	0	0

Les apports d'azote se font au tallage à la montaison et à l'épiaison dans le cas de la conduite intensive (ITK2), à la montaison et à l'épiaison (ITK3), à l'épiaison (ITK4). On applique un

ou deux traitements herbicides sur tout l'essai. On appliquera un insecticide sur l'ensemble de l'essai uniquement si cela s'avère absolument nécessaire. Seul l'ITK2 recevra un régulateur de croissance. Les fongicides sont dégressifs : 2, 1, 0.

Notations et mesures

➤ Notation des stades végétatifs : épiaison, floraison, maturité physiologique

- Epiaison (Z55): jour où 50% des épis des tiges de la parcelle sont à moitié sorties des gaines foliaires (un épi est épié si la moitié de l'épi se situe au-dessus du niveau de la ligule de la dernière feuille).

- Floraison : jour où 50% des anthères se trouvent hors des glumelles sur 50% des épis.

- Maturité physiologique : col d'épi jaune sur 50% des tiges

➤ Mesure de l'indice foliaire (IF) ou LAI (Leaf Area Index) à épiaison avec LICOR

L'indice foliaire (IF) ou LAI (Leaf Area Index) est le rapport de la surface de feuilles (en m²) sur la surface de sol (en m²). La mesure LICOR sert à fixer la valeur absolue d'indice foliaire, car ensuite les photos verticales ne donnent que la proportion de vert. Or, ce qui nous intéresse c'est la valeur absolue.

Le LI-COR (LAI 2000) est un appareil qui permet de mesurer l'indice foliaire. Il possède une lentille captant le rayonnement lumineux et il est utilisable pour estimer le LAI lorsque la végétation est suffisamment haute, c'est-à-dire pour le blé, à partir du stade deux nœuds environ (Z31). Une mesure est d'abord réalisée au-dessus du couvert, puis quatre mesures au niveau du sol (deux au niveau de l'inter rang et deux contre les rangs), ce qui permet à l'appareil de calculer le rayonnement transmis par le couvert végétal (quantité de rayonnement qui passe sous le couvert). Cette opération est répétée quatre fois sur chaque parcelle et l'appareil calcule alors le LAI. La machine restitue notamment une mesure moyenne et un écart type suite aux 4 prises de mesure : ce sont ces 2 éléments qui nous intéressent.

La mesure sur une végétation sèche demande des conditions météorologiques sans vent, ni pluie, temps clair ou nuageux admis si conditions stables pendant la mesure. Comme le LAI est relativement stable autour de l'épiaison, il est possible de réaliser cette mesure à plus ou moins trois jours autour de ce stade afin de grouper un maximum de variétés. Pour l'expérimentation 2009-2010 la mesure se fera + ou - 3 jours autour de l'épiaison de Caphorn.

Les photographies sont prises au-dessus de chacune des parcelles (2 ou 3 répétitions pour chacune d'entre elles), si possible par temps couvert et sans vent, éviter les jours de grand soleil, avec l'appareil photo numérique fixé sur une potence. La potence (fabriquée par Arvalis Boigneville) est munie d'un niveau à bulle, de manière à ce que l'appareil soit bien parallèle à la surface de la parcelle. Il doit être positionné au pied de chaque jalon (deux en bordure latérale de la parcelle) qui marque l'emplacement de la prise de vue.

L'appareil photo doit être placé à une distance d'environ 1 mètre de la surface de la végétation, avec une distance focale permettant d'avoir une photo de taille suffisante pour un échantillonnage représentatif. C'est-à-dire que chaque photo couvre au sol un rectangle d'environ 30cm x 40cm. Un angle α est de 10° , pour assurer une visée verticale (annexe 3). Les photographies sont prises aux stades épiaison (Z55), épiaison +250 dj, épiaison +500 dj, épiaison +750 dj. Les valeurs sont données à titre indicatif, l'important est d'avoir 4 points de mesure.

n°	variété	zone	caractéristiques	obteneur/délégué
1	Atlass	N et C	témoin	Sem Partners
2	Caphorn	N et C	témoin	Desprez
3	Garcia (s)	C	témoin	Secobra
4	Premio	N et C	témoin	R2N
5	Trapez (s)	N	témoin	Unisigma
6	Caph+Tra+Pre+At	N et C	témoin	
7	Aldric	C	tronc commun	Desprez
8	Altigo	C	tronc commun	Nickerson
9	Arezzo	C	tronc commun	R2N
10	Barok	N	tronc commun	INRA
11	Bermude	N	tronc commun	Desprez
12	Boregar	N	tronc commun	Serasem
13	Goncourt	N et C	tronc commun	Serasem
14	Hystar	N et C	tronc commun	Saaten Union
15	Koreli	N	tronc commun	INRA
16	Oakley	N	tronc commun	Momont
17	Rustic	C	tronc commun	Momont
18	Oxebo SCHW378-98 H11	N	tronc commun	Lemaire
19	Solehio	C	tronc commun	Momont
20	Aligator UN 3139-13	N et C	tronc commun	Unisigma
21	AO07119			AO
22	CF04119			INRA
23	DI08013			INRA
24	RE05043			INRA

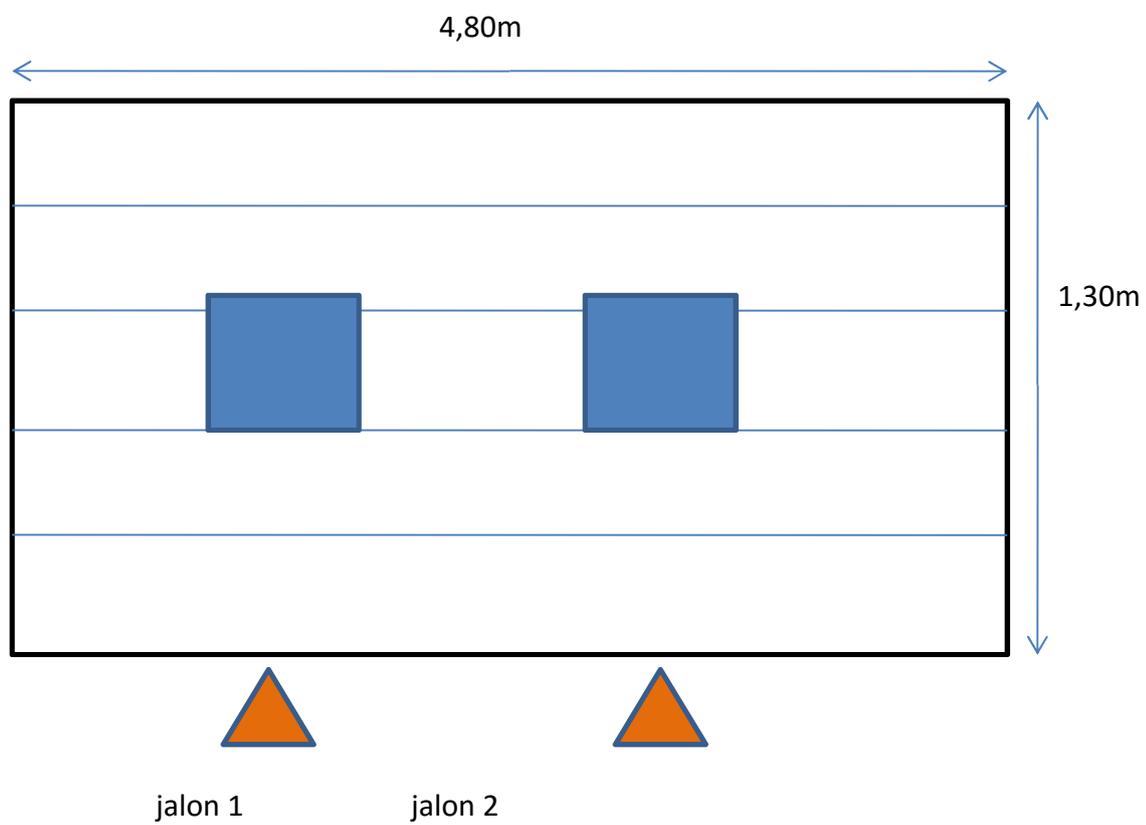
➤ **Suivi de sénescence par photographies numériques à différents stades (IFVI).**

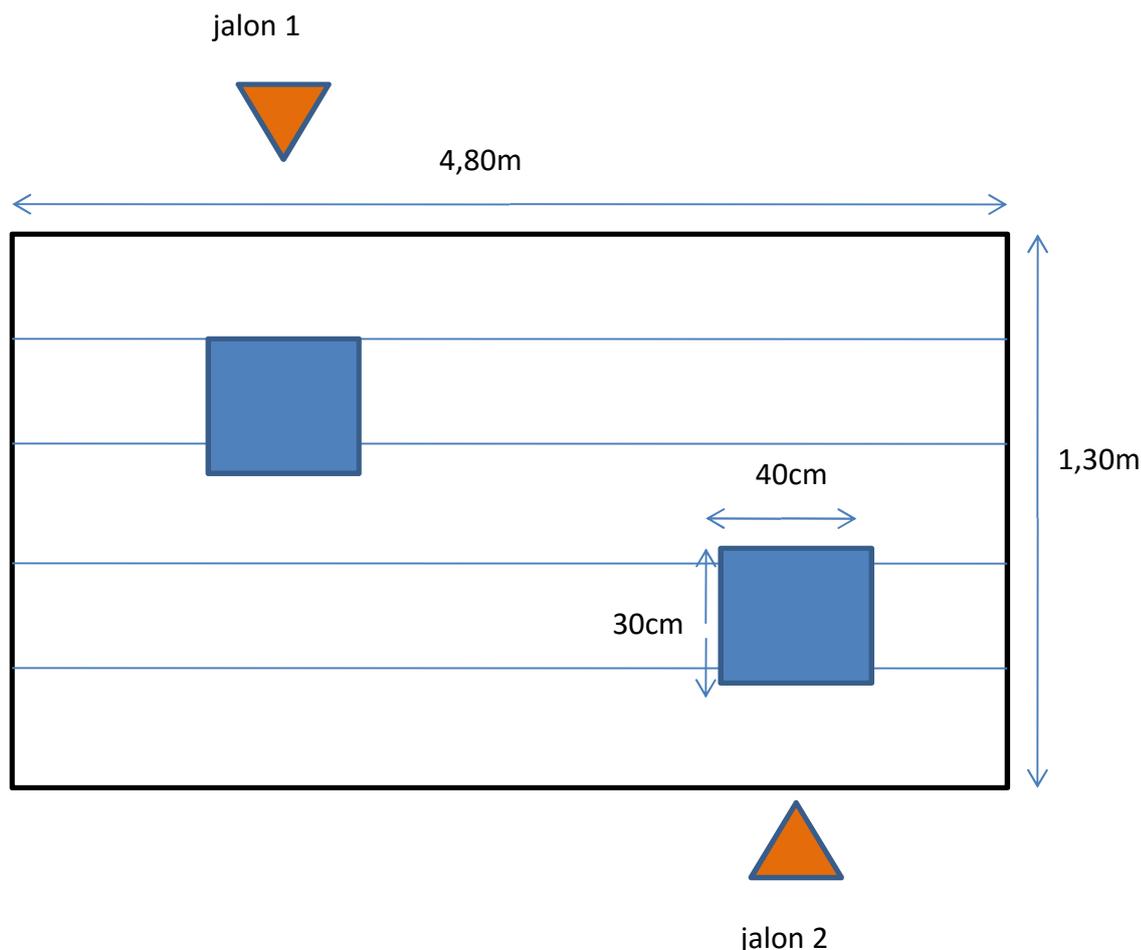
Matériel photo d'une valeur de 698.15 € TTC :

- un Canon EOS-450D-1855 + objectif E-S 18-55 mm 1 :3-5.5,6 IS
- une télécommande infra rouge
- une batterie de rechange LP-E5 pour reflex numérique Canon EOS Canon 450D et 1000D
- une carte mémoire de rechange Sandisk-SD-ultra2-4Go-HC classe 4
- une vis pour fixer l'appareil au support

- une plaque témoin

Positions des deux jalons





➤ **Notations de la sensibilité des variétés aux maladies du feuillage (rouille brune et jaune, septoriose) et au piétin-verse.**

Pour les maladies ayant un développement important, la **notation standard** de sensibilité est réalisée à la floraison et au stade grain laiteux, en indiquant les dates des notations et la nature de la maladie observée. Des notations antérieures à la floraison sont utiles si un développement de maladies précoce a lieu pendant la montaison (échelle de notation type GEVES, de 1 pas de symptômes à 9 feuillage grillé, voir en annexe 1). Pour des maladies peu développées, une seule notation suffit. On signale leur présence et on indique la date de l'observation. Si certaines maladies sont absentes (rouille jaune, oïdium, rouille brune...), le préciser.

La **notation « pointue »** se fait sur un sous échantillon de l'essai. On prend l'itinéraire avec le plus de contaminations (ITK4) et celui qui en a le moins (ITK2), pour 5 variétés témoins d'inégale sensibilité (Atlass, Caphorn, Garcia, Prémio, Trapez) mais de précocité assez proche. Le suivi visuel de sénescence se fait, ici, sur les quatre dernières feuilles, à la même date que la prise de vue photo, et sur 10 tiges baguées. Cette notation sera effectuée selon l'échelle de Darles (annexe 1, suite).

➤ **Rendement**

Mesurer toutes les répétitions et préciser à quel pourcentage d'humidité le rendement a été mesuré. Le PMG, le PS et la teneur en protéines (sur grains entiers à l'infra-analyseur) sont à réaliser sur toutes les répétitions. Pour les lieux dépourvus de NIRS les teneurs en protéines seront mesurées à Rennes.

➤ Mise en forme et analyse des données

Les photos seront être bien identifiées, parcelle par parcelle. Les fichiers type seront fournis par l'UMR APBV en mars. Les données (notations, mesures, photos) sur support CD ou clé USB seront expédiés par chaque expérimentateur à Benoit de Solan ou Claudine Albertalli pour être traitées.

(b.desolan@arvalisinstitutduvegetal.fr) (c.albertalli@arvalisinstitutduvegetal.fr)

Le traitement consiste à distinguer : le sol, les feuilles vertes, les feuilles sénescentes et les épis.

➤ Financement

Le programme IFVI est financé par le contrat de Branche « Tolérance aux stress » animé par D. Gouache (Arvalis) et le CASDAR PICOBLE animé par M. Valentin Morison (INRA Grignon) et X. Pinochet (CETIOM). La convention Contrat de Branche prévoit 2 versements, 2010 et 2011 d'un montant de 14 400 € TTC chacune (2 400€ fonctionnement + 12 000€ main d'œuvre). S'y ajoute une aide CASDAR de 10 000€ par an pendant 2 ans.

Soit 4 500 € par essai INRA et par an. (Tableau à venir avec calendrier de versement).

Sites 2010 : Rennes, Lusignan, Le Moulon, Dijon.

Achat d'un matériel photo Canon 450D d'une valeur d'environ 700€ et quelques accessoires (100€), à monter sur une potence (fabriquée gracieusement par Arvalis à Boigneville). Emprunter dans un laboratoire ami et voisin un LAI à l'épiaison (2 journées de mesures). Nécessité d'avoir un stagiaire ou une MOO pendant au moins 2 mois.

pour un essai de 216 microparcelles de 6,5m²

	datation du stade de développement	4 mesures/parcelle LAI avec le LAI 2000 (+/-3 jours autour épiaison Caphorn)	Suivi de sénescence par photographie numérique (pied potence sur jalon)	Suivi visuel de sénescence avec échelle de Darles (ITK 2 et ITK 4)	notations maladies (échelle GEVES de 1 à 9)
Epiaison (Z55)	1 heure x 3 passages	3 à 4 jours (prévoir un PC pour décharger le LAI 2000 sur place)	4 heures (pour 2 photos par microparcelle= 432)	3 heures (sur 10 tiges baguées) pour les 4 témoins	
E piaison + 250°C (Z61)			4 heures (2 photos par microparcelle= 432)	3 heures (sur 10 tiges baguées) pour les 4 témoins	
E piaison + 500°C (Z69)			4 heures (2 photos par microparcelle= 432)	3 heures (sur 10 tiges baguées) pour les 4 témoins	
E piaison + 750°C (Z72)			4 heures (2 photos par microparcelle= 432)	3 heures (sur 10 tiges baguées) pour les 4 témoins	2 heures
Floraison (Z65)	1 heure x 3 passages				2 heures
Stade laitex (Z75)					2 heures
Récolte (Z92)	rendement, taux d'humidité des grains, PMG, PS, teneur en protéines pour toutes les variétés				

+ temps de transfert, tri et mise en forme des données : 4 jours

Temps nécessaire aux interventions sur protocole IFVI D'après Anthony Gérard stagiaire M1 2009 UMR APBV INRA Rennes

Tableau récapitulatif des notations et mesures

Stades	Notations et mesures
Epiaison	<ul style="list-style-type: none"> - Noter la date du stade sur toutes les variétés et toutes les répétitions. - Mesure du LAI au LICOR (+/- 3 jours autour de l'épiaison de Caphorn). - Suivi de sénescence par la méthode IFVI (3 photos / parcelle soit 183 parcelles x 3 photos). - Suivi visuel de sénescence, notations classique (GEVES) et pointue selon l'échelle de Darles.
Epiaison	- Suivi de sénescence par la méthode IFVI (3 photos / parcelle).

+ 250 dj	- Suivi visuel de sénescence, notations classique (GEVES) et pointue selon l'échelle de Darles.
Epiaison + 500 dj	- Suivi de sénescence par la méthode IFVI (3 photos / parcelle). - Suivi visuel de sénescence (10 ou 20 tiges sur 2 ou 4 variétés) selon l'échelle de Darles.
Epiaison + 750 dj	- Suivi de sénescence par la méthode IFVI (3 photos / parcelle). - Suivi visuel de sénescence, notations classique (GEVES) et pointue selon l'échelle de Darles.
Floraison	- Notation de sensibilité aux maladies (GEVES) sur toutes les variétés et au piétin-verse (5 témoins).
Stade laiteux	- Notation de sensibilité aux maladies (GEVES) sur toutes les variétés
Maturité	Comptage d'épis sur 5 témoins
Récolte	- Mesures du rendement, du taux d'humidité des grains, du PMG, du PS, de la teneur en protéines sur toutes les variétés et toutes les répétitions.

Annexe 5.1

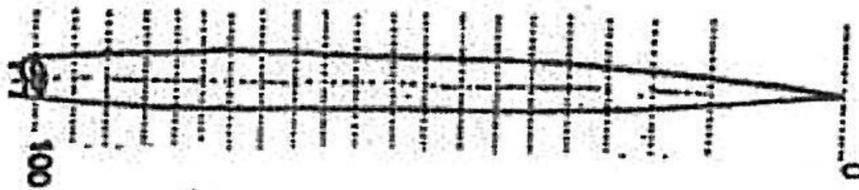
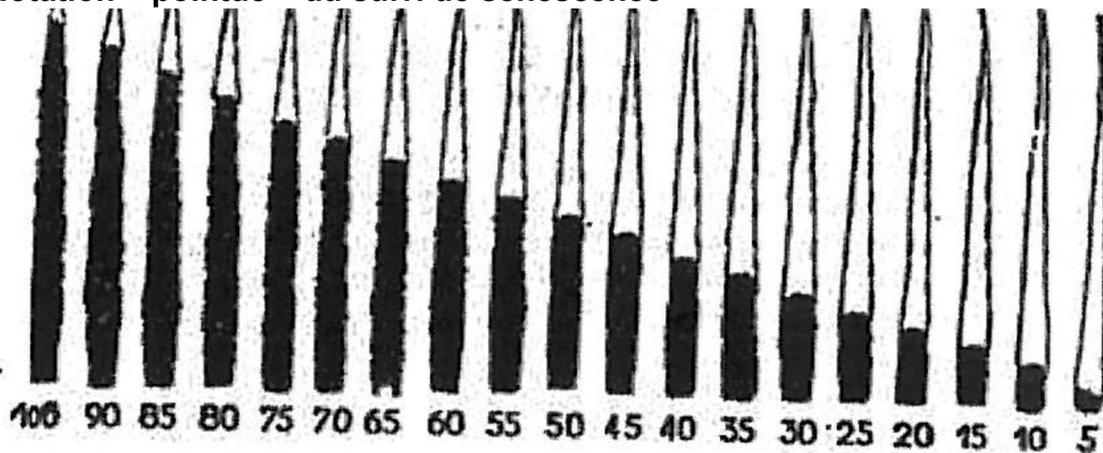
Notation classique du suivi de sénescence.

Pour les **maladies** (éventuellement froid), la note de 1 correspond à l'absence de dégât ou de maladie, et la note de 9 à une parcelle complètement détruite ou couverte par la maladie (feuillage entièrement nécrosé). Entre ces deux extrêmes, rapporter les notes à un pourcentage de destruction (de la parcelle ou du feuillage) :

1 : parcelle totalement saine	6 : 60-65% de destruction
2 : 10-15% de destruction	7 : 75% de destruction
3 : 25% de destruction	8 : 85-90% de destruction
4 : 35-40% de destruction	9 : 100% de la parcelle ou du feuillage détruits.
5 : 50% de destruction	

Pour la **verse**, il faut tenir compte à la fois de la surface de la parcelle qui est versée et de l'intensité de la verse. La méthode de notation proposée permet de définir un indice de verse synthétique dans une échelle de sensibilité de 1 à 9.

Notation « pointue » du suivi de sénescence



- **Echelle de Darles** avec pourcentage de surface verte ou non verte.

Annexe 5.2

Plan de l'essai de Rennes 2009-2010

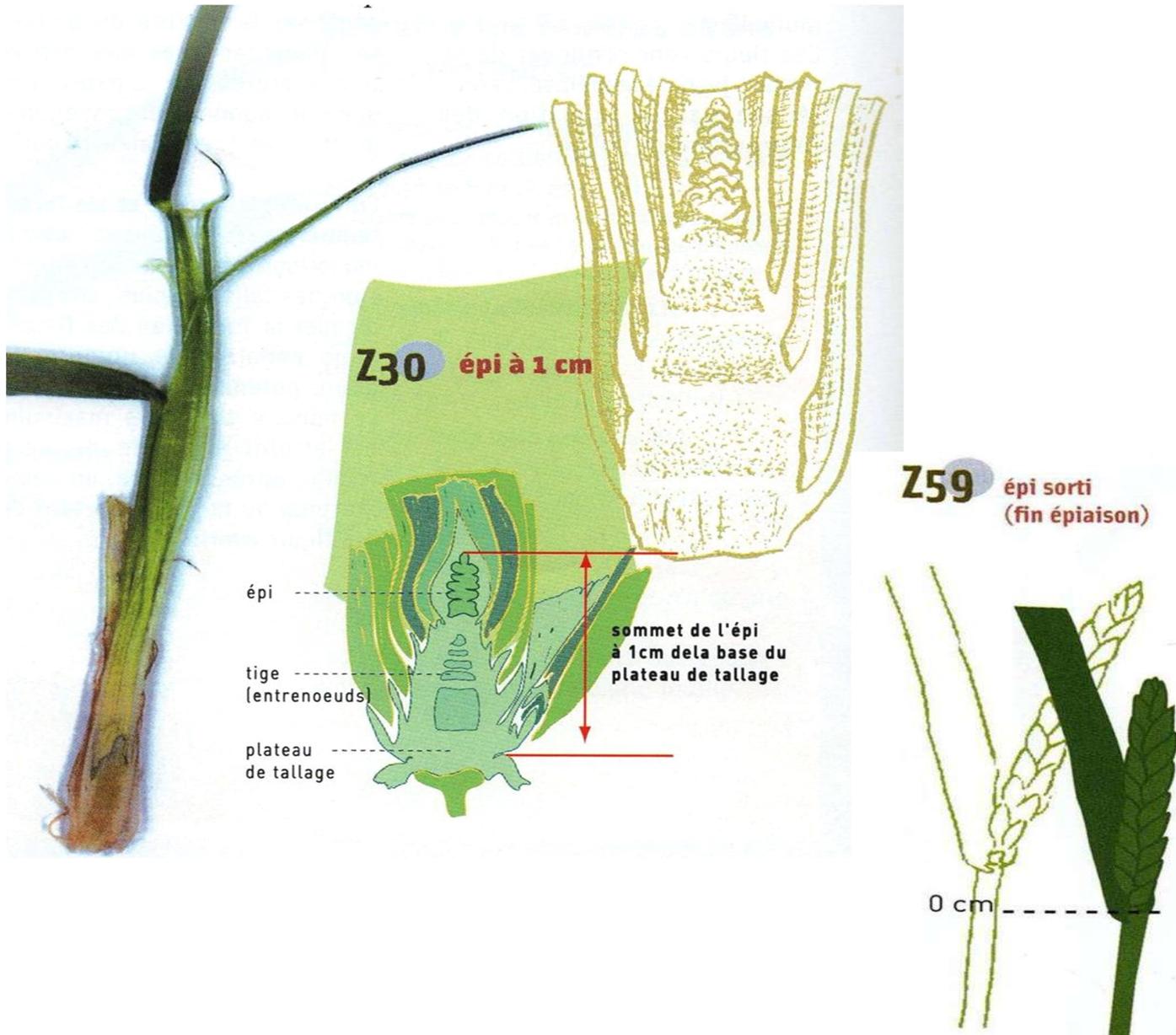
nord

B	3	5	16	19	14	8	18	20	23	12	9	11	B	B	B	B	B	B	B	11	12	21	1	8	13	7	10	20	2	4	18	B	B	B	B	B	B	B	21	23	6	2	17	22	19	12	10	24	8	18	B
B	17	21	6	ITK 2		2	10	15	4	22	7	B	B	B	B	B	B	B	6	19	9	5	15	23	14	17	16	3	21	24	B	B	B	B	B	B	B	9	5	14	11	4	3	16	7	1	20	13	15	B	
B	10	9	21	16	23	1	4	22	2	18	19	6	B	B	B	B	B	B	17	15	3	2	18	13	12	16	9	19	1	7	B	B	B	B	B	B	B	13	22	15	6	9	17	4	2	14	10	21	16	B	
B	13	8	5	11	14	20	12	17	24	7	3	15	B	B	B	B	B	B	21	5	10	22	4	6	23	20	24	11	14	8	B	B	B	B	B	B	B	5	11	23	3	12	7	20	24	8	1	19	18	B	
B	19	22	3	17	12	23	14	4	20	16	10	5	B	B	B	B	B	B	11	20	14	5	16	4	15	10	7	23	9	1	B	B	B	B	B	B	B	13	3	12	18	24	14	19	9	20	17	23	2	B	
B	11	21	8	ITK 3		24	7	15	1	13	18	B	B	B	B	B	B	17	13	22	24	18	8	12	21	6	3	2	19	B	B	B	B	B	B	B	4	15	5	11	21	7	8	10	6	22	16	1	B		

sud

Annexe 5.3

Plante au stade épi 1 cm, après coupe longitudinale (Source : GATE et al, 2003)



Stade fin épiaison (Source : GATE et al, 2003)

Annexe 5.4

Utilisation du LI-COR

Mesure du rayonnement au-dessus du couvert



Vue sur la lentille lors de la mesure du rayonnement sous le couvert



Annexe 5.5 (D. Gouache 23 février 2010)

Utilisation d'un appareil photo numérique pour évaluer un pourcentage de maladie global

Objectif et domaine d'application :

L'objectif de ce protocole est de réaliser des photos, à la verticale, à l'aide d'un appareil photo numérique pour évaluer un pourcentage de maladie global (tous étages foliaires confondus). La végétation doit être sèche et l'illumination doit être de préférence diffuse (pas de rayonnement direct ni d'ombres). Cette condition peut être obtenue par temps couvert.

Principe :

Le principe est de réaliser des photos à la verticale sur les micro-parcelles pour en différencier : le sol, les feuilles sénescentes, les épis et les feuilles vertes. Un indice de végétation, corrélé au pourcentage de sénescence, sera donné à partir de ces différenciations, après le traitement de ces photos.

Matériels et consommable :

1 opérateur

Équipement de base :

Un pied muni d'un niveau à bulle rond (le pied doit être réglable en hauteur et en largeur) : voir avec Thierry Dormeau pour la commande : t.dormeau@arvalisinstitutduvegetal.fr

Piquets

Une étiquette PVC (5 x 10 cm² environ)

1 marqueur

Équipement photo :

	Modèle	Prix (euros)	Intérêt
Mire grise	SCUADRA TRUECOLORS charte de gris taille M	30	Obligatoire
Flash externe	SIGMA EF-530 DG ST pour boîtier CANON	170	Conseillé
Appareil photo numérique	Canon 450D + objectif 18-55 mm	600	Obligatoire
télécommande externe	RS-60 E3 pour CANON EOS 450D (câble 60 cm)	20	Obligatoire
Rallonge fil télécommande	Rallonge audio Jack 3.5 mm mâle/femelle (5 m)	5	Conseillé
Adaptateur prise Jack	Adaptateur Jack Mâle 2.5 Stereo/Jack Femelle 3.5 Stereo x 2	5	Conseillé
batterie de rechange		30	Conseillé
Carte SD 4 Go		10	Conseillé

Ces équipements peuvent être commandés chez un photographe ou par Internet, par exemple chez :

<http://www.missnumerique.com>

Pour la rallonge et l'adaptateur jack :

<http://www.conrad.fr>

<http://www.ldlc.com>

Contenu ou déroulement des opérations :

Les prises de vues s'effectuent sur chaque micro-parcelle de l'essai.

Echantillonnage : (schéma 1)

2 à 3 photos par micro-parcelles, suivant leur taille :

Pour avoir une dynamique de sénescence, les acquisitions se font toujours au même endroit sur la micro-parcelle. Un piquet est positionné en bordure de parcelle, à chaque emplacement de prise de vue dispositif d'acquisition

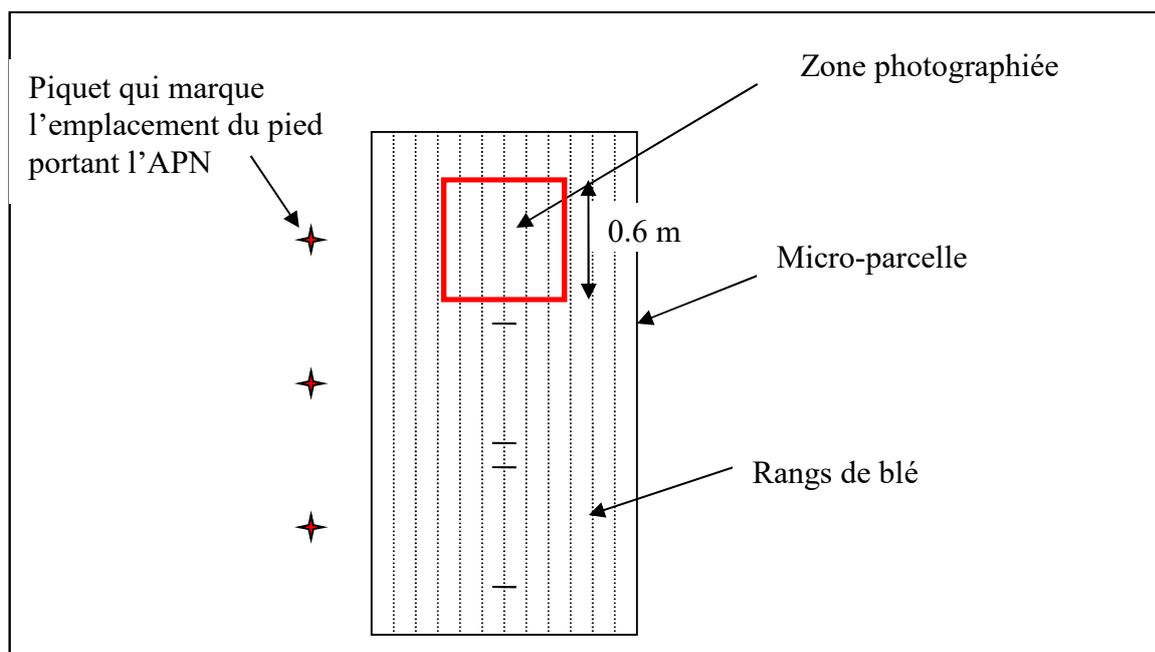


Schéma 1 : Echantillonnage des parcelles avec 3 photos (vue de dessus)

Installation du dispositif de prise de vue : (voir schéma 2)

L'APN est fixé à la verticale sur un pied munie d'un niveau à bulle au piquet d'emplacement de prise de vue. L'APN est fixé à 2,5 m du sol.

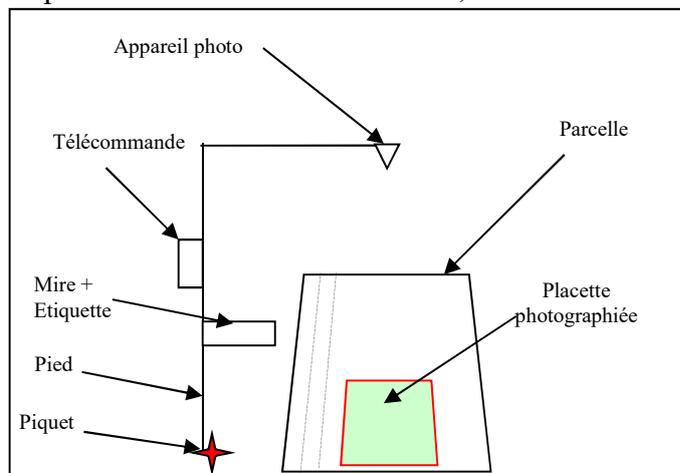


Schéma 2 : Installation de l'appareil photo (vue de côté)

Réglage de l'APN (cas du Canon D450) :

Focale : 24 mm

Mode P

Flash forcé (attention, si la cadence de prise de vue est trop rapide, le flash ne se déclenche plus). Dans ce cas, opter pour un flash externe sur le sabot.

ISO 200

Format brut (RAW)

Déclenchement par télécommande

Balance des blancs manuelle, à faire avant chaque série de photo (tant que l'appareil n'a pas été éteint) avec une mire grise (SCUADRA TRUECOLORS). Ne jamais utiliser la balance des blancs automatique !

Il faut fixer la mire grise sur le mât (cf. photo plus bas). Attention à ne pas déplacer cette mire d'une photo à l'autre. Elle servira de référence pour la balance des blancs automatique.

Attention ! La mire doit être placée au-dessus de la végétation.

Identification des photos :

Afin de savoir à quelle parcelle correspond une photo, il faut :

- Au champ : utiliser une ardoise (par exemple, une étiquette en PVC, pour identifier chaque modalité) fixée au pied et un marqueur pour noter le numéro de la micro-parcelle
- Au bureau : utiliser le logiciel Antrenamer (cf. doc Renommage des photos) pour renommer automatiquement une liste de photos à partir d'une liste de nom créée dans un fichier texte.

Exemple de photo :

1 piquet pour positionner la perche au même endroit à chaque date de mesure



Ardoise visible, ajouter une mire grise

La zone qui va être automatiquement découpée lors du traitement

Durée :

Prise de vue : 30 s / photo

Traitement : dépend des conditions d'acquisition

Dates et nombre de réalisation :

1. Période à laquelle le LAI est maximum pour avoir une référence (quand les variétés intermédiaires sont à mi-épiaison)
2. 1^{ère} notation maladie
3. 2^{ème} notation maladie

Traitement des photos :

Les photos sont transmises à Benoit de Solan (b.desolan@arvalisinstitutduvegetal.fr) ou Claudine Albertalli (c.albertalli@arvalisinstitutduvegetal.fr) pour être traitées.

Le traitement consiste à distinguer : le sol, les feuilles vertes, les feuilles sénescentes et les épis.

Annexe 6

Utilisation du logiciel SATVA pour l'analyse des photos verticales

<http://www4.paca.inra.fr/emmah/Production-Documentation/Outils-et-modeles/SATVA>

Une partie des indications ci-dessous est présent dans le document

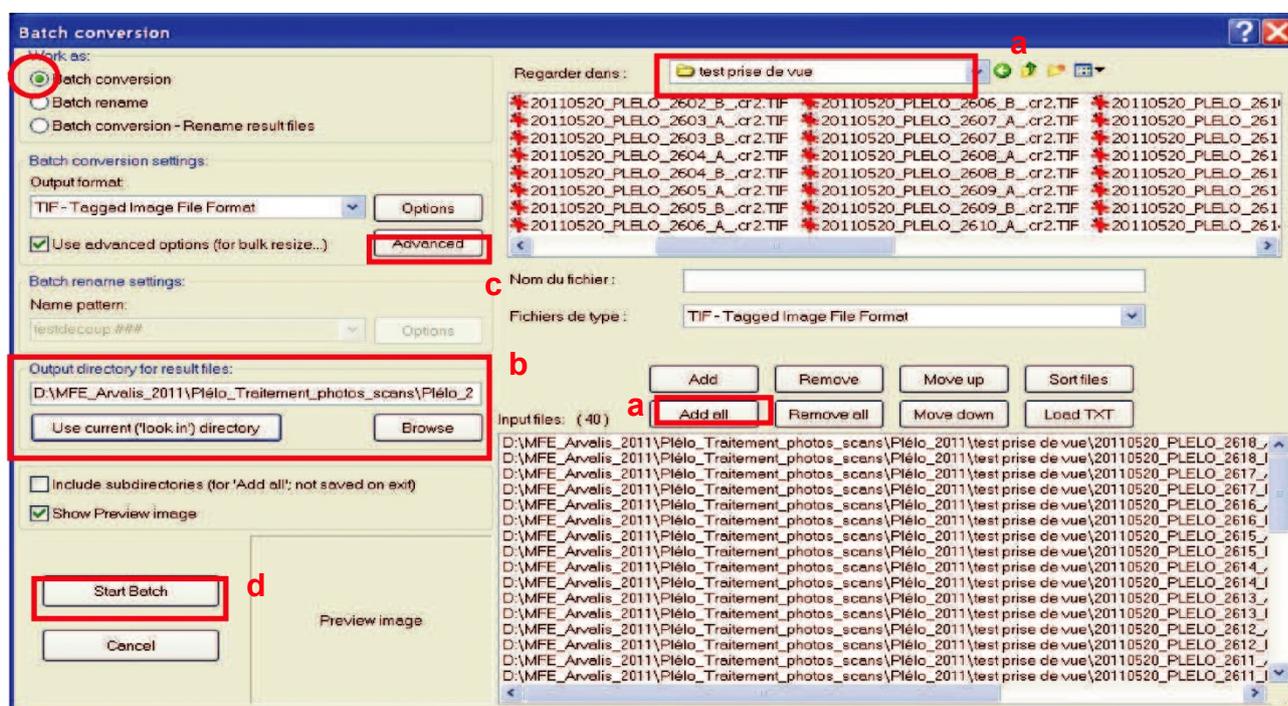
« tutorialSPOHN3.pdf » fourni avec le logiciel SATVA.

6.1. Découpages des photos avec IrfanView

Au préalable du traitement des photos avec SATVA, il faut d'abord développer les images avec le logiciel Canon DPP, puis les exporter du format RAW au format TIF, puis faire le découpage de la zone de la photo à traiter.

Pour cela on utilise le logiciel Irfanview, qui permet de traiter des lots d'images au format TIF. Ainsi après ajustement de la surface à prélever (50 cm² soit 3 rangs), les photos sont re-découper automatiquement à la dimension voulue.

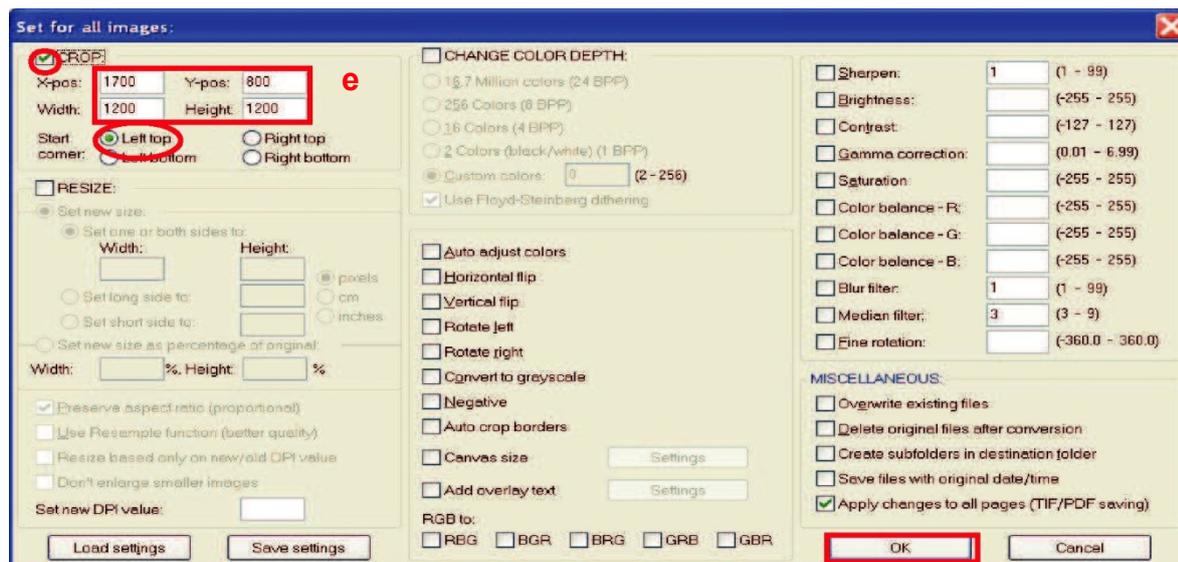
6.1.1. Lancer Irfanview et aller dans File / Batch conversion – Rename



- a : sélectionner les fichiers à traiter
- b : spécifier l'emplacement d'enregistrement des fichiers redimensionnés
- c : cliquer sur réglages avancés
- d : une fois l'étape c terminée, lancer le traitement

6.1.2. Définir le redimensionnement (c)

- e : on définit la zone de l'image à conserver :
 - X-pos (1700) et Y-pos (800) correspondant respectivement à la position horizontale et verticale de la zone à découper
 - Width (1200) et Height (1200) correspondant respectivement à la largeur et hauteur de la zone à découper. Ici cela correspond à 50cm soit la largeur de 3 rangs *.



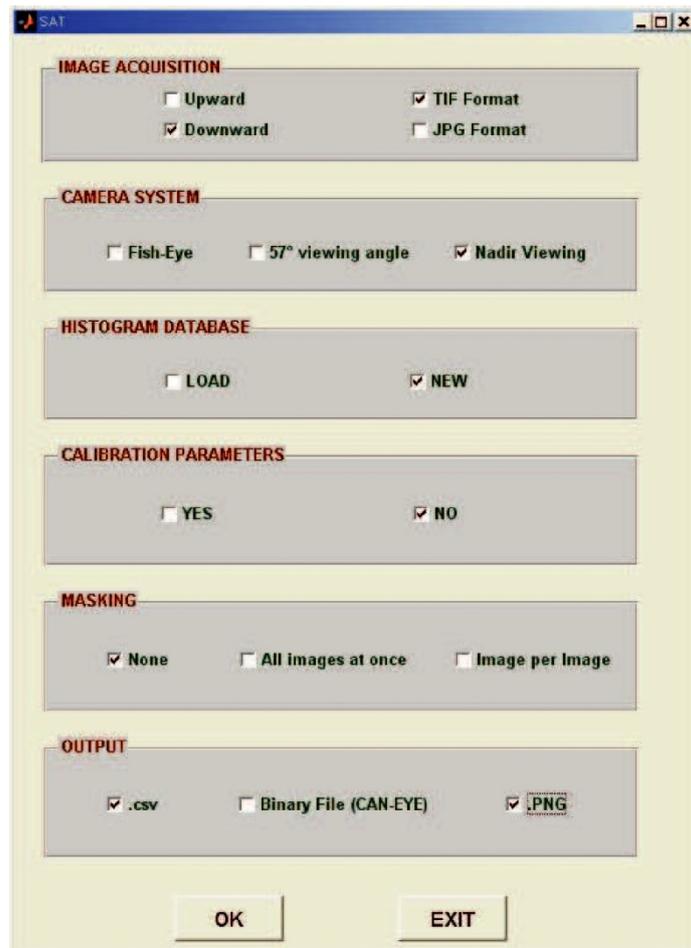
* Pour info, le logiciel « ZoomBrowser EX » fournit avec l'APN permet lui de visualiser directement la zone que l'on désire découper, permettant ainsi de repérer les côtes de largeur et longueur. Par contre ce logiciel ne permet pas de traiter plusieurs images à la fois.

6.2. Traitement des photos avec SATVA

Lancer le logiciel SATVA, une première fenêtre s'ouvre permettant de sélectionner le dossier contenant les images à traiter. Ensuite une deuxième fenêtre permet de choisir un sous-dossier s'il y en a. Cliquer sur Ok.

Une première interface apparaît où il faut indiquer les informations par rapport au traitement des photos : cf. image suivante.

Lors de cette étape vous allez créer une base de données qui sera conservée dans le dossier « BDD_Histo ».



Une fois cette étape effectuée, une fenêtre s'affiche où il faut renseigner le seuil à utiliser lors du traitement. Ce seuil s'affiche par défaut à 0.025, lors de cet essai le seuil choisi a été de 0.015 :



Ensuite l'interface du logiciel se lance, avec la première photo à traiter. Cette interface se compose de la photo à traiter en bas à gauche. Cette photo peut être visible en couleur réelle ou alors après traitement (bicolor). Pour cela, il faut appuyer sur le bouton « Switch to true color image ».

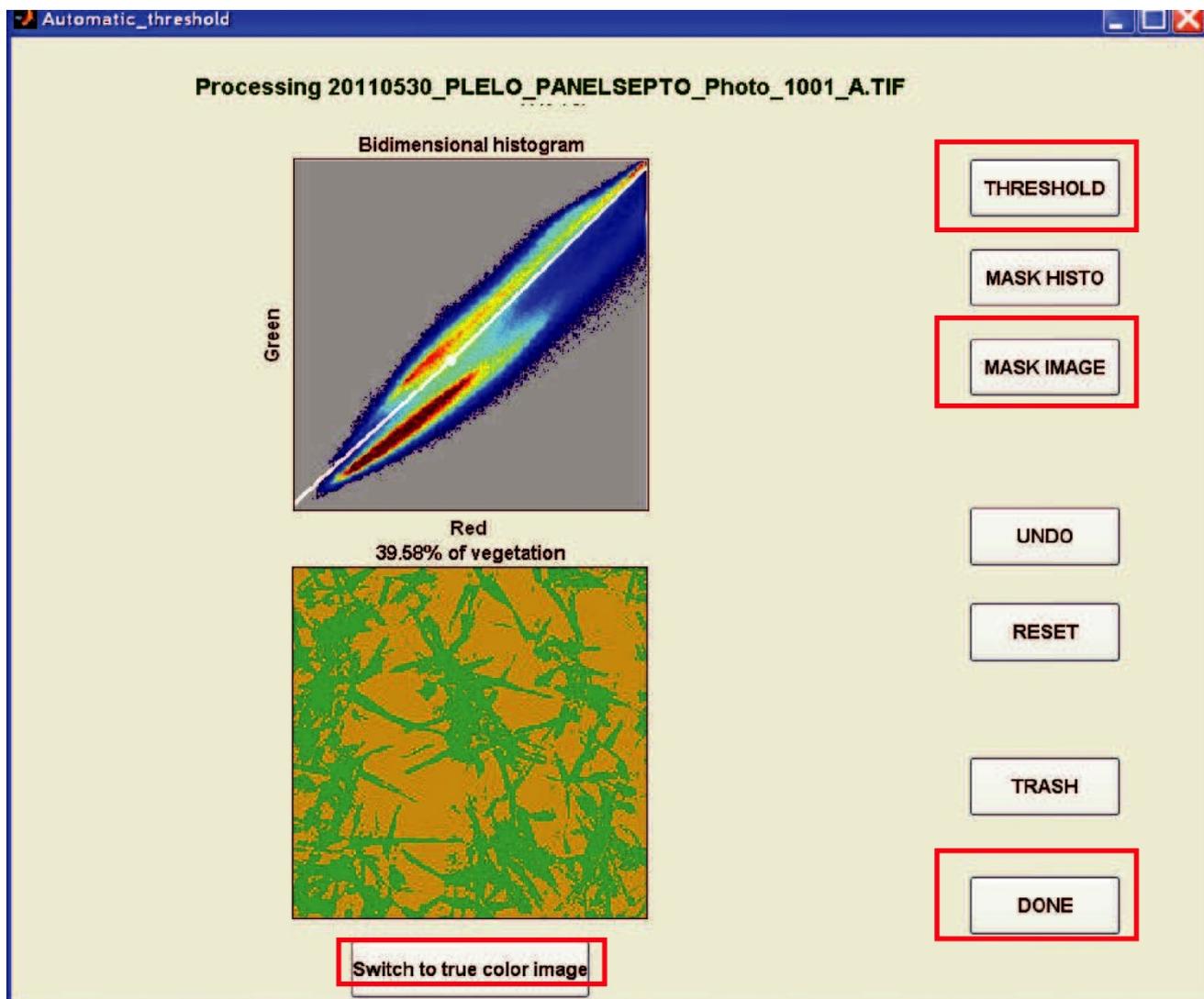
En haut à gauche, se trouve histogramme avec la courbe de seuil. En fonction de la photo il faut recalibrer ce seuil pour permettre un traitement optimal de la photo (une discrimination de la maladie efficace). Pour cela il faut appuyer sur le bouton « Threshold » et retracer la courbe de seuil en plaçant 3 points sur l'histogramme. Il faut toujours que cette courbe de seuil se positionne entre les 2 taches deux couleurs.

L'interface propose également la possibilité de masquer certaines couleurs de l'image en appuyant sur « Mask Histo ». De même en appuyant sur « Mask Image » on peut tracer une zone de la photo à ne pas prendre en compte, par exemple si un objet se trouve dans la photo.

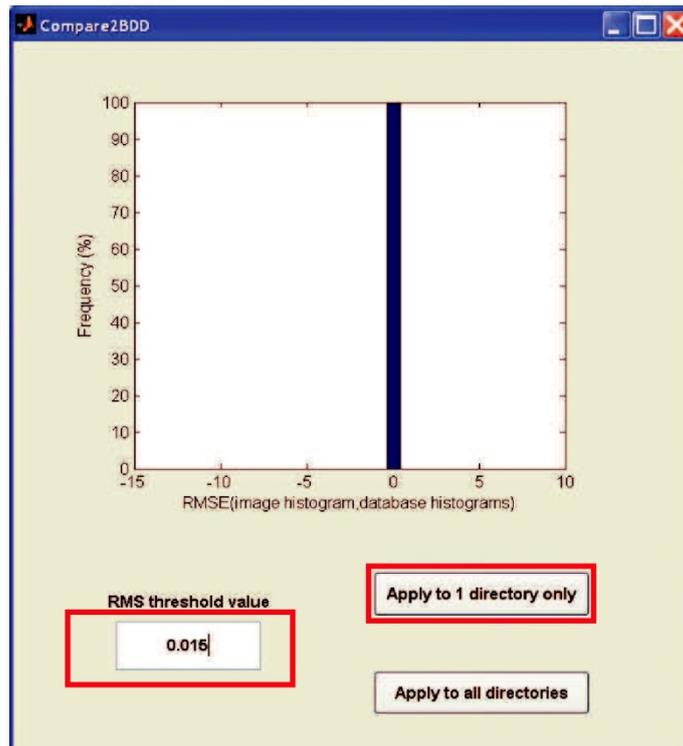
Si jamais une erreur ce produit lors du seuillage, il est possible de rétablir les paramètres de départ en cliquant sur « Undo » ou « Reset ».

Si vous voulez ne pas traiter une photo, il faut appuyer sur le bouton « Trash », cette photo ne sera donc pas traitée.

Pour passer à la photo suivante, cliquez sur « Done »



Après le traitement de la première photo, la fenêtre suivante apparaît. Il faut indiquer alors le seuil puis cliquer sur « Apply to 1 directory only ». Cette étape n'est plus à faire ensuite.



6.3. Sorties du logiciel

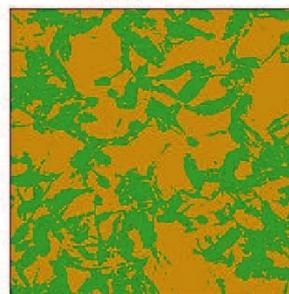
Pour chaque photo traitée, le logiciel crée dans un fichier Excel une ligne avec le nom de la photo et les valeurs de % de Vert et donc par différence de % de Trou (maladie, sénescence, sol).

De plus il crée une sortie png, où figure les infos suivantes :

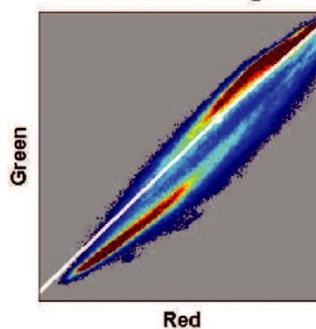
20110614_PLELO_PANELSEPTO_Photo_104_A.TIF



41.35% VGT



Bidimensional histogram



Annexe 7

Descriptif rapide du projet de thèse approfondissant le volet « sources-puits » de la tolérance

Enjeux et objectifs scientifiques et techniques :

Des approches récentes de modélisation de la photosynthèse du couvert et de la vitesse de croissance en biomasse ont été utilisées pour étudier l'impact potentiel sur les cultures de traits de tolérance aux maladies foliaires dans les céréales (Bancal et al, 2010). L'intérêt est de générer une épidémie de sévérité répétable afin de déterminer par analyse de sensibilité comment la tolérance aux maladies est déterminée par une combinaison équilibrée de traits physiologiques. Par exemple, des traits tels que l'indice foliaire (LAI), le coefficient d'extinction lumineuse (k), la surface verte de la feuille drapeau et sa photosynthèse sous lumière saturante, ainsi que le rapport de taille entre lésions virtuelles et visibles ont été reliés chez l'orge à l'impact sur le rendement (Bingham & Topp, 2009).

La thèse que nous proposons reprendrait de principe de modélisation physiologique basée sur des données expérimentales pour aider à identifier des combinaisons optimales de traits de tolérance qui restent compatibles avec un haut rendement en l'absence de stress. Il s'agirait notamment d'explorer l'impact des relations source/puits en présence ou absence de maladie. Le terme "source" fait ici référence à la fourniture d'assimilats soit par la photosynthèse soit par les réserves gluciques temporaires. Le terme "puits" désigne la demande d'assimilats par les tissus métaboliquement actifs mais non photosynthétiques (ou dont l'activité photosynthétique ne peut pas répondre à leur propre demande). La structure et l'extension du couvert serait variées expérimentalement par le génotype et la fertilisation. Les composantes génétiques et culturales de la variabilité seraient représentées dans la modélisation.

Pour que la tolérance aux maladies soit adoptée comme un objectif d'amélioration variétale, il sera nécessaire d'identifier les traits phénotypiques associés afin de fournir aux améliorateurs des outils pour dépister rapidement les gènes ou QTL candidats dans la population de départ. La thèse sera intégrée au projet UK-IF0118 qui vise à proposer des QTL pour des traits de tolérance présentant une héritabilité élevée.

L'objectif principal est d'identifier par la modélisation physiologique des traits simples ou combinés susceptibles d'améliorer la tolérance du blé aux maladies. Nous nous intéresserons particulièrement aux mécanismes sources/puits de l'échelle de la feuille à celle du couvert. Malgré l'aspect générique de la tolérance, on se focalisera sur un stress particulier: la septoriose foliaire (*Septoria tritici*; *Mycosphaerella graminicola*) sous une gamme de conditions de pratiques culturales (fongicides et fertilisation azotée).

Une autre sortie attendue de la thèse est celle d'une quantification de la tolérance en termes de caractéristique variétale. En effet la sévérité d'une maladie foliaire est définie en termes de surface exprimant des symptômes visibles, mais n'est pas en elle-même une variable de fonctionnement des couverts végétaux. Par contre la sévérité affecte la sénescence foliaire, ce qui peut être caractérisé par l'IFVI (Indice Foliaire Vert Intégré = *HAD: Healthy Area Duration*) dont la pente avec le rendement est le critère de tolérance actuellement proposé (Foulkes et al, 2006). Malheureusement la relation entre IFVI et rendement est curvilinéaire, donc la pente de cette relation est fonction du milieu et ne peut être considérée comme une caractéristique variétale.

Hypothèse 1: Dans le cas de la septoriose, l'effet dominant du pathogène semble être une réduction de l'interception, donc de la photosynthèse (Paveley et al., 2001; Bancal et al., 2007), Cependant on soupçonne les relations sources/puits d'intervenir fortement dans la

relation entre IFVI et rendement. Une modélisation physiologique sur des données expérimentales pourrait aider à identifier des combinaisons de traits pour la tolérance compatibles avec un haut rendement en l'absence de maladie.

Hypothèse2: Les relations entre sources (photosynthèse mais aussi remobilisation des réserves glucidiques) et puits (formation puis remplissage des grains mais aussi synthèse de réserves) pourraient être représentées à la manière de Bancal et Soltani (2002) dans les plantes en peuplement de la fin d'émission des feuilles à la maturité physiologique. La tolérance sera clairement associée à un fort IFVI par grain, mais pour qu'elle soit compatible avec un rendement élevé en absence de stress d'autres mécanismes devront être impliqués. Le modèle ci-dessus rend bien compte de la gestion des réserves, de la rétroinhibition de la photosynthèse en cas d'excédent source/puits et permettrait de construire des critères comme la RUE (efficacité d'utilisation du rayonnement = rapport de la matière sèche produite au rayonnement intercepté) utilisés en modélisation, mais dont l'aspect trop synthétique limite l'utilisation en amélioration variétale.

On utilisera la modélisation pour étudier les effets d'une modification de variables d'entrée caractérisant le couvert (comme l'indice foliaire) sur la production de biomasse des cultures de blé saines ou septoriées. Dans l'analyse, chaque variable sera modifiée par incrément dans une plage définie, tandis que les autres sont maintenues à leurs valeurs par défaut. Les plages de valeurs pour les variables caractérisant le couvert seront obtenues expérimentalement en réalisant des essais au champ avec les lignées de blé d'hiver repérées par le projet DEFRA /IF01118 comme contrastées vis-à-vis de la tolérance (cf. ci-dessous).

Description synthétique du programme de travail :

Cette thèse est associée au projet UK-IF0118 qui vise à proposer des QTL pour des traits de tolérance du blé à la septoriose tout en maintenant un haut rendement en l'absence de stress. La thèse utilisera le principe de modélisation physiologique basée sur des jeux de données expérimentales. Une partie de ces données sont celles recueillies et publiées dans le projet IF01118 au Royaume Uni, et celles publiées dans le contrat de branche "Tolérance" en France. Une autre partie utilisera des lignées de blé repérées par le projet IF01118 comme contrastées vis-à-vis de la tolérance dans le cadre d'un essai bisannuel Fongicide x Fertilisation à réaliser par l'étudiant en France ou au Royaume Uni. Il s'agira d'abord de paramétrer un modèle de blé dans toute la gamme observée dans les essais au champ. Le modèle permettra notamment d'explorer l'impact des mécanismes source/puits sur la relation entre surface foliaire et rendement en grains. L'objectif principal est d'identifier les traits simples ou combinés utilisables pour l'amélioration variétale de la tolérance du blé à la septoriose. Une autre sortie sera d'articuler dans la tolérance une caractéristique variétale indépendante du milieu, et un effet prédictible de celui-ci.

Le doctorant réalisera deux années d'essai au champ en utilisant un jeu contrasté de lignées de blé pour explorer l'effet de la variation des traits de tolérance qui sont les paramètres du modèle. En 2011/12, le projet DEFRA /IF01118 étudiera une gamme diversifiée de populations de blé en disjonction pour la cartographie (mapping populations) en les comparant à des lignées connues pour leur degré de tolérance. Il s'agit notamment des lignées issues d'une large gamme de croisements entre des descendants de blés hexaploïdes synthétiques et de variétés élite de blé du NO de l'Europe. Sous réserve d'un accord de transfert de matériel, les lignes repérées comme contrastant fortement en termes de tolérance seront mises à disposition de l'étudiant.

Nous proposons l'approche suivante:

- Utiliser des jeux de données (deux essais réalisés par l'étudiant avec des lignées de blé contrastées, plus les données recueillies et publiées dans le projet IF01118 au Royaume Uni, et celles publiées dans le contrat de branche "Tolérance" en France) pour paramétrer un modèle de blé dans toute la gamme de comportement phénotypique observée dans les essais au champ.
- Concevoir, par le biais de la modélisation, un ou des moyens d'exprimer la tolérance comme une caractéristique variétale, c'est-à-dire indépendamment du milieu (climatique ou technique)
- Appliquer ce modèle pour extrapoler la réponse des différents géotypes dans une gamme de milieux afin d'évaluer les caractéristiques idiotypiques de la tolérance, et de prédire la tolérance des différents géotypes sous divers milieux.

Traitements et dispositifs expérimentaux: Un essai sera mené sur un site en France ou au Royaume-Uni dans chacune des deux années pour quantifier la tolérance par la relation entre IFVI et rendement. Ces essais utiliseront des lignées de blé contrastées vis-à-vis des traits pouvant conférer de la tolérance. On manipulera le niveau de maladie, et donc l'IFVI dans les parcelles principales en utilisant deux doses de fongicides. Un traitement sélectif sera appliqué dans tous les cas pour contrôler les autres maladies et laisser prédominer la septoriose, maladie cible. Deux niveaux de fertilisation azotées seront étudiés en parcelles secondaires dans un dispositif en blocs aléatoires factoriel ou de type split-plot.

Mesures: Des mesures détaillées permettront de quantifier les composantes sources et puits, et une gamme de paramètres physiologiques correspondant aux paramètres du modèle pour aider à identifier de possibles nouveaux traits de tolérance. Les estimations comprendront notamment: (i) les surfaces vertes et malades des limbes et les notations de maladie (ii) les indices de verts foliaires et totaux, ponctuels et intégrés (iii) la biomasse aérienne et sa répartition ainsi que (iv) l'interception du rayonnement et la RUE), (v) la teneur en sucres des tiges et des gaines, (vi) les échanges photosynthétiques (l'efficacité photosynthétique des limbes sera mesurée avec un analyseur IRGA de type Licor 6400), et (vii) le rendement en grains et ses composantes. Les rendements en grains seront obtenus à partir de parcelles d'environ 20 m². Le poids de mille grains et les nombres de grains par m² et par épi seront calculés. On estimera le degré de verse avant récolte des parcelles.

Analyse des traits de tolérance: On déterminera la gamme possible des valeurs de chaque trait dans le modèle. Des analyses de sensibilité nous permettront de tester les hypothèses décrites ci-dessus et de déterminer les traits de tolérance pour l'amélioration variétale qui sont disponibles grâce à l'introduction de nouvelles lignées en France et au Royaume-Uni.

Validation du modèle: Le modèle pourra être testé à partir des jeux de données présentés dans Foulkes et al. (2006) et dans le rapport final du projet UK DEFRA /AR0511. De nouvelles données seront obtenues à partir des expériences sur le terrain proposées ci-dessus et dans le projet DEFRA/IF01118. Des sous-ensembles des jeux de données seront utilisés pour l'estimation des paramètres et leur validation.

Calendrier

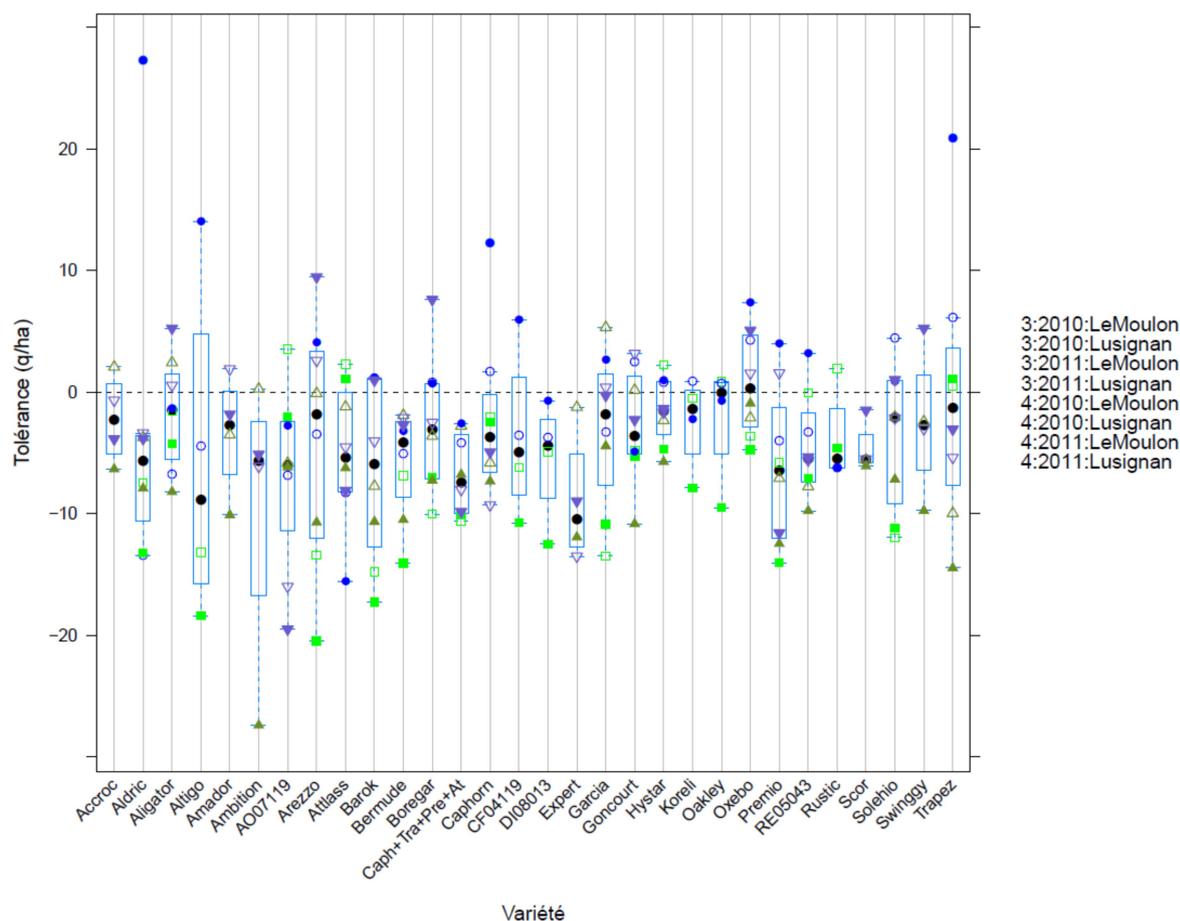
2012-2013 Analyse des bases de données existantes; gammes des traits de tolérance chez des géotypes contrastés; Expérimentations sur des populations (France ou Royaume-Uni).

2013-2014 Construction et évaluation d'un modèle Sources/Puits pour les traits de tolérance Expérimentations sur une sélection de lignées contrastées (France ou Royaume-Uni).

2013-2014 Analyse par simulation de la part héritable des traits de tolérance vs. Analyse par simulation des milieux tolérants

Annexe 8

Représentation de la tolérance calculée sur les données Blés rustiques à titre d'exemple



Tolérance (en q/ha) du passage de l'ITK2 aux ITK 3 et 4 pour les différents essais du réseau Blés rustiques. Les symboles différents représentent chaque combinaison ITK-Lieu-Année. Le point noir représente la moyenne. Ce graphique est présenté à titre d'exemple d'approche, mais la courbe enveloppe ayant servi à bâtir le calcul de tolérance étant sujette à caution, les différences variétales éventuelles le sont aussi.