Caractérisation des variétés de tournesol face au verticillium : mise au point d'un protocole en lien avec la nuisibilité de la maladie

Bret-Mestries E.[1], Bardy F.[1], Motard C.[1], Segura R.[1], Castellanet P.[2], Plut S.[2], Henry C.[3], Huger G.[3], Randuineau C.[3], Degrave L.[4], Tardin M.C.[5], Laporte M.[5], Tarroux G.[5], Vigroux S.[5], Archipiano M.[6], Cros O.[6], Pardo S.[7], Andrieu J.P.[7], Pauchet-Mattler I.[8], Lassalvy S.[9], Faure P.[9], Fuser R.[9], Rigaudeau F.[9], Turrel S.[9], Augis N.[9], Bertoux V.[9]

[1] Terres Inovia (Agen, Toulouse, Surgères)

[2] Caussade Semences, ZI de Meaux, BP 109, F-82303 Caussade cedex

[3] Mas Seeds, Service Recherche, BP27, F-40001 Mont de Marsan cedex

[4] Pioneer, Ferme Barbara, 265 Route de Boutoli, F-82700 Montech

[5] RAGT 2n, Le Bourg, F-12510 Druelle

[6] Soltis, Domaine de Sandreau, 6, Chemin de Panedautes, F-31700 Mondonville

[7] Syngenta, 1228 chemin de l'Hobit, BP 27, F-31790 St Sauveur

[8] UFS, 17 rue du Louvre, F-75001 Paris

[9] GEVES, 25 rue Georges Morel, CS 90024, F-49071 Beaucouzé cedex.

Correspondance : e.mestries@terresinovia.fr

Résumé

La verticilliose du tournesol est due à un champignon, *Verticillium dahliae*, qui attaque les plantes par leur système racinaire. Colonisant peu à peu le système vasculaire des plantes, il provoque des nécroses sur feuilles, pouvant conduire au dessèchement complet des plantes.

Afin de préciser la nuisibilité de la maladie, un projet associant Terres Inovia, le GEVES, l'UFS (Union française des semenciers) et six semenciers, a été mené en 2016. Onze variétés, choisies de façon à représenter l'éventail complet des comportements face à la maladie (de sensible à très peu sensible) et à explorer une large gamme de potentiel de rendement et de richesse en huile, ont été expérimentées sur neuf plateformes.

La nuisibilité de la maladie s'explique par la classe la plus élevée de sévérité des symptômes, classe qui se caractérise par la présence de symptômes sur quasi-totalité des feuilles de la plante : -2 q/ha et -0,3 point de teneur en huile par tranche de 10% de plantes dans cette classe. Cette nuisibilité apparaît stable, quel que soit le comportement de la variété. Dans le cadre du continuum inscription – post-inscription, un protocole opérationnel d'évaluation des variétés face à cette maladie est aujourd'hui proposé aux obtenteurs dès les épreuves d'inscription au Catalogue français, en cohérence avec le protocole de post-inscription.

Mots-clés: *Verticillium dahliae*, Fonction de nuisibilité, Phénotypage, Tournesol

Abstract: Characterization of sunflower varieties facing verticillium leaf mottle and wilt: development of a protocol related to the harmfulness of the disease

Sunflower verticillium wilt is caused by a fungus, *Verticillium dahliae*, which attacks plants through their root systems. Gradually colonizing the vascular system of plants, it causes necrosis on the leaves, which can lead to complete premature ripening of the plants.

In order to clarify the harmfulness of the disease, a project associating Terres Inovia, GEVES, UFS (Union française des semenciers) and six seed companies, was carried out in 2016. Eleven varieties, chosen to

represent the full range of behaviors against this disease (from susceptible varieties to varieties with a good behaviour) and to explore a wide range of yield potential and richness in oil, were tested on nine platforms. The harmfulness of the disease is explained by the highest class of severity of symptoms, a class which is characterized by the presence of symptoms on almost all the leaves of the plant: -2 q / ha and -0.3 point oil content per 10% of plants in this class. This harmfulness appears stable, whatever the behavior of the variety. Within the framework of the registration - post-registration continuum, an operational protocol for evaluating varieties against this disease is now offered to breeders as soon as they register for the French Catalog, consistent with the post-registration protocol.

Keywords: *Verticillium dahliae*, Yield losses, Phenotyping, Sunflower

Introduction

Le verticillium (*Verticillium dahliae*) est un champignon phytopathogène tellurique responsable de flétrissement et du dessèchement de nombreuses cultures.

Sur tournesol, les symptômes se manifestent sur feuilles, par des plages de nécrose entourées d'un halo jaune entre les nervures, sur tout ou partie des étages foliaires de la plante, pouvant conduire au dessèchement complet de celle-ci. Le champignon produit de nombreux micro-sclérotes à l'intérieur de la tige, tout autour de la moelle (Figure 1). Cette forme de conservation du champignon assure la survie de celui-ci dans les débris de culture et dans le sol, jusqu'à une durée évaluée à 14 années.



Figure 1 : Evolution des symptômes du verticillium sur tournesol (crédits : Terres Inovia).

En France, depuis 2011, le verticillium du tournesol est régulièrement observé sur 20 à 40% des parcelles enquêtées dans le grand Sud-Ouest depuis 2011. Habituellement vue en fond de vallée sur sols profonds, la maladie s'exprime également régulièrement en coteaux plus superficiels (Jouffret et Palleau, 2012 ; BSV, 2014). Sur les parcelles les plus touchées, les pertes de rendement peuvent atteindre 50%. Ainsi, depuis 4 ans, le développement de la maladie apparaît suffisamment significatif pour, d'une part, causer une perte de production sur les parcelles les plus touchées et, d'autre part, maintenir l'inoculum (micro-sclérotes) dans les parcelles pour les prochaines campagnes. La maladie est également ponctuellement observée dans d'autres bassins de production : Poitou-Charentes et région Centre.

La question de nuisibilité du verticillium a surtout été étudiée en Argentine, où celui-ci est endémique et fait partie des principaux problèmes sanitaires sur la culture. La nuisibilité de la maladie trouve son explication dans les symptômes sur feuilles, qui entraînent une accélération de la sénescence liée à une réduction de la photosynthèse, de l'interception du rayonnement et donc à une réduction de la durée de fonctionnement de la surface foliaire, durée qui est un paramètre déterminant dans l'élaboration du rendement et de la teneur en huile (Creus *et al*., 2007). Sur des essais type « essais variétés » au champ, en infection naturelle, des travaux de la fin des années 90 font état de pertes de rendement de 30% sur des hybrides sensibles (Pereyra *et al*., 1999) ; une relation entre la gravité des symptômes notée sur une échelle de notation de 0-4 et les pertes de rendement sur 20 hybrides a également été établie : entre 6 et 12% du rendement sont

ainsi perdus pour chaque point supplémentaire dans cette échelle de gravité : 0 = sain ; 1 = feuilles atteintes dans le bas de la plante ; 2= feuilles atteintes jusqu'au milieu de la plante ; 3 = feuilles atteintes sur toute la plante ; 4 = tige striée et fragile (Bertero de Romano et Vazquez, 1985). Plus récemment, en 2007, des travaux ont porté sur la comparaison, dans un réseau d'essais multi-local en infection naturelle, de couples d'hydrides avec le même fonds génétique mais ne se distinguant que par leur comportement face à la maladie, sensible (S) ou résistant (R) (Creus *et al*., 2007) : en situation où la pression maladie a été sévère, la perte de rendement grains et de rendement huile entre hybrides résistants et sensibles a été estimée à -30%. Le poids de mille grains (PMG) est réduit de 20% et l'indice de récolte de 9%. Ces auteurs ont établi la relation suivante sur ce type de matériel : - 2,5% de rendement pour 10% de surface foliaire atteinte supplémentaire.

En France, Terres Inovia a estimé la nuisibilité moyenne du verticillium de 2,1 à 2,7 q/ha. L'analyse d'une dizaine d'essais « variétés » sur lesquels la maladie s'était exprimée et qui avaient fait l'objet d'une notation des symptômes détaillée en 2011 et 2012 montre que la nuisibilité s'explique surtout par le taux de plantes très touchées (80% du feuillage atteint), avec une perte de rendement de 2,2 et 2,5 q/ha par tranche de 10% de plantes très touchées (Mestries et Lecomte, 2012 ; Lecomte, 2013 ; Mestries, 2013). Les données de PMG et de teneur en huile n'ont toutefois pas permis de retrouver des résultats cohérents avec les données argentines.

Les moyens de lutte disponibles actuellement reposent exclusivement sur la lutte génétique. La maladie étant bien installée sur notre territoire, en particulier dans le Sud-Ouest, l'un des deux bassins de production principaux du tournesol en France, il est par conséquent important que les sélectionneurs puissent valoriser leur travail au moment de l'inscription des variétés au Catalogue français et que les distributeurs et les producteurs aient accès le plus rapidement possible à une information sur le comportement des variétés face à cette maladie pour choisir la variété la plus adaptée à leur situation (Lecomte, 2013).

Pour cela, un projet co-construit par le GEVES, Terres Inovia, l'UFS (Union française des semenciers) et six semenciers (Caussade Semences, Maïsadour Semences, Pioneer Génétique, RAGT Semences, Soltis et Syngenta) et soutenu par le Ministère en charge de l'Agriculture (fonds CASDAR) a été mené en 2016 et 2017.

L'objectif de ce projet était double : (i) compléter les connaissances sur la nuisibilité de la maladie en précisant la relation dégât (symptômes) - dommage (perte de rendement et de teneur en huile) de ce pathosystème, (ii) construire un protocole opérationnel d'évaluation des variétés de tournesol face à cette maladie pour les épreuves d'inscription des variétés au Catalogue français, en cohérence avec le protocole post-inscription déjà opérationnel chez Terres Inovia afin de pouvoir valoriser au mieux l'ensemble des informations inscription et post-inscription pour les utilisateurs.

1. Neuf plateformes expérimentales et onze variétés pour un double dispositif

1.1 Un double réseau d'essais

Afin de répondre au mieux à cet enjeu, un réseau d'essais dédiés a été mis en place en 2016 par les partenaires semenciers et Terres Inovia sur neuf plateformes (du Sud-Ouest au Centre-Ouest) de manière à explorer une diversité de situations pédoclimatiques, et dans des parcelles où le verticillium avait été observé par le passé. Sur chaque plateforme, deux dispositifs ont été implantés pour apprécier au mieux la nuisibilité de la maladie :

- Un dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » avec onze variétés,
- Un dispositif « récolte manuelle » avec quatre variétés, communes avec le premier dispositif.

Chaque essai comportait trois répétitions. Le dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » permet d'établir une relation « dégât-dommage » au niveau parcellaire. Sur le dispositif « récolte manuelle », la

récolte est gérée plante à plante, l'objectif étant de récolter 30 capitules par classe de sévérité de symptôme et par variété sur chaque essai, afin de préciser la fonction de nuisibilité.

La justification de ce type d'approche repose sur le fait que l'on ne dispose pas comme pour d'autres maladies de moyens permettant d'obtenir un témoin sain (ex. protection fongicide) et de travailler toutes conditions égales par ailleurs avec une gamme de sévérité de symptômes (ex. contamination artificielle). Les dispositifs dédiés envisagés ont donc pour objectif d'affiner les estimations de la nuisibilité de la maladie dont on dispose (littérature internationale et essais « variétés » post-inscription sur lesquels la maladie s'est exprimée) ; l'évaluation de la stabilité de la relation dégât-dommage en fonction des variétés et des situations est également un enjeu important.

1.2 Onze variétés pour explorer une large variabilité

Les variétés ont été choisies pour représenter la gamme de comportement complète des variétés face à la maladie (sensible (S), moyennement sensible (MS), peu sensible (PS), très peu sensible (TPS)) et explorer une gamme de potentiel de rendement et de richesse en huile (Tableau 1). Afin de ne pas influencer les expérimentateurs, les variétés ont été codées. Le témoin sensible SY Listeo a été répété toutes les trois à quatre parcelles au sein de chaque essai afin d'évaluer l'homogénéité de l'attaque intra-essai.

Tableau 1 : Caractéristiques des variétés utilisées pour le projet et répartition dans les deux dispositifs (MP = mi-précoce ; MT = mi-tardive ; S = sensible ; PS = peu sensible ; MS = moyennement sensible ; TPS = très peu sensible ; MB = moissonneuse-batteuse). Le nombre d'étoiles est d'autant plus élevé que la variété est productive et riche en huile.

Variété	Code	Précocité maturité	Comportement Verticillium	Niveau de productivité	Richesse en huile	Dispositif(s)
Variétés S avec gamme de rendement						
SY LISTEO	Témoin répété	MP	S	****	**	Récolte manuelle & MB
Kapllan	Var 8	MT	S	***	***	MB
ES Tektonic CL	Var 1	MT	S	***	*	MB
Variétés PS avec gamme de rendement						
LG5679	Var 4	MP	PS	***	**	Récolte manuelle & MB
Fabiola CS	Var 3	MP	PS	****	**	MB
DKF3333	Var 10	MT	PS	**	**	MB
Variétés MS avec gamme de rendement						
NK Kondi	Var 5	MP	MS	*****	**	Récolte manuelle & MB
CLLOSER	Var 2	MP	MS	***	****	MB
MAS87IR	Var 6	MT	MS	**	***	MB
ES Violetta	Var 7	MP	MS	*****	**	MB
Témoin TPS						
LG5687HO	Var 9	MT	TPS	***	**	Récolte manuelle & MB

1.2 Une notation des symptômes en quatre classes de sévérité

La notation de la sévérité de la maladie a été réalisée plante à plante, sur 50 plantes de chaque micro-parcelle de chaque essai. Quatre classes de sévérité ont été retenues (Figure 2) :

- Classe 1 : plante saine,
- Classe 2 : symptômes foliaires limités à la moitié inférieure de la plante,
- Classe 3 : symptômes au-delà de la moitié inférieure de la plante, les 5 dernières feuilles étant indemnes de symptômes,
- Classe 4 : plante avec moins de 5 feuilles indemnes de symptômes.

Chaque essai a fait l'objet d'une seconde notation, afin de détecter, après la première notation au cours de la floraison, une éventuelle évolution de la maladie en début de maturité.



Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

Figure 2 : La sévérité des symptômes du Verticillium sur tournesol est évaluée plante à plante sur une échelle comportant quatre classes (crédits : Terres Inovia).

1.3 La remobilisation de données antérieures

Les données verticillium et données de récolte acquises sur onze essais post-inscription « variétés » conduits en 2011 et 2012 (implantés en sol profond en Haute-Garonne à En-Crambade, Villenouvelle et Verfeil) ont été mises à disposition pour le projet. Deux autres essais, comportant cinq variétés communes, implantés en 2012 l'un à En-Crambade et l'autre dans le Lot-et-Garonne, ont fait l'objet d'une récolte manuelle. Au total, les données de treize essais historiques ont été remobilisées pour le projet, avec quarante-huit variétés couvrant la gamme complète de comportement face au verticillium : sensibles (23%), moyennement sensibles (29%), peu sensibles (19%) et très peu sensibles (12%).

1.4 L'analyse des données

Un indice appelé « indice verticillium » a été calculé pour chaque micro-parcelle des essais afin d'intégrer les notations de la sévérité de la maladie en 4 classes ordinales en un indicateur synthétique :

$$\text{Indice Verticillium} = \frac{(1 * \text{nombre de plantes en Classe 1}) + (2 * \text{nombre de plantes en classe 2}) + (3 * \text{nombre de plantes en classe 3}) + (4 * \text{nombre de plantes en classe 4})}{\text{Nombre total de plantes observées}}$$

Les coefficients utilisés pour ce calcul ont été fixés arbitrairement, sans connaissance *a priori* de l'impact de chacune des classes de notation sur la nuisibilité de la maladie.

La démarche d'analyse des données a comporté cinq étapes : après une analyse descriptive classique, l'homogénéité de l'attaque de verticillium a été vérifiée au sein de chaque essai à l'aide du témoin sensible répété SY Listeo. Les niveaux de « pression maladie » inter-essais ont été comparés puis une analyse

de la variance des variables liées à la maladie a été réalisée essai par essai (modèle linéaire à effets fixes) et sur les regroupements d'essais (modèle linéaire mixte). Des régressions linéaires stepwise (régressions avec un algorithme de sélection des variables explicatives ascendant-descendant) ont permis d'analyser la nuisibilité de la maladie.

2. Résultats

Le réseau mis en place a permis d'explorer des situations en sols moyen (80 cm) à profond (200 cm) et des climats variés (Sud-Ouest et région Centre). Les dates de semis se sont échelonnées sur un mois, du 14 avril au 17 mai. La densité de peuplement moyenne au sein des essais varie de 5,5 à 7,2 plantes/m². Deux plateformes implantées sur des parcelles avec un « passé verticillium » trop récent ou insuffisant ont montré trop peu de symptômes pour être notées. Sur les autres plateformes, la première notation de la maladie a été réalisée pendant la floraison, entre les stades F1 (début floraison) et F4 (fin floraison). La seconde notation a été réalisée 10 à 18 jours plus tard selon les essais, en tout début de maturité (stades M0 ou M1.1). Les récoltes se sont échelonnées entre le 8 et le 29 septembre pour le dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » et 26 août au 9 septembre pour le dispositif « récolte manuelle ». Tous les essais ont fait l'objet d'une validation agronomique. Sur le dispositif "récolte moissonneuse-batteuse", celle-ci a conduit à l'élimination de 25 micro-parcelles (4,2% du jeu de données) pour des raisons de densité de peuplement insuffisante. Un essai présentant de trop fortes hétérogénéités intra-parcellaires a également été retiré de l'analyse. Sept essais ont été valorisés pour le dispositif « récolte manuelle », même s'il n'a pas toujours été possible de récolter des capitules dans toutes les classes de symptômes pour toutes les variétés (ex. absence de plantes en classe 4 pour la variété TPS et de plantes en classe 1 pour la variété S).

2.1 Un réseau d'essais concluant

Un niveau de pression verticillium suffisant a été observé sur sept des neuf plateformes, avec des symptômes très précoces (stade « bouton étoilé » E1) sur trois d'entre elles. Sur l'ensemble des douze essais valorisés (tous dispositifs confondus), l'indice verticillium moyen par essai (première notation, toutes variétés confondues) varie de 2,05 à 3,13. Le classement des essais est cohérent avec les observations réalisées lors de la visite des essais par les experts CTPS.

En ce qui concerne plus particulièrement l'homogénéité du niveau de sévérité de la maladie au sein de chaque essai, l'analyse a porté sur les dispositifs « récolte moissonneuse-batteuse » où le témoin sensible SY Listeo a été répété toutes les 3 à 4 parcelles. L'analyse de variance sur les données de ce témoin réalisée sur le regroupement des cinq essais validés pour ce dispositif permet de mettre en évidence l'absence d'effet « bloc » et d'interaction « bloc x essai » au seuil de 5%. Seul l'effet « essai » apparaît significatif. Ce résultat permet donc de confirmer la bonne homogénéité de l'attaque au sein de chaque essai.

Sur le dispositif « récolte moissonneuse-batteuse », les rendements grains propres et secs (GPS) moyens s'échelonnent de 29 à 34 q/ha, avec un coefficient de variation élevé (de 17 à 30%) en raison de la présence de maladie. Le poids de mille grains (PMG) moyen par essai varie de 49 g à 66 g. La gamme des valeurs moyennes de teneur en huile sur matière sèche est de 5 points : de 48,6% à 53,7%.

2.2 Un comportement des variétés très cohérent entre essais

Sur le dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » (Tableau 2), les variétés sensibles 1 et 8 ainsi que la variété TPS 9 sont bien classés par rapport à leur comportement évalué en post-inscription. Il en est de même pour les trois variétés PS (var 3, 4 et 10) et deux des quatre variétés MS (var 5 et var 7). Les variétés 2 et 6 (MS) se positionnent dans le même groupe d'homogénéité que les variétés PS. La variété

6 montre un indice verticillium moyen toutefois très proche de celui de la variété 4 classée PS (0,02 point d'écart) ; la variété 2 est la moins touchée des variétés MS et PS réunies, qui se regroupent toutes dans une gamme très étroite de 0,44 point d'indice verticillium.

Tableau 2 : Résultats du test de comparaison de moyennes de Student-Newman-Keuls (α=5%) sur les 5 essais du réseau « récolte machine » pour la variable « indice verticillium ». Les variétés appartenant à des groupes d'homogénéité différents sont identifiées par des lettres différentes au sein de chaque essai.

Essai	SY LISTEO	var1 (S)	var8 (S)	var2 (MS)	var5 (MS)	var6 (MS)	var7 (MS)	var3 (PS)	var4 (PS)	var10 (PS)	var9 (TPS)
En-Crambade	3.41 B	3.80 A	3.54 B	2.67 D	2.95 CD	3.09 C	2.87 CD	2.67 D	2.73 D	2.67 D	2.30 E
Endoufielle	3.27 BC	3.81 A	3.47 B	2.64 EF	3.24 BC	3.00 D	3.14 BCD	3.12 BCD	3.03 CD	2.86 DE	2.42 F
Mézin	3.19 BC	3.75 A	3.33 B	2.65 DE	2.98 BCD	2.79 CDE	2.85 CDE	2.60 DE	2.61 DE	2.64 DE	2.37 E
Villefranche de L.	2.38 B	3.01 A	2.06 BC	1.47 C	1.80 BC	1.41 C	2.09 BC	1.56 BC	1.63 BC	1.67 BC	1.26 C
Villenouvelle	3.30 AB	3.68 A	3.33 AB	2.55 C	3.22 AB	2.49 C	2.87 BC	2.71 BC	2.68 BC	2.74 BC	2.26 C
Regroupement	2.99 BC	3.61 A	3.15 B	2.40 E	2.84 CD	2.56 E	2.75 D	2.53 E	2.54 E	2.51 E	2.12 F

Sur l'ensemble des 7 essais du réseau « récolte manuelle », le classement des variétés est totalement cohérent entre essais et avec le comportement attendu des variétés (Tableau 3).

Tableau 3 : Résultats du test de comparaison de moyennes de Duncan (α=5%) sur les 7 essais du réseau « récolte manuelle » pour la variable « indice verticillium ». Les variétés appartenant à des groupes d'homogénéité différents sont identifiées par des lettres différentes au sein de chaque essai.

Essai	SY LISTEO (S)	Var 5 (MS)	Var 4 (PS)	Var 9 (TPS)
Castelnaudary	2.83 A	2.61 AB	2.33 BC	1.98 C
En-Crambade	3.50 A	3.22 B	2.86 C	1.98 D
Endoufielle	3.48 A	3.47 A	2.88 B	2.35 C
Mézin	3.17 A	3.02 A	2.56 B	2.29 C
Verfeil	3.44 A	3.37 A	2.59 B	1.87 C
Villefranche de Lauragais	3.34 A	2.84 A	1.73 B	1.34 B
Villenouvelle	3.30 A	3.17 A	2.55 B	2.13 C
Ensemble du réseau	3.34 A	3.12 B	2.50 C	1.99 D

Les classements des variétés apparaissent donc cohérents entre essais sur les deux réseaux. Ils sont globalement cohérents avec le comportement connu des variétés, les variations pour les variétés PS et MS apparaissant liées aux faibles écarts entre variétés sur cet indice verticillium calculé différemment de celui utilisé par Terres Inovia pour la classification des variétés en post-inscription.

Sur les regroupements d'essais des deux dispositifs, la variabilité de l'indice verticillium (première notation) s'explique principalement par un effet « essai » et un effet « variété ». Le classement des variétés est globalement conforme à l'attendu. L'interaction « variété x essai » est peu ou pas significative et n'explique qu'une très faible part de la variabilité de l'indice verticillium observée sur ces réseaux.

2.3 Les pertes de rendement s'expliquent par le pourcentage de plantes très touchées par la maladie

Sur chacun des essais « récolte moissonneuse-batteuse », l'analyse statistique par régression stepwise montre que le pourcentage de plantes en classe 2 (symptômes sur la moitié inférieure de la plante) ou en classe 3 (symptômes laissant au moins 5 feuilles saines en haut de la plante) ne pénalisent pas le rendement ; seul le pourcentage de plantes en classe 4 (moins de 5 feuilles saines) contribue à la nuisibilité de la maladie. La représentation des données de chaque micro-parcelle sur l'ensemble des

essais (Figure 3) amène à penser que le pourcentage de plantes en classe 2 (symptômes sur la moitié inférieure de la plante) ou en classe 3 (symptômes laissant au moins 5 feuilles saines en haut de la plante) ne pénalise pas le rendement, contrairement à la classe de sévérité de symptômes la plus élevée.

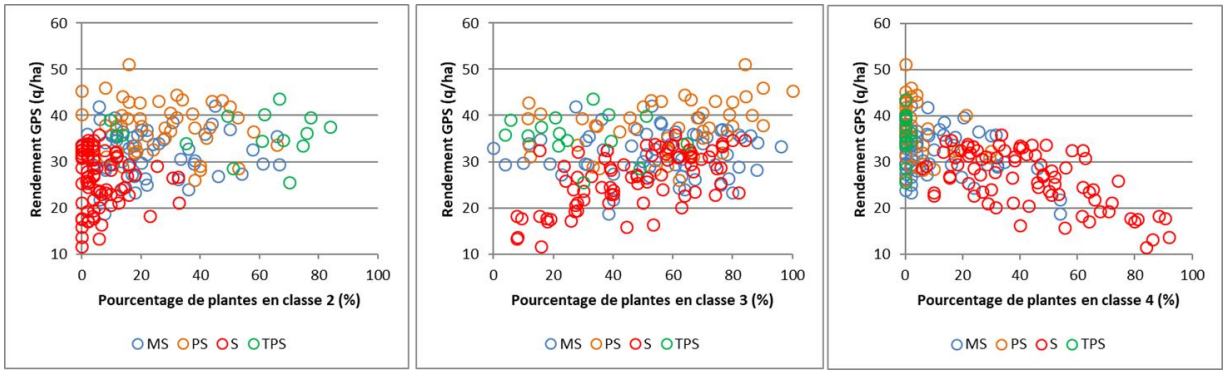


Figure 3 : Relation entre les pourcentages de plantes en classes de sévérité de symptômes 2, 3 et 4 et le rendement GPS (q/ha) sur l'ensemble des 5 essais du réseau « récolte moissonneuse-batteuse », pour chaque classement variétal (S, PS, MS, TPS).

L'estimation de la contribution de chaque classe de sévérité de symptômes au rendement a été réalisée à partir de régressions stepwise, essai par essai puis pour le regroupement des 5 essais et enfin pour le regroupement des trois essais (Endoufielle, En-Crambade et Mézin) où les symptômes sont apparus très tôt, avant la floraison. Ces régressions se révèlent hautement significatives sur tous les essais et expliquent 35 à 75% de la variabilité du rendement. Hormis sur le site d'Endoufielle (où la classe 3 contribue légèrement positivement au rendement), la seule contribution significative au rendement est celle de la classe 4 : toujours négative, avec un coefficient hautement significatif ($P<0.0001$), de -0.16 à -0.30 selon les essais. Sur le regroupement des 5 essais, cette seule contribution se confirme : -0.19 ($P<0.0001$) ; le fait de ne travailler que sur les 3 essais ayant montré des symptômes bien avant la floraison ne fait pas varier cette contribution de la classe 4 au rendement : -0.18 ($P<0.0001$). Ce niveau de contribution est du même ordre que celui obtenu par simple régression linéaire du pourcentage de plantes en classe 4 sur le rendement : -0.20 ($P<0.0001$), dans un modèle hautement significatif ($P<0.0001$, $R^2=47\%$).

Ces résultats permettent donc d'établir la fonction de nuisibilité de la maladie sur le rendement, avec une perte de rendement évaluée à 2 q/ha par tranche de 10% de plantes en classe 4. Ces résultats sont très cohérents avec ceux obtenus par Terres Inovia sur des essais antérieurs (2011-2012) sur la nuisibilité des symptômes touchant au moins 80% du feuillage.

2.4 Le pourcentage de plantes très touchées explique aussi la perte de qualité

Toujours sur le même dispositif, la relation entre la sévérité de la maladie et la teneur en huile sur matière sèche apparaît comparable à celle observée pour le rendement, mais avec une tendance un peu moins marquée, les points étant moins resserrés autour d'une tendance commune (Figure 4).

Les régressions stepwise essai par essai sont hautement significatives sur 4 essais sur 5, avec l'identification d'une seule contribution négative : celle de la classe 4 (coefficient de -0.08 à -0.03). L'essai d'En-Crambade se distingue par un modèle tout juste significatif ($P=0.0496$), où seule la classe 3 contribue faiblement mais positivement à la qualité (+0.02). Le modèle appliqué au regroupement des 5 essais puis sur les 3 essais attaqués tôt affiche une contribution de l'ordre de -0.3 ($P<0.0001$) de la classe 4 à la teneur en huile, mais n'explique que 20% de la variabilité de celle-ci. La régression linéaire du pourcentage de plantes en classe 4 sur la teneur en huile explique quant à elle seulement 15% de la variabilité, avec un coefficient de 0.4 pour le pourcentage de plantes en classe 4. Cela confirme la variabilité plus forte des points autour de la tendance observée sur la Figure 4.

Comme pour le rendement, seul le pourcentage de plantes en classe 4 semble pénaliser l'accumulation de l'huile, à hauteur de 0,3 point de teneur en huile par tranche de 10% de plantes en classe 4.

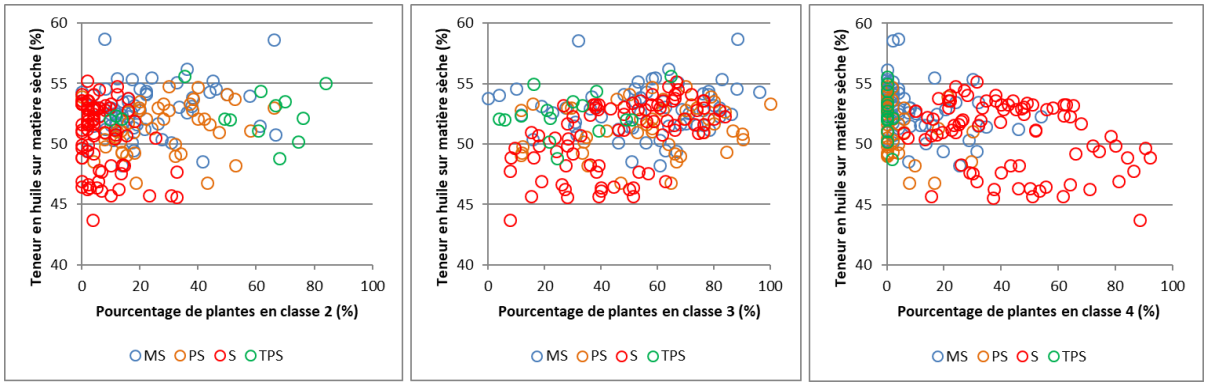


Figure 4 : Relation entre les pourcentages de plantes en classes de sévérité de symptômes 2, 3 et 4 et la teneur en huile sur matière sèche (%) sur l'ensemble des 5 essais du réseau « récolte moissonneuse-batteuse », pour chaque classement variétal (S, PS, MS, TPS).

2.5 Une nuisibilité identique quelle que soit la variété

La question d'une nuisibilité différente de la maladie selon les variétés est fréquemment posée. Sur le jeu de données du dispositif « récolte moissonneuse-batteuse », le plus riche en variétés, la représentation des relations entre le pourcentage de plantes en classe 4 et le rendement GPS en fonction du classement des variétés (S, MS et PS) montre que les pentes des régressions linéaires sont proches entre classes de variétés (Figure 5).

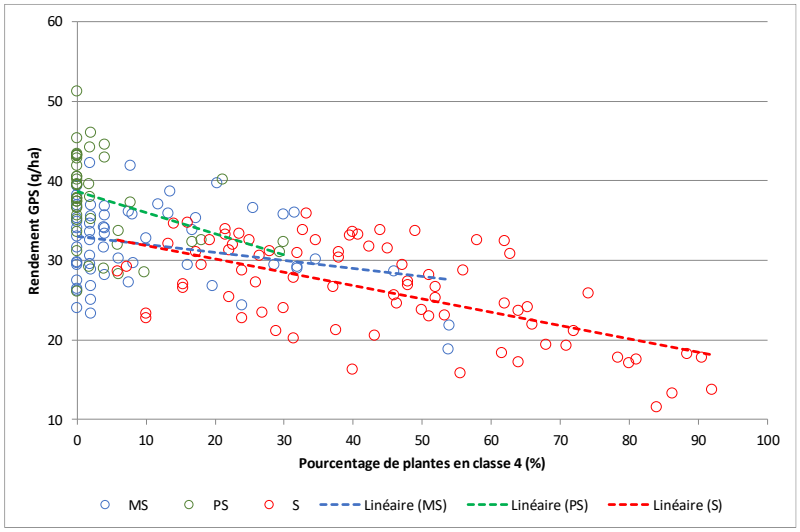


Figure 5 : Relation entre le pourcentage de plantes en classe 4 et le rendement en grains propres et secs (q/ha) sur les 5 essais du dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » pour les variétés S, MS et PS face au verticillium.

Afin de mieux explorer la stabilité de cette relation dégât-dommage entre variétés, une analyse de covariance du rendement a été réalisée à l'aide d'un modèle linéaire construit comme suit :

*Rendement GPS = classement variétal + variété(classement) + essai + indice + {indice verticillium * variété} + Erreur*

Ce modèle a été utilisé sur l'ensemble des 5 essais du dispositif « moissonneuse-batteuse » retenus, une première fois en retenant les quatre classes de comportement variétal (S, MS, PS, TPS) et une seconde fois en ne retenant que les classes S et MS. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 4.

Si l'effet « essai » est toujours significatif, l'interactions entre l'indice verticillium et les variétés ne l'est jamais ; de même, les pentes des variétés ne sont jamais significativement différentes entre elles.

Tableau 4 : Résultats du modèle linéaire d'analyse de covariance pour l'étude de la stabilité de la relation dégât-dommage entre variétés pour le rendement sur les 5 essais du dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » (première notation ; NS = non-significatif).

	Effets	4 classes variétales		Classes variétales S et MS	
Indice verticillium		Modèle : P<0.0001	R^2 modèle : 73%	Modèle : P<0.0001	R^2 modèle : 71%
	Classement	NS à 5%		NS à 5%	
	Variété (classement)	NS à 5%		P=0.0286	
	Essai	P<0.0001		P<0.0001	
	Indice verticillium	P=0.0011		P<0.0001	
	Indice verticillium x variété	NS à 5%		NS à 5%	
	Pentes indice verticillium x variété i	NS à 5%		NS à 5%	

2.6 Une estimation de la nuisibilité complétée avec le dispositif « récolte manuelle »

Sur les essais du dispositif « récolte manuelle », le nombre de capitules récoltés par classe de sévérité de symptômes varie de 1 à 30. Une analyse de risque a été conduite *a posteriori* afin de déterminer à quel nombre minimum de capitules fixer la taille des échantillons pour conserver une fiabilité suffisante des données. Avec les seuils choisis (α=0.05 ; β=0.10 ; CV=10% ; précision=15%), le nombre de capitules minimum à avoir par échantillon s'élève à 15. C'est donc ce nombre qui a été choisi pour sélectionner les données sur lesquelles la suite de l'analyse a été menée.

Du point de vue global (tous essais et toutes variétés confondues), on observe une diminution des performances de la culture avec l'aggravation de la sévérité de la maladie : le poids de grains secs moyen par capitule passe ainsi de 59 g sur plantes saines à 45 g sur les plantes très touchées (classe 4), soit une perte de 24%. De la même manière, la perte de 6,4 g de PMG (13%) et de 4,2 points de teneur en huile sur matière sèche (8%) est mesurée.

Une analyse plus détaillée est basée sur les courbes d'évolution des variables de récolte par variété en fonction de la sévérité des symptômes (Figure 6) et le calcul du pourcentage de perte de ces variables par rapport à la classe de sévérité de symptômes la moins sévère en moyenne sur les essais toutes variétés confondues (Tableau 5). Précisons ici que les données « maladie » sont celles de la seconde notation, le choix des capitules à prélever étant basé sur le dernier niveau de symptôme observé.

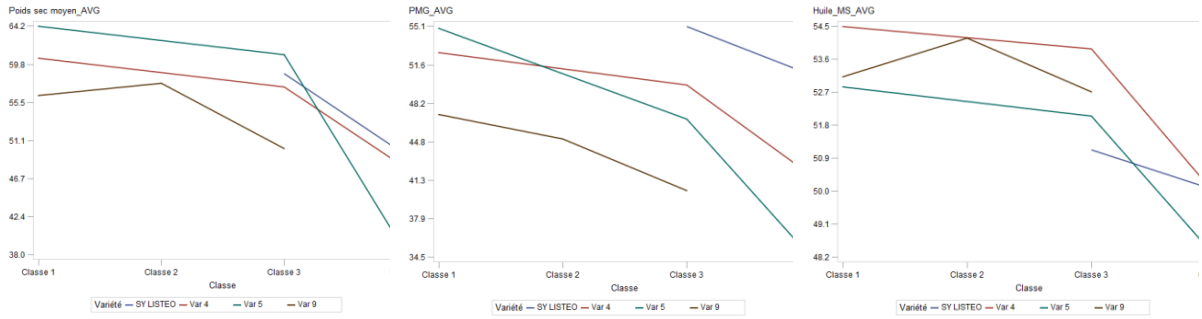


Figure 6 : De gauche à droite, poids sec moyen par capitule (g), PMG moyen (g) et teneur en huile sur matière sèche moyenne (%) par variété en fonction des classes de sévérité de la maladie, sur l'ensemble des 7 essais du réseau « récolte manuelle ».

Tableau 5 : Récapitulatif des pertes moyennes (en pourcentage) de poids sec moyen par capitule, de PMG et de teneur en huile sur matière sèche sur l'ensemble des 7 essais du réseau « récolte manuelle », toutes variétés confondues, entre deux classes de sévérité de symptômes.

		Poids sec en grains moyen par capitule	
Ecart entre classes	Effectif	Perte moyenne (%)	Ecart-type
entre classe 2 et classe 1	2	0.3	-
entre classe 3 et classe 1	11	-6.6	10.2
entre classe 4 et classe 1	2	-27.0	-
entre classe 4 et classe 3	14	-21.4	13.6

		PMG moyen	
Ecart entre classes	Effectif	Perte moyenne (%)	Ecart-type
entre classe 2 et classe 1	2	-1.5	-
entre classe 3 et classe 1	11	-7.2	4.5
entre classe 4 et classe 1	2	-24.9	-
entre classe 4 et classe 3	14	-14.0	9.7

		Teneur en huile sur MS moyenne	
Ecart entre classes	Effectif	Perte moyenne (%)	Ecart-type
entre classe 2 et classe 1	2	-0.8	
entre classe 3 et classe 1	11	-0.8	1.3
entre classe 4 et classe 1	2	-6.9	
entre classe 4 et classe 3	14	-3.9	3.7

En ce qui concerne le poids moyen de grains par capitule, la nuisibilité de la maladie se manifeste principalement entre les classes 3 et 4 : cela s'explique surtout par ce qui se passe sur le témoin sensible SY Listeo et la variété var 5 (MS), car on ne dispose pas de données sur la variété var 9 (TPS) et seulement de l'information sur deux essais pour la variété var 4 (PS). Sur les 14 paires d'échantillons disponibles pour comparer la performance des échantillons issus de deux classes de sévérité de symptômes 3 et 4, toutes variétés confondues, la perte moyenne de poids de grains par capitule s'élève à 21.4% avec un écart-type de 13.6%. Entre les classes de sévérité extrêmes (1 et 4), seules deux comparaisons sont disponibles sur l'ensemble du réseau, ce qui ne permet pas de conclure. Entre les classes 1 et 3 (11 comparaisons), la perte moyenne de production de grains par capitule est faible (-6.6%) mais très variable (écart-type de 10.2%). Toutefois, ce résultat confirme celui obtenu précédemment sur des mesures Terres Inovia (5 variétés, 2 essais) en 2012 : le poids en grains moyen par capitule est principalement affecté lorsque la sévérité de la maladie passe de 20% des feuilles atteintes par plante à 80% des feuilles atteintes, quelle que soit la variété (S à PS).

L'impact de la sévérité de la maladie sur le PMG et la teneur en huile est également le plus important entre les classes 3 et 4 : respectivement -14% (écart-type de 9.7%) et -3.9% (écart-type 3.7%). Une perte notable de PMG (-7.2%) s'observe également entre les classes 1 et 3. Les deux variétés pour lesquelles on dispose de données sur 3 des classes de sévérité de symptômes, var 4 (PS) et var 5 (MS), montrent des courbes très parallèles pour la teneur en huile. Pour le PMG, la nuisibilité sur la variété MS est plus sévère que sur la variété PS.

Les résultats déclinés par variété sont cependant à prendre avec beaucoup de précaution, le nombre d'échantillons par variété pour chaque classe de sévérité de symptômes étant restreint. Toutefois, ce dispositif de récolte manuelle permet de mettre en évidence l'impact de la maladie sur l'ensemble des variables de récolte considérées, cette nuisibilité étant « portée » principalement par la classe de sévérité de symptômes la plus élevée : le dispositif « récolte manuelle » permet ainsi de mettre en évidence une nuisibilité sur le PMG, non détectée sur le dispositif « récolte moissonneuse-batteuse » : 1.3% de perte de PMG par tranche de 10% de plantes en classe 4. Les pertes de poids de grains secs par capitule et de teneur en huile sont estimées respectivement à 2.4% et 0.4 point de teneur en huile par tranche de 10% de plantes en classe 4 sur la gamme de variétés testées.

3. Un nouveau protocole pour le CTPS dans le continuum inscription – post-inscription

A la suite à ce travail, on dispose aujourd'hui d'une meilleure caractérisation de la nuisibilité de la maladie dans les conditions françaises. Le réseau d'essais mis en place a permis de poser les bases d'un protocole de caractérisation des variétés pour le CTPS, permettant une valorisation optimale des données dans le cadre du continuum inscription-post inscription.

L'objectif de ce protocole est double :

- Mettre en évidence les variétés à très bon comportement, c'est-à-dire qualifier « Verti + » les variétés pour lesquelles la maladie engendrera une perte de rendement inférieure ou égale à 2 q/ha (moins de 10% de plantes très touchées),
- Disposer de données valorisables dans le cadre du continuum inscription - post inscription, avec une méthode de notation de la sévérité de la maladie harmonisée en 4 classes.

Dorénavant, les obtenteurs peuvent demander l'évaluation de leur variété face au verticillium dès les épreuves d'inscription. Cette nouvelle opportunité s'inscrit dans le cadre du plan « Semences et Plants pour une Agriculture Durable » 2015-2019 du CTPS.

Remerciements

La coordinatrice du projet souhaite remercier très vivement les équipes d'appui du GEVES pour la fourniture des équipements informatiques de terrain, et plus spécialement Corinne Rudelle qui s'est consacrée à la gestion administrative des personnels techniques-clés de ce projet.

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation à travers le projet CASDAR n°C2015-08 « Caractérisation des variétés de tournesol face au verticillium : mise au point d'un protocole en lien avec la nuisibilité de la maladie », associant Terres Inovia, INRAE et le GEVES et proposé dans le cadre d'un soutien méthodologique aux Sections CTPS.

Références bibliographiques

Bertero de Romano A.B., Vazquez A., 1985. Estimacion de perdidas de rendimiento para distintas intensidades de ataque. In: Proceedings of 11th International Sunflower Conference, ISA, Mar del Plata (Argentina), p. 379–383.

BSV, 2014. Bilan 2014 tournesol soja. Edition Midi-Pyrénées & Aquitaine, 14 p. http://www.mp.chambagri.fr/IMG/pdf/BSV_BILAN_Tournesol_Soja_2014.pdf.

Creus C., Bazzalo M.E., Grondona M., Andrade F., Leon A.J., 2007. Disease expression and ecophysiological yield components in sunflower isohybrids with and without *Verticillium dahliae* resistance. Crop Science 47, 703–710.

Jouffret P., Palleau J.P., 2012. Verticilliose du tournesol : la tolérance variétale, un bouclier efficace. Perspectives Agricoles 385, 62-64.

Lecomte V., 2013. Verticillium du tournesol : une implantation confirmée en 2012 dans le Sud-Ouest. *Cultivar* janvier 2013 : 38-39.

Mestries E., Lecomte V., 2012. Tournesol et verticillium : état des lieux et moyens de lutte dans le sud-ouest. Rencontres Techniques Régionales CETIOM, Ondes (31), 6 décembre 2012, 44-48.

Mestries E., 2013. Tournesol : lutter contre le Verticillium grâce aux variétés. *Perspectives Agricoles* 406, 24-28.

Pereyra V., Quiroz F., Aguero M.E., Escande A., 1999. Relacion del rendimiento de girasol con la intensidad de sıntomas provocados por *V. dahliae*. *In*: *Proceedings of the X Jornadas Fitosanitarias Argentinas*, Jujuy, Argentina, p. 35.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL).