

Journée Technique Grandes Cultures Biologiques

Quelle contribution de la
recherche face aux obstacles
techniques ?



Paris
Lundi 5 février 2007

PROGRAMME

Accueil et café à partir de 9h15

9h45 Introduction

Etienne Gangneron, Président de la Commission Grandes Cultures de l'ITAB

9h55 Maîtriser la culture du colza biologique

10h00 Les bases de la conduite du colza en agriculture biologique

Lionel Quéré, CETIOM (sous réserve)

10h10 Les facteurs agronomiques de réussite en colza biologique

Joseph Pousset, agriculteur dans l'Orne et conseiller en agriculture biologique (sous réserve)

10h35 Semis et fertilisation du colza en bio : bilan de trois années d'essai en Picardie

Gilles Salitot, Chambre d'Agriculture de l'Oise

11h05 Valorisation du colza à la ferme : l'exemple d'une expérience bretonne

Jean-Luc Audfray, Chambre d'Agriculture du Morbihan

11h30 Témoignage d'agriculteurs, Daniel Evain (Essonne) et Eric Petit (Maine-et-Loire)

12h00 Débat : le colza en agriculture biologique, atouts et contraintes, pistes de recherche — *Animé par Bertrand Chareyron, Chambre d'Agriculture de la Drôme*

12h30 Déjeuner – Buffet bio

13h55 La gestion du paysage pour favoriser les auxiliaires de culture : Quelles pistes de recherche ?

14h00 La gestion du paysage pour gérer les auxiliaires de culture

Jean-Pierre Sarthou, ENSA Toulouse

14h35 Taille et forme des parcelles, quelle influence ?

Philippe Viaux, Arvalis-Institut du végétal

14h45 Débat : quelles pistes de recherche pour lutter contre les insectes ravageurs en oléo-protéagineux bio ? *Animé par Philippe Viaux, Arvalis-Institut du végétal*

15h10 La carie commune du blé : comment y faire face ?

15h15 Biologie des champignons *Tilletia caries* et *Tilletia faetida*

Daniel Caron, Arvalis Institut du végétal

15h45 Etat des lieux des connaissances : préconisations, pistes de recherche

Marianne Hédont et Laurence Fontaine, ITAB

16h15 Débat : comment contenir la carie du blé ?

Animé par Yves Chabanel, Arvalis-Institut du végétal

16h55 Conclusion *Etienne Gangneron, Président de la Commission Grandes Cultures*

17h00 Clôture de la journée

SOMMAIRE

Programme.....	1
Sommaire.....	3
Introduction - Maitriser la culture du colza en agriculture biologique	7
La conduite du colza biologique.....	8
quelques éléments sur la culture naturelle du colza en agriculture biologique	10
Semis et fertilisation du colza en agriculture biologique : bilan de trois années d'essais en Picardie	16
Double valorisation du colza à la ferme (article de Jean-Luc AUDFRAY, CA 56)	20
témoignage d'un agriculteur biologique.....	23
du maine-et- loire	23
Colza : à chacun son itinéraire technique (Article de C. Rivry-fourrier, Biofil 41).....	25
La conduite du colza en agriculture biologique : une utopie ou bientôt une réalité ? (Article de M. Valantin Morison, Alter agri 60).....	29
Effets allélopathiques des brassicacées via leur action sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhyses : analyse bibliographique (Articles OCL vol.12 N°4, 2005).....	34
Introduction – la gestion du paysage pour favoriser les auxiliaires de culture Quelles pistes de recherche ?	55
Potentialités de la lutte biologique par conservation et gestion des habitats en grandes cultures.....	56
Dossier Biodiversité (JP.Sarthou, Alter Agri 76).....	67
impact des pratiques culturales sur les arthropodes (P.Viaux, Alter Agri 66)	74
Introduction – La carie commune du blé : comment y faire face ?	81
La carie.....	82
Etat des lieux des connaissances sur la carie commune : préconisations, pistes de recherche	88
La carie en production de semences de céréales bio : une lutte préventive s'impose	97
Agriculture biologique et production de blé tendre : une vigilance à l'égard de la carie (Article de B. Seguin, Alter Agri 63).....	100
Les caries du blé : des maladies dont il faut toujours se méfier (Article de G.Raynal, Phytoma 1997).....	102

Gilles SALITOT (Chambre d'Agriculture de l'Oise)

Daniel CARON (ARVALIS – Institut du végétal)

Bernard SEGUIN (Arvalis-Institut du végétal)

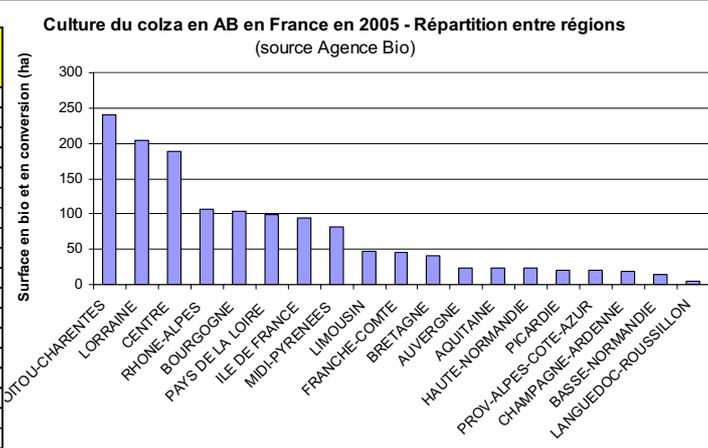
Laurence FONTAINE (ITAB)

MAITRISER LA CULTURE DU COLZA BIOLOGIQUE

INTRODUCTION - MAITRISER LA CULTURE DU COLZA EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Le colza est une plante gourmande en azote (lequel est précieux en bio !) et sensible aux insectes ravageurs ; sa culture est difficile et les risques de rendement très limité importants. Ses atouts (débouchés intéressants, intérêts agronomiques variés) la rendent néanmoins attractive. De plus en plus de producteurs s'y intéressent, notamment pour la production d'huile alimentaire, mais la surface totale de colza cultivé en bio en France reste modeste (1 400 ha au total ; cf tableau ci-dessous). Face aux difficultés techniques, la recherche se doit d'apporter des réponses au questionnement des agriculteurs.

Région	Nb producteurs	Surface en bio (ha)	Surface en conversion (ha)	Surface totale (ha)
POITOU-CHARENTES	26	234	5,6	240
LORRAINE	6	173,8	30,1	204
CENTRE	26	176,2	12,9	189
RHONE-ALPES	29	86,4	19,9	106
BOURGOGNE	31	55,5	47,9	103
PAYS DE LA LOIRE	23	86,9	11,3	98
ILE DE FRANCE	7	94,2		94
MIDI-PYRENEES	16	78,1	4	82
LIMOUSIN	5	47,5		48
FRANCHE-COMTE	7	44,9		45
BRETAGNE	15	36,9	4	41
AUVERGNE	6	24,3		24
AQUITAINE	9	23,3		23
HAUTE-NORMANDIE	9	14	9	23
PICARDIE	18	20,6		21
PROV-ALPES-COTE-AZUR	5	20,1		20
CHAMPAGNE-ARDENNE	7	19,3		19
BASSE-NORMANDIE	4	12	2	14
LANGUEDOC-ROUSSILLON	3	5		5
ALSACE	1	nd	nd	nd
DOM	0			0
CORSE	0			0
Total France	253	1253	146,7	1399,7



COMMUNICATIONS ORALES

- **Les bases de la conduite du colza en agriculture biologique** (*Lionel Quéré, CETIOM*)
- **Les facteurs agronomiques de réussite en colza biologique** (*Joseph Pousset*)
- **Semis et fertilisation du colza en bio : bilan de trois années d'essai en Picardie** (*Gilles Salitot, Chambre d'Agriculture de l'Oise*)
- **Double valorisation du colza à la ferme : huile + tourteau** (*Jean-Luc Audfray, Chambre d'Agriculture du Morbihan*)
- **Témoignage d'agriculteurs :**
 Itinéraire technique du colza chez Eric Petit (*Renan Maurice, Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire*)
 Article BioFil n°41 - Colza : à chacun son itinéraire technique (interview de Daniel Evain et Eric Petit) – (*Christine Rivry-Fournier, BioFil*)

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

- Muriel Valantin-Morison, 2003. *La conduite du colza en agriculture biologique : une utopie ou bientôt une réalité ?* Alter Agri n° 60, p7-11.
- Raymond Reau et al., 2005. *Effets allélopathiques des brassicacées via leur action sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes : analyse bibliographique.* OCL, vol.12 n°4, 261-271, 314-319.

LA CONDUITE DU COLZA BIOLOGIQUE

Lionel QUERE

CETIOM - Centre de Grignon

BP 4 - 78850 THIVERVAL-GRIGNON

quere@cetiom.fr

Plus d'informations sur www.cetiom.fr, rubrique colza/colza bio

Le colza présente des intérêts pour une rotation en agriculture biologique : bon précédent à blé, amélioration de l'état structural du sol, piège à nitrates etc., mais sa culture comporte aussi des limites, liées notamment à sa forte demande en azote et sa sensibilité aux ravageurs. Sauf si un apport de matière organique à minéralisation rapide est possible avant le semis, il est préférable d'implanter le colza derrière une culture à bon reliquat azoté (luzerne, pois etc.).

Deux grands types de conduites sont préconisés selon le contexte de la parcelle. S'il existe la possibilité d'assurer un démarrage rapide du colza (sol profond riche en azote, apport de MO à minéralisation rapide au semis), il est préconisé d'avancer le semis d'environ deux semaines pour rapidement couvrir le sol, étouffer les adventices, maximiser l'absorption d'azote et aussi éviter la concurrence des ravageurs défoliateurs (limaces, altises, tenthrèdes). Si cette possibilité n'existe pas, semer le colza à date normale. Dans tous les cas, le labour est fortement conseillé pour faciliter la gestion des adventices, ainsi que le faux-semis, même si cette pratique reste difficile à mener en interculture courte.

Le choix de l'écartement se fera selon le salissement attendu : si la parcelle est potentiellement sale, se laisser la possibilité de biner en semer à grand écartement (minimum 30 cm). Viser 30-40 plantes/m² levées.

Le choix variétal repose sur les critères suivants : résistances aux maladies, notamment le phoma, repos végétatif marqué pour limiter le risque d'élongation sachant que l'on essaie de favoriser un démarrage rapide du colza, et enfin une période boutons accolés – floraison courte pour réduire la durée de sensibilité aux attaques de méligèthes.

La lutte contre les adventices passe dans un premier temps par la stratégie de l'étouffement dans les situations où elle est possible (sols profonds, riches en azote). Celle-ci s'est révélée efficace dans les essais à condition d'une disponibilité en azote minimale (autour de 100 unités disponibles au semis), d'avoir effectué un labour, et d'obtenir un peuplement suffisamment dense et homogène. Ensuite, le recours aux outils mécaniques vient compléter cette stratégie préventive. La herse étrille est utilisable en prélevée, puis à partir du stade 4 feuilles du colza. La houe rotative, plus sélective, est utilisable de la prélevée au stade 5-6 feuilles. Ces deux outils ne seront efficaces que sur des adventices très jeunes (au plus 3 feuilles) ; la précocité de leur passage est donc le premier gage de réussite, ainsi que le renouvellement des passages pour gérer les relevées et les mauvaises herbes à levées échelonnées (vulpin par exemple). La bineuse sera efficace sur des adventices plus développées, et complète donc bien l'action des deux premiers outils.

Il faut 6,5 à 7kg d'azote pour produire un quintal de colza. Un apport avant semis est préconisé avec un produit à minéralisation rapide (fientes, vinasse, lisier). Un produit de type compost de déchets verts ou de fumier ne pourra assurer un démarrage rapide du colza, et donc favoriser sa compétition face aux adventices et ravageurs. Au printemps, si l'on constate que le colza n'a pas absorbé suffisamment d'azote durant l'hiver pour atteindre l'objectif de rendement (d'où l'intérêt de la pesée sortie hiver), il est nécessaire de réaliser un apport, encore une fois avec un produit qui mettra de l'azote immédiatement à disposition du colza pour lui permettre de réaliser la montaison et la ramification.

Le colza a besoin de 2 kg de soufre par quintal de graines exporté, soit 50 kg pour un potentiel de rendement de 25 quintaux/ha. Vérifier la teneur en soufre de la MO apportée avant de décider d'un apport éventuel complémentaire.

Les insectes restent un risque potentiel très grave, contre lesquels aucune solution très efficace n'existe. A l'automne, l'avancement du semis peut permettre de limiter les attaques de limaces et altises, mais augmente le risque de mouche du chou. Au printemps, les méligèthes sont les insectes les plus problématiques. Seule la technique des plantes pièges peut apporter une solution, même si celle-ci reste imparfaite. Elle consiste soit à semer autour de la parcelle un bande d'une variété à floraison plus précoce que la variété principale, soit à mélanger à raison de 10% par exemple cette variété au reste de la semence. Les méligèthes se concentreront sur ces plantes plus précoces, épargnant ainsi les autres plantes pendant leur période de sensibilité (stade boutons). Mais cette technique ne permet de lutter que dans le cas d'infestation modérée, si la pression méligèthes est trop forte, ce dispositif sera inefficace. La mise en place d'une cuvette jaune est aussi un bon élément de suivi des populations d'insectes, même si aucune solution insecticide n'est autorisée en bio une fois que la présence d'un insecte est détectée sur la parcelle.

La récolte doit débuter même si certaines siliques sont encore vertes, vers 15% d'humidité. Si l'on attend trop (moins de 8% d'humidité), les pertes par égrenage (ajoutées aux pertes liées au chantier de récolte) peuvent dépasser 3 q/ha.

La conduite du colza en agriculture biologique reste toutefois risquée, pour plusieurs raisons : nécessité d'assurer une bonne alimentation azotée, lutte contre les adventices difficile, attaques d'insectes difficiles à maîtriser et qui peuvent fortement réduire un potentiel de rendement jusqu'alors bon. Pour ces raisons, il peut être pertinent de réserver la culture de colza en bio à des situations particulières, notamment dans les exploitations disposant d'une source d'azote (élevages) et dans les régions à pression insectes et maladies modérée.

QUELQUES ELEMENTS SUR LA CULTURE NATURELLE DU COLZA EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Joseph POUSSET
Rochereuil-la-Bellière
61200 ARGENTAN

1 LE COLZA OLEAGINEUX

Son nom scientifique est *Brassica napus oleifera*. Certains pensent qu'il proviendrait d'une hybridation (croisement de deux espèces différentes) entre le chou (*Brassica oleraceas*) et la navette (*Brassica campestris*). D'autres estiment qu'il s'agit d'une variété particulière de *Brassica napus*, le navet.

Quoiqu'il en soit il est cultivé depuis des siècles en Chine, en Russie et en Europe du Nord mais seulement depuis le 18^{ème} siècle en Europe de l'Ouest.

En France vers 1800 le colza n'était cultivé que dans le département du Nord. Puis son aire s'est étendue rapidement jusque vers les années 1860 pour dépasser 200.000 hectares en 1863. Ensuite elle a beaucoup régressé et ne dépassait guère 5.000 hectares juste avant la seconde guerre mondiale.

Pourquoi ? Parce que le prix de sa graine a beaucoup diminué devant la concurrence des oléagineux provenant du Sénégal, de l'Inde, de l'Egypte. C'est également l'époque où le pétrole monte en puissance et commence à remplacer les huiles végétales. On considère d'ailleurs à ce moment-là que les produits pétroliers vont tout balayer durablement car ils proviennent de « sources pour ainsi dire illimitées » (Encyclopédie Agricole sous la direction G. Wery, 1928) !

On pouvait alors logiquement penser, à l'époque, que sa culture disparaîtrait en France. En fait il n'en a rien été, au contraire. Sa surface était de 129.800 hectares en 1952. L'augmentation est due à une utilisation accrue de l'huile de colza pour la consommation humaine et le graissage des machines.

C'est surtout à partir de la fin des années 1960 que la progression est régulière. Plusieurs raisons expliquent cette évolution. La disparition de l'élevage dans les grandes régions céréalières entraîne celle des prairies temporaires et des légumineuses pluriannuelles comme la luzerne. Il s'ensuit un manque de têtes de rotation que le colza peut combler au moins partiellement. La politique agricole européenne permet des prix intéressants et réguliers. Sur le plan technique l'utilisation accrue et généralisée des herbicides et des insecticides rend plus aisée la culture du colza sur de vastes surfaces et son retour fréquent dans la rotation.

La production a particulièrement augmenté depuis le début des années 1990 en Europe. La surface en colza française était d'environ 1,3 millions d'hectares en 2006. Nous sommes bien loin des 5.000 hectares de 1939 !

Depuis quelques années la perspective de l'épuisement des ressources pétrolières se dessine plus nettement et constitue un encouragement supplémentaire aux cultures énergétiques.

Cela est paradoxal car une des raisons de l'augmentation des surfaces consacrées au colza est précisément l'utilisation massive des engrais et des pesticides issus directement ou indirectement de l'industrie chimique pétrolière...

Le défi à résoudre est donc de produire cette plante plus que jamais nécessaire en faisant le moins possible appel à un des facteurs qui ont favorisé son développement...

Autrement dit : nous devons, pour être cohérents, produire le colza le plus possible dans le cadre d'une agriculture naturelle.

Comment opérer ?

2 QUELQUES CARACTERES BOTANIQUES INTERESSANT LE PRATICIEN

Le colza possède une racine pivotante et une tige rameuse, ses fleurs sont disposées en grappes. Ses fruits sont des siliques contenant de très petites graines particulièrement riches en huile (plus de 40 %).

Semé en fin d'été le colza d'hiver développe une rosette d'une vingtaine de feuilles séparées par des entre-nœuds. Il se maintient sous cette forme pendant l'hiver. Son pivot racinaire accumule des réserves qu'il utilise pour effectuer sa végétation au cours de la belle saison. C'est une plante à installation plutôt lente.

La floraison débute de bonne heure, nettement avant le développement total de la plante. De ce fait elle est très échelonnée et dure souvent plus d'un mois.

La formation du fruit et la maturation des graines sont rapides, un mois et demi à deux mois environ après la fécondation.

A maturité les siliques s'ouvrent au moindre choc. On doit donc faire attention à l'égrenage.

Comme dans le cas du blé il existe des « types hiver » et des « types printemps ». Les premiers ont un stade rosette long, exigent une période froide suffisamment étendue pour accomplir convenablement leur cycle végétatif et résistent bien aux basses températures. Les seconds présentent un stade rosette bref, résistent moins bien aux baisses sévères du thermomètre et n'ont pas besoin de froid pour accomplir leur végétation.

Les froids intenses, à partir de - 12° C ou - 13° C peuvent occasionner des dégâts au colza d'hiver, surtout s'ils surviennent brutalement et que l'allongement des tiges est important. Ce dernier est amplifié par la densité du semis. On ne doit donc pas semer trop dru.

Le colza se développe évidemment le mieux en terre profonde et saine mais ne craignant pas la sécheresse. Sur ce plan ses exigences ressemblent à celles du blé. L'acidité du sol lui est défavorable.

Plante de climat tempéré et humide il a besoin d'eau pendant toute sa période végétative mais un excès de pluie au moment de la fécondation des fleurs est préjudiciable. Notamment parce qu'il gêne les insectes pollinisateurs.

3 LES QUESTIONS CULTURALES PRINCIPALES A RESOUDRE

Plante à végétation lente au départ, tout au moins en ce qui concerne les variétés d'hiver, le colza craint la concurrence des adventices.

Sa « gourmandise » en azote, potasse et soufre exige de le cultiver préférentiellement sur les terres riches, de bien le placer dans la rotation et de maîtriser au mieux le fonctionnement de l'« usine » du sol pour qu'elle libère au bon moment les éléments nécessaires.

Divers parasites et ravageurs s'attaquent au colza. La maladie du pied noir (*Phoma lingam*) détruit les plantules et la base des tiges plus âgées, la maladie des taches noires (*Alternaria brassicae*) attaque feuilles et tiges au printemps.

Côté ravageurs on redoute les altises (la petite et la grosse altise) qui rongent feuilles et tiges, les méligèthes, petits coléoptères qui mangent les bourgeons. Diverses espèces de charançons s'attaquent aux bourgeons terminaux, aux tiges, aux siliques. Les larves de la cécidomye dévorent également ces dernières. La chrysomèle des crucifères peut également poser problème dans les régions chaudes.

La larve de la tenthrède de la rave consomme les parties aériennes de la plante. A ma connaissance elle sévit surtout dans les secteurs où le colza est très cultivé.

Et n'oublions pas les limaces dont la plupart des espèces sont très friandes de colza.

4 PLACE DU COLZA DANS LA ROTATION

En culture classique utilisant les engrais chimiques le colza est souvent placé après un blé, avec de bons résultats.

La même chose est possible en agriculture n'utilisant pas d'engrais chimiques mais il existe alors un risque que la plante manque d'azote au début de sa végétation et d'autres éléments (potasse et soufre notamment) ensuite.

Conséquences fâcheuses possibles : pression accrue des mauvaises herbes, manque de vigueur avant l'hiver favorisant les dégâts par le gel...

On peut alors être tenté de remplacer la fumure « chimique » par des engrais organiques : fumier, compost, lisier, engrais organiques divers du commerce...

Le succès est possible à condition que cette fumure ait une action rapide. Le fumier, surtout s'il est pailleux, est de ce fait à éviter car il ne fournit ses éléments, notamment l'azote, qu'après une période de décomposition plus ou moins longue. De ce fait il est préférable de l'apporter sur la culture précédant le colza et non directement sur ce dernier.

Par contre compost mûr, lisier, purin, guano, poudre de plumes, etc. agissent vite sur les plantes. On peut les épandre peu de temps ou même parfois juste avant le semis.

Des apports sont possibles aussi, avec quelques précautions (attention aux brûlures par lisier ou purin trop concentrés) en cours de végétation avant l'hiver ou même jusqu'au début du printemps.

Mais attention car un excès d'azote par rapport aux besoins du colza à un moment donné favorise les parasites et les ravageurs. Il peut même diminuer la teneur en huile et augmenter de façon gênante l'hétérogénéité de la maturation des graines.

N'oublions pas que la terre peut contenir des reliquats azotés conséquents en fin d'été, même après céréale, de l'ordre de 150 unités ou davantage, cela notamment grâce au travail microbien de l'été bien orienté. Tout enfouissement de matériaux celluloseux (paille...) est à proscrire dans cette optique à cause de l'effet dépressif qu'il provoque sur la disponibilité de l'azote pour les plantes.

Pour toutes ces raisons vouloir remplacer complètement la fumure chimique par une fumure organique est impossible et erroné. Impossible car la quantité et la disponibilité de l'azote « chimique » sont difficiles à reproduire par des engrais organiques. Erroné car une bien meilleure solution existe.

Laquelle ? celle de l'utilisation de l'« usine » du sol bien sûr !

Dans le cas présent elle se traduit d'abord par le choix d'un précédent légumineux ou prairie temporaire.

La prairie, la luzerne, les trèfles (trèfle violet, trèfle blanc, trèfle incarnat...), la féverole, les pois, etc. sont en effet les meilleurs antécédents du colza.

Une mention pour la minette dont les sécrétions radicaires semblent particulièrement bénéfiques au colza.

Dans le cas où on fait malgré tout précéder le colza par une céréale il me semble particulièrement bienvenu d'associer cette céréale à une légumineuse et tout spécialement une minette (une dizaine de kg/ha si le lit de semences est bon). Le colza lui-même peut être associé à un peu de minette (5 à 10 kg/ha).

Après culture sarclée telle que pomme de terre récoltée de bonne heure, propre et sur terrain riche ou bien fumé le colza peut aussi donner de très bons résultats.

Certes il n'est pas habituel de « bichonner » ainsi le colza dans la rotation mais cela me semble nécessaire, sauf cas particulier de terre très fertile, si l'on veut mettre toutes les chances de son côté en agriculture naturelle.

Par ailleurs faire revenir le colza plus souvent que tous les 4 ou 5 ans au même endroit augmente de façon dangereuse les risques de maladies et de pullulations de ravageurs.

Autre chose : après récolte du colza faites lever au mieux et détruisez les repousses qui sont parfois gênantes dans les cultures qui suivent.

5 TRAVAIL DU SOL, SEMIS ET LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES

On recommande habituellement de semer le colza avant le 15 septembre dans la moitié nord de la France.

Il me semble que dans le cadre de l'agriculture naturelle semer un peu avant la mi-août, toujours dans le nord de la France, est souhaitable.

Pourquoi ? Parce qu'une plante bien développée avant l'hiver résiste mieux aux adventices, aux parasites, aux ravageurs, au gel.

Il est vrai qu'un semis trop précoce (avant la mi-juillet) pourrait provoquer un début de floraison avant l'hiver, ce qu'il faut éviter évidemment.

Attention : parler de développement suffisant avant l'hiver sous-entend que cette végétation a été obtenue par un semis précoce, bon précédent, travail du sol judicieux, bonne teneur en

matières organiques du terrain, etc. pas par un « forçage » azoté, même organique, qui sensibilise la plante aux adventices, ravageurs et parasites et probablement au froid.

Le dérèglement climatique dû à l'augmentation de l'effet de serre nous entraîne sans doute vers des automnes plus doux qui vont peut-être autoriser dans l'avenir des semis plus tardifs. Gardons pour l'instant ce repère de la mi-août dans la région parisienne.

Cela rend difficile l'installation après céréale car le délai disponible entre la récolte du précédent et le semis du colza est trop bref pour réaliser un travail du sol correct selon les principes de l'agriculture naturelle. Les façons inversées, notamment, avec leurs opérations de déstockage et de faux semis deviennent impossibles, surtout s'il fait sec.

Certes il reste la possibilité de suivre un itinéraire du genre : déchaumage, labour, façons superficielles puis semis mais cela doit rester rare sinon la pression des adventices risque plus ou moins rapidement de devenir insupportable en l'absence d'herbicides.

Conséquence rejoignant la question de la rotation : faire précéder le colza par des cultures ou des engrais verts récoltés ou détruits de bonne heure, au début de l'été, courant juin par exemple. Les mélanges céréaliers ensilés, le trèfle incarnat, les luzernes ou trèfles violets dont on ne récolte que la première coupe annuelle, la vesce (fourrage ou engrais vert), etc. conviennent dans ce type d'itinéraire cultural.

On fait suivre récolte ou destruction par mulchage et façons culturales inversées dans lesquels déstockages, faux semis et lutte contre racines et rhizomes des pluriannuelles doivent tenir une place de choix, ils conditionnent en effet la propreté du futur colza.

Il convient surtout de bien réussir la destruction du faux semis (ou du dernier d'entre eux si vous en effectuez plusieurs). La propreté du lit de semences influence en effet beaucoup celle de la culture.

Comment faire en période sèche ? Faut-il semer ou non ?

Déstockages et faux semis ne donnent guère de résultat car les graines de mauvaises herbes ne germent pas faute d'humidité.

On est alors tenté de semer mais la culture risque de se salir énormément dès que les premières pluies vont entraîner sa levée, choix délicat. En terre sale attendre est prudent de manière à nettoyer au moins le lit de semence après les premières levées. En terre propre il est possible de prendre plus de risques.

Quoiqu'il en soit il est toujours dangereux de semer du colza dans une terre très sèche qui a été légèrement humidifiée par une petite pluie passagère. Le passage du semoir risque alors d'assécher certaines zones et de provoquer une levée très hétérogène compromettant la réussite de la culture. Dans cette hypothèse il vaut beaucoup mieux semer avant la pluie.

Un lit de semence fin sans excès, nivelé et raisonnablement rappuyé est bienvenu. Il autorise un semis clair et précis permettant d'obtenir des plants vigoureux, pas trop hauts, ramifiés, supportant bien le froid et productifs. Productifs car bien aérés et éclairés donc résistant mieux aux maladies, productifs également car les insectes pollinisateurs les visitent plus facilement.

Peuplement clair sous-entend une densité de 20 à 30 plantes par mètre carré soit environ 3 kg de semences par hectare.

On peut semer encore plus clair et viser une densité très faible de pieds 10 par mètre carré. Au début du vingtième siècle on pratiquait une telle culture très claire du colza soit par le biais du démariage d'un semis en rangs très écartés (50 cm), soit par repiquage. Dans ce dernier cas on comptait environ 20 ares de pépinière pour un hectare de culture.

L'écartement entre rangs peut varier beaucoup, en gros depuis celui adopté pour les céréales, 15 à 20 cm, jusqu'à 40 ou 50 cm.

Dans le premier cas le sarclage avec une bineuse n'est pas possible mais on peut éventuellement utiliser une herse sarcleuse dès que le colza peut la supporter. C'est-à-dire, en gros, lorsqu'il possède 4 feuilles. La vitesse de travail et les réglages de profondeur et d'inclinaison des dents doivent bien sûr être judicieux. Un essai préalable s'impose dans chaque situation selon la texture du terrain, l'humidité, la présence ou non de cailloux, etc.

La houe rotative peut aussi rendre service, en terrain pas trop caillouteux car les pierres bloquent parfois la rotation des disques dentés.

Elle est souvent utilisable sur la culture plutôt que la herse. En revanche elle ne l'est plus guère après l'apparition des 6 ou 7 premières feuilles. Là encore un essai est indispensable dans chaque cas.

Il est possible aussi parfois dans le cas de terres propres, rotation judicieuse, de travail du sol très bien conduit, de culture bien réussie parce que l'année est favorable, en particulier dans les domaines de la pluviométrie et de la nitrification, que tout sarclage soit inutile si les rangs sont assez rapprochés. Dans ces conditions en effet le colza lève et couvre le sol rapidement, dominant les quelques adventices apparues. Bien des soucis sont évités quand cette heureuse situation se produit.

Dans le cas des grands écartements, supérieurs à 30 centimètres, le passage d'une bineuse est quasi nécessaire, surtout bien sûr en terre sale et lors des années difficiles (période sèche prolongée suivie d'une brusque pluviométrie importante, temps doux prolongé en automne favorisant des pluriannuelles comme les rumex...). Un ou deux binages en automne et un au printemps constituent un bon ensemble d'interventions.

Effectuez le premier passage aussi tôt que possible, dès que les rangs sont visibles en prenant soin de ne pas abîmer les plants. Allure lente obligatoire et grattage léger pour arracher les jeunes adventices sans remonter de nouvelles graines d'adventices qui infesteraient la culture par la suite.

On peut bien sûr, quand c'est possible et qu'on le juge utile, associer judicieusement l'action de la houe rotative, de la herse sarclouse et de la bineuse...

Les hersages en prélevée, entre le semis du colza et sa levée, sont parfois possibles mais souvent risqués car la graine est enterrée très superficiellement et le risque de briser son germe élevé.

Comme toutes les crucifères le colza est assez fortement allélopathique. Il possède donc une capacité d'autodéfense contre la flore adventice.

Mais cette capacité est amoindrie par la sélection, trop orientée vers la productivité et, probablement, par le mauvais état de beaucoup de sols.

6 MAITRISER PARASITES ET RAVAGEURS

Les limaces peuvent causer de grands dégâts au colza, surtout lors de certaines périodes de temps doux et humide.

L'émiettement suffisant du sol par des passages d'outils à dents et des roulages tue une partie des limaces et gêne les autres en brisant les mottes de terre sous lesquelles elles s'abritent.

Des interventions anti-limaces sont tolérées par le cahier des charges de la culture biologiques : avec le métaldéhyde (dans certaines conditions), l'orthophosphate de fer ou encore à l'aide de spécialités de la lutte biologique (nématodes)...

Face aux insectes ravageurs pensons d'abord à donner ou redonner au colza une bonne résistance en appliquant les bons principes culturaux de base (fumure azotée nulle ou modérée et bien positionnée, travail du sol judicieux, etc.) et à ne pas faire revenir le colza plus souvent que tous les 3 ou 4 ans dans la rotation, surtout si on se trouve dans une région où sa culture est répandue. Certains anciens affirment que pendant la deuxième guerre mondiale, période de pénurie d'intrants, le colza était moins attaqué...

Ne sous-estimons pas l'importance de la régénération des semences. Il me paraît important de produire ses propres semences « naturelles » si on veut que les plantes retrouvent rusticité et vigueur.

A part cela le semis précoce favorise une bonne croissance et donc une meilleure défense vis-à-vis des altises, limaces, tenthrèdes qui sévissent en automne... Par contre il est peu ou pas efficace contre ceux du printemps (charançons, cécidomyes, méligèthes...).

Un dispositif intéressant face aux insectes attaquant le colza au printemps, surtout les méligèthes : celui des plantes pièges. Ce sont des crucifères à floraison précoce que l'on mélange au colza à protéger ou que l'on cultive en bandes autour de la parcelle concernée. Les ravageurs se concentrent sur ces plantes plus avancées en végétation et attaquent moins le colza. Les bandes de navette autour des champs semblent particulièrement efficaces. Je pense cependant que ces bandes doivent être détruites ou récoltées dès qu'elles ont joué leur rôle pour ne pas devenir des réservoirs de ravageurs pour les années suivantes.

Les insecticides végétaux tolérés en culture biologique (roténone...) peuvent être utiles si on les applique avec une grande précision en s'aidant éventuellement des conseils diffusés par

les organisations professionnelles spécialisées qui suivent l'évolution des populations d'insectes. Leur coût élevé et leur durée d'action faible limitent cependant leur intérêt.

Les préparations à base de plantes (décoction d'ortie, de prêle...) rendent parfois service mais leur action est souvent difficile à prévoir. L'eau savonneuse est souvent efficace contre le puceron cendré.

La levée lors des pluies succédant à une période sèche est une étape délicate au cours de laquelle il faut bien surveiller limaces, altises, tenthrèdes... Les chenilles de cette dernière peuvent dévorer une jeune culture en quelques jours. Une application d'insecticide végétal peut alors se révéler efficace si elle est bien positionnée. En effet les larves ne sont pas encore bien protégées par le feuillage peu développé.

Les parasites sont bien moins gênant que les ravageurs dans la culture du colza. Ils causent peu ou pas de dégâts si on respecte les bons principes culturaux de base.

7 ET LE COLZA FOURRAGER ?

Dans les fermes d'élevage le colza peut être cultivé comme fourrage disponible pendant presque toute l'année si les variétés sont bien choisies et les semis échelonnés convenablement.

Il est tout à fait possible de cultiver du colza comme fourrage et de le récolter éventuellement à graines en cas d'excédents, attention au choix des variétés.

A l'inverse cultiver du colza oléagineux et l'utiliser comme fourrage est envisageable en cas de pénurie fourragère ou si la récolte à graines est compromise, par exemple en raison d'un important salissement accidentel.

Cet article constitue le texte de la dernière fiche "Biodoc".

Edités dans le milieu des années soixante-dix, les premiers documents "Biodoc" étaient brefs et constituaient des réponses types aux demandes de renseignements reçues par l'association Nature & Progrès. Ils ont évolué depuis pour devenir de petits documents techniques de quelques pages.

Résultats de recherches et observations diverses, ils abordent chacun un sujet concernant la pratique de l'agriculteur ou du jardinier dans le cadre d'une agriculture "naturelle". Ils sont actuellement en cours de mise à jour et réédition.

La liste des "Biodoc" est disponible auprès du Groupement Régional d'Agriculture Biologique de Basse-Normandie (02 31 47 22 76).

SEMIS ET FERTILISATION DU COLZA EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE : BILAN DE TROIS ANNEES D'ESSAIS EN PICARDIE

Gilles SALITOT

Chambre d'Agriculture de l'Oise - BP 40463

60021 Beauvais cedex

gilles.salitot@agri60.fr

MOTS CLES : colza, expérimentation, azote, implantation, ravageurs.

1 LES ESSAIS COLZA EN PICARDIE

Les Chambres d'Agriculture de Picardie conduisent depuis trois ans, dans l'Oise, une expérimentation sur la culture du colza en mode de production biologique. L'objectif est de répondre aux préoccupations exprimées par les agriculteurs, à la recherche de nouvelles productions et permettant de diversifier les assolements. Le colza représente pour les agriculteurs picards bio des débouchés divers (commercialisation auprès des huileries, biocarburant et valorisation des tourteaux en élevage bovin). Les atouts de la région Picarde pour produire du colza bio sont divers : la profondeur des sols, le climat océanique tempéré (pluviométrie régulière au printemps) et le savoir faire des agriculteurs pour une culture largement implantée localement.

Pour des raisons pratiques (disponibilité des équipements, suivi en culture ...), l'expérimentation est conduite sur une parcelle de la ferme de l'Institut La Salle de Beauvais. Il s'agit donc d'une expérimentation reposant sur un mode de culture biologique appliqué dans une parcelle non bio. Le tableau page suivante résume les principales données des trois années d'essais.

Cette expérimentation a été mise en place pour la première fois à l'automne 2003. Cette année là, le dispositif reposait sur une comparaison entre deux modes d'implantation de la culture, avec semoir à céréales et semoir de précision. L'objectif est de situer l'intérêt et les limites comparés des deux modes d'implantation. Avec trois ans de recul, il ressort que seul le semis de précision permet de réaliser des interventions de désherbage mécanique tardives et efficaces avec comme outil la bineuse. Le semis à écartement réduit (semoir à céréales) offre une meilleure valorisation de l'azote présent dans le sol.

En 2005 et 2006, le dispositif mis en place évolue. Il porte désormais sur l'intérêt d'une fertilisation organique azotée appliquée à l'automne ou au printemps. Les résultats obtenus sur un pas de temps très court (trois années !) montrent une forte variabilité des rendements. La fertilisation azotée repose sur l'utilisation de vinasses issues de levurerie. Ce produit est disponible en Picardie, son intérêt réside dans sa teneur égale en azote et en soufre (30 unités / tonne). L'automne 2005 particulièrement doux a permis de valoriser un apport d'azote organique dès le semis. Cela n'a pas été le cas l'année suivante. Le printemps tardif de l'année 2006, la floraison courte et la présence significative de méligèthes puis de charançons, ont entamé largement le potentiel de la culture. Les compensations observées l'année précédente n'ont pas été possibles.

En culture, les rendements obtenus par les producteurs picards de colza bio confirment bien la variabilité des résultats enregistrés d'une année à l'autre. Il ressort de manière évidente que l'offre en azote est un facteur clé de la réussite de la culture. Cette offre peut trouver satisfaction dans le choix de précédents favorables (système élevage). En système céréalier, cette offre est souvent limitante.

Colza - synthèse des essais conduits sous le mode biologique dans l' Oise sur trois ans (2004 - 2006)

semoir de précision - écartement 38,5 cm											
variétés	date de semis	précédent	densité semis	pieds/ m2	% pertes	N absorbé sortie hiver témoin	rendement témoin non fertilisé	N absorbé sortie hiver vinasse semis	rendement fertilisé automne	rendement fertilisé ptps	observations
2004	26-août	blé	38	32	16	32				38,1	sol sec au semis -absence de facteurs limitant - 4 t de vinasse le 12 mars
2005	27-août	blé	40	32	20	90	27	150	31,9	31,6	bonne valorisation de l'apport de vinasse au semis
2006	29-août	orge ptps	50	34	32	37	7	48	9,8	13,3	floraison courte - pas de compensation, pression ravageurs
moyenne					23	53				28	
semoir céréales											
variétés	date de semis	précédent	densité semis	pieds/ m2	% pertes	N absorbé sortie hiver témoin	rendement témoin non fertilisé	N absorbé sortie hiver vinasse semis	rendement fertilisé automne	rendement fertilisé ptps	observations
2004	26-août	blé	70	52	26	34				35,5	difficultés maîtrise des adventices
2005	27-août	blé	70	40	42	104	30	188	pas de valeur	34	valorisation supérieure de l'azote organique
2006	29-août	orge ptps	75	45	40	50				13	
moyenne					36	63				28	

2 LES PRECONISATIONS AUX AGRICULTEURS PICARDS

Après trois années d'expérimentation et le recul de quelques agriculteurs, voici ce que l'on peut retenir.

Des rendements variables d'une année à l'autre

	2004	2005	2006	moyenne
Parcelles agriculteur	20 q	15 à 30 q	10 à 15 q (système céréalier) 15 à 25 q (système élevage)	20 q
Parcelles ISAB (limon 90 cm)	35 q	30 q	13 q	25 q
Faits marquants	Absence de facteur limitant	Pression méligèthes	Floraison courte, nombre de siliques et PMG limitant	

2.1 Techniques d'implantation, deux choix possibles !

En toute situation, le labour est quasiment indispensable pour lutter contre les repousses et autres graminées (à défaut réaliser des faux-semis efficaces).

En précédent riche en azote (deuxième année après retournement de prairie ou après légumineuses), un semis à écartement réduit (semoir à céréales) est envisageable avec des colzas qui vont partir rapidement en végétation. Dans ce cas, c'est la culture qui étouffe les mauvaises herbes.

En système céréalier (précédent paille, disponibilité en azote plus limitée), si la parcelle est sale, on conseille un semis à écartement large. Il permet en toute situation, le binage à l'automne ou à la sortie hiver. Les pertes liées au passage de houe ou de herse étrille sont également plus faibles avec des écartements supérieurs à 25 cm.

Densités de semis : le désherbage mécanique impose de relever sensiblement des densités de semis (+10 % / conventionnel) sans aller toutefois vers des peuplements élevés qui sont pénalisants pour le rendement.

- semoir céréales : 60 grains / m², soit 2.4 à 3 kg/ha¹

- semoir de précision : 40 à 45 grains / m², soit 2.4 à 3 kg/ha

Un objectif de 35 pieds/m² sortie hiver est l'optimum

2.2 Un risque maladie géré par le choix de la variété

Votre choix doit se porter sur une variété très peu sensible au phoma, peu sensible à la verse et à la cylindrosporiose. Plusieurs variétés correspondent à ces critères (Pollen, Grizzly, Kadore, Kalif², Es Astrid en sol séchant). La disponibilité limitée peut vous conduire à demander une dérogation. Depuis deux ans, le test en mélange d'une variété très précoce avec la variété retenue pour la parcelle (1/2 tardive) apporte une réponse significative en présence limitée de méligèthes. La vigueur de la culture représente dans les situations où le nombre de méligèthes est élevé la seule possibilité de limiter la nuisibilité du ravageur.

¹ Pour un PMG de 4 à 5 g, attention cette année aux PMG de semences de ferme souvent faibles.

² Kalif : seule variété à priori disponible sur le site <http://www.semences-biologiques.org/>

2.3 L'offre en azote, facteur clé pour un bon rendement

Le colza est une culture consommatrice d'azote. Au printemps, l'offre en azote détermine une part essentielle de la réussite de la culture. Il est conseillé de privilégier des précédents favorables (place dans la rotation). En système céréalier, l'offre est souvent limitante. Une fertilisation de printemps est conseillée pour lever d'éventuelles carences et permettre au colza de produire des ramifications dont dépendra le nombre de grains et donc le rendement. Un produit à minéralisation rapide est préconisé (vinasses ou fientes). L'enfouissement par le binage est alors conseillé pour limiter les pertes par volatilisation.

2.4 Semer dès que les conditions le permettent !

Lorsque les conditions pour une croissance rapide des colzas à l'automne sont réunies, semer tôt (en août, les jours comptent double pour le colza !) permet de rendre le colza compétitif et moins sensible aux ravageurs.

Ces préconisations régionales sont reprises de l'Info BIO n°13-06 du 22 août 2006, diffusé auprès des agriculteurs bio de Picardie par la Chambre d'Agriculture de l'Oise.



Double valorisation du colza à la ferme : Huile + Tourteau

Cet article rend compte des acquis des expériences de la CUMA « Terre d'énergie » (56), du GIE « Huile et tourteaux » (56) et d'INNOV 29 (29). A partir du colza produit sur l'exploitation, deux produits sont obtenus : de l'huile pour le moteur de tracteur et du tourteau pour l'alimentation des animaux. Il s'agit d'une démarche concrète visant à une meilleure autonomie énergétique et protéique de l'exploitation.

Cultiver du colza, le stocker à la ferme, presser les graines avec une presse à huile, obtenir d'un côté une huile de qualité, la laisser décanter, la filtrer, l'utiliser comme carburant en substitution du gasoil et obtenir d'un autre côté un tourteau qui peut être utilisé pour l'alimentation des animaux comme complément azoté en substitution du soja. Telle est la démarche de ces agriculteurs pionniers.



Presse à huile

30 % d'huile, 70 % de tourteau

En pressant la graine de colza avec une presse, on obtient environ 30% d'huile (HVP : Huile Végétale Pure) et 70 % de tourteaux. La paille, qui n'est pas de bonne qualité, peut rester au champ comme réserve de carbone ou être utilisée comme complément de litière. Les repères techniques que nous pouvons fournir au vu des résultats de l'expérience de 2005 sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Une graine de colza propre et sèche

La graine de colza doit être propre et sèche (entre 6 et 9 % d'humidité). Pour atteindre ce résultat, les pratiques sont diverses : certains préfèrent vendre le colza à un organisme

stockeur et récupérer ensuite la graine, d'autres font du tri à façon, d'autres enfin ventilent le grain dans une cellule pour le refroidir et le sécher après l'avoir nettoyé. Attention, l'air du ventilateur passe moins bien dans le colza que dans la céréale, la graine est plus petite. Il est préférable de stocker à une certaine hauteur pour faciliter le pressage.

Savoir doser le pressage

A 20-25°C de température ambiante, le pressage a un meilleur rendement. Toutes les presses n'ont pas le même rendement. Il convient de trouver le juste milieu entre une faible extraction qui donnera peu d'huile et un tourteau très gras et une pression trop forte et à haute température qui provoquera des phospholipides responsables de gommage dans les moteurs. Sous la presse, on filtrera grossièrement pour éviter les grosses impuretés dans l'huile avant une décantation de une à trois semaines. L'huile

1 ha de colza	
Rendement	de 20 à 35 q
30 % d'huile	de 600 à 1 100 litres
70 % de tourteau	de 1 400 à 2 500 Kg



Deux presses à huile pour Innov 29.

Afin d'accompagner les agriculteurs finistériens, souhaitant se lancer dans l'autonomie énergétique et protéique de leur exploitation, l'association Innov 29 (Fdcuma et Comités de développement) a fait l'acquisition de deux presses à barreaux. Elles sont montées en parallèle sur une remorque pour être opérationnelles instantanément. La trémie permet une autonomie d'une dizaine d'heures afin de pouvoir travailler en continu, y compris la nuit. L'objectif étant de permettre aux agriculteurs de voir la faisabilité du pressage et la valorisation de l'huile et du tourteau sur l'exploitation sans faire l'acquisition immédiate du matériel.



Presse à huile surélevée

décantée conserve toute sa saveur pour l'usage alimentaire. Sa couleur ambrée est du plus bel effet.

Une filtration de 3 à 1 micron

Si l'on veut faire du carburant, une filtration plus poussée de 3 à 1 microns est nécessaire. Différents types de filtres existent sur le marché. Plutôt que de choisir des filtres à plaques très efficaces mais chers, les membres du GIE ont opté pour des kits de pompage équipés d'un filtre à cartouche de vanne 3 voies et de pistolet de remplissage d'une valeur de 660 € ce qui permet à chacun d'avoir son filtre. Une fois toutes ces opérations effectuées, l'huile peut être stockée dans des citernes en plastique de préférence opaque.

L'huile végétale pure en tant que carburant

Si on souhaite utiliser l'huile végétale pure comme carburant, il est nécessaire de se poser les questions suivantes : Quelle injection ? Quelle pompe d'injection ? Quel tarage des injecteurs ? Si vous n'êtes pas compétent sur le sujet, faites-vous aider par votre mécanicien, à défaut renseignez-vous auprès des agriculteurs qui pratiquent ou des conseillers machinisme.

L'huile végétale pure est plus visqueuse que le gasoil. A tarage égal, l'huile pourrait ne pas faire de fines gouttelettes ou demandera trop d'efforts à la pompe d'injection. Il faut donc une pompe d'injection de qualité ou rajouter une pompe de pré-gavage. Cela nécessitera toujours un tarage adapté des injecteurs. Dans les tuyaux d'alimentation et dans les filtres, l'huile aura un débit plus faible. Chauffée, elle aura un comportement plus fluide. Ceci peut s'obtenir par du préchauffage électrique ou à partir des radiateurs.

L'huile végétale pure est un bon carburant (pratiquement équivalent au gasoil) mais elle doit être bien filtrée car elle a un pouvoir décapant, ce qui peut encrasser les filtres lors d'une première utilisation. Comme le carburant, la condensation peut poser des problèmes, c'est pour cela qu'il faut presser une graine sèche, utiliser des citernes de stockage en plastique.

Utilisation de l'huile de colza : mode d'emploi

Préalable :

- Utiliser l'huile pour les tracteurs les plus sollicités, pour éviter l'encrassement des moteurs,
- Eviter l'utilisation de l'huile en période hivernale à cause de la forte viscosité.

3 solutions

- **Rester à un mélange de 30% huile et 70 % gasoil**, ce qui évite les équipements mécaniques. Commencer par 5, 10, 20, pour arriver à 30% maximum et faites le mélange juste avant le remplissage du réservoir pour respecter les proportions.
- **Passer en bi-carburant** : Avec une vanne (manuelle ou électrique), vous démarrez au gasoil et lorsque le moteur est bien chaud, vous passez à 100 % d'huile brute. Avant l'arrêt du moteur, vous retournez en gasoil. L'inconvénient du système est que votre moteur est réglé pour un des deux carburants, mais pas pour l'autre, la carburation n'est pas parfaite.
- **Adapter son moteur à l'huile brute**, ce qui est plus logique, mais plus technique. Cela passe par du préchauffage de l'huile dès le démarrage et par des filtres doublés par une pompe en ligne précédée d'une pompe de pré-gavage.



Valeurs nutritives du tourteau de colza

		Tourteau fermier		Tourteau shilfer	Graines
Msa	g/kg MF	932		890	920
MO	g/kg MS	941		920	957
MAT	g/kg MS	271		380	218
EE	g/kg MS	221		100	448
CB	g/kg MS	109		121	108
UFL	/kg MS	1,18	1,32	0,95	1,72
UFV	/kg MS	1,1	1,27	0,89	1,71
PDIA	g/kg MS	71	0	113	27
PDIN	g/kg MS	177	139	249	122
PDIE	g/kg MS	112	45	158	42
VEM	/kg MS	1450	1161	1124	1454
VEVI	/kg MS	1587	1202	1185	1532
DVE	g/kg MS	102	57	141	19
OEB	g/kg MS	107	138	164	140

	Valeurs mesurées en zootechnie
	Valeurs de digestibilité estimées en prenant comme références les données relatives au shilfer
	Valeurs de digestibilité estimées en prenant comme références les données relatives aux graines
	Valeurs de référence dans la littérature

(source Gembloux-rapport Tricof)

Un tourteau plus gras

Les tourteaux de colza obtenus par pression à froid, contiennent toujours un peu d'huile à l'inverse des tourteaux industriels, qui sont obtenus avec des pressions à chaud et des extractions à l'hexane, ce qui les rend moins énergétiques et plus azotés.

Le taux résiduel d'huile dans le tourteau fermier va dépendre du grain utilisé, du type de presse (11 à 25% d'huile résiduelle dans les tourteaux), de la température de pressage, du débit et de la vitesse de la presse. Nous vous conseillons de réaliser une analyse de ce tourteau. Le tableau ci-dessous donne un ordre de grandeur.

Ce tourteau paraît mieux adapté pour l'engraissement des bovins et les rations de porcs et de volailles. Pour les vaches laitières, nous attendons les résultats des essais de la station expérimentale des Trinottières (49) et du suivi d'un réseau d'élevages bretons.

Bien dimensionner l'atelier de pressage

L'atelier de pressage doit être pratique et dimensionné selon les besoins. Soit on part des besoins en carburant (600



Le tourteau de colza produit à la ferme contient encore de l'huile

à 1100 litres/ha), soit on part des besoins en tourteaux (1400 kg à 2300 kg/ha) et on calcule les surfaces en colza et l'atelier de pressage. Pour le stockage du colza, on compte 600 à 700 kg au m³, attention le tas de colza laisse moins passer l'air que les céréales. L'atelier de pressage doit être dans un endroit au minimum tempéré pour avoir un bon taux d'extraction et permettre un pressage continu d'au moins 12 h sans intervention. Ceci nécessite une trémie de stockage du colza de 600 kg au minimum pour une presse qui fait 50 kg/h et une trémie de réception du tourteau de 400 kg (minimum). La cuve de décantation de l'huile doit pouvoir absorber la totalité d'un pressage pour éviter des reprises d'huile. Cette cuve de décantation doit être munie d'une vanne de vidange pour évacuer

les boues. Le stockage de l'huile doit se faire à part et il est souvent nécessaire de faire son mélange avant utilisation dans une cuve carburant pour ceux qui font le mélange Gasoil/huile. Un matériel de pompage filtration distribution est nécessaire pour les transvasements et remplissages. On peut trouver un petit kit pour 650 € (Aster-Lanouée).

La fiscalité

Pour les carburants, le projet de loi de finance 2006 autorisera certainement les agriculteurs à utiliser leur propre production à des fins de carburant sans TIPP, par contre il n'est pas prévu de leur permettre de le vendre comme cela se fait en Allemagne.

Pour les combustibles (Fuel) : la vente est possible sans taxes spécifiques.

Déclaration PAC

Pour les aides PAC, il suffit de déclarer la culture. Pour bénéficier du crédit carbone (45 €/ha) et pouvoir le mettre en jachère, il faut un contrat Onioli qui peut être signé par l'intermédiaire d'un organisme stockeur ou directement avec l'Onioli. Selon les informations dont on dispose lors de la rédaction de cet article, en contrat individuel, il faut verser une caution forte (60 €/ha pour le colza seul, 230 €/ha pour le colza jachère). De plus, on est tenu de dénaturer le produit et tenir une comptabilité matière.

Jean Luc AUDFRAY,
CA 56
Pierre DEMEURÉ,
Pôle Agro PV

Contacts

Jean Luc AUDFRAY, CA 56
02 97 46 22 61
Pierre DEMEURÉ, CA 29
02 98 73 19 37
Pierre HAVARD, station des Cormiers
02 99 39 72 93

TEMOIGNAGE D'UN AGRICULTEUR BIOLOGIQUE DU MAINE-ET- LOIRE

Eric PETIT

La Choletaise - 49520 Combrée

Renan MAURICE

Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire

9 rue André Brouard – 49105 Angers Cedex 02

renan.maurice@pl.chambagri.fr

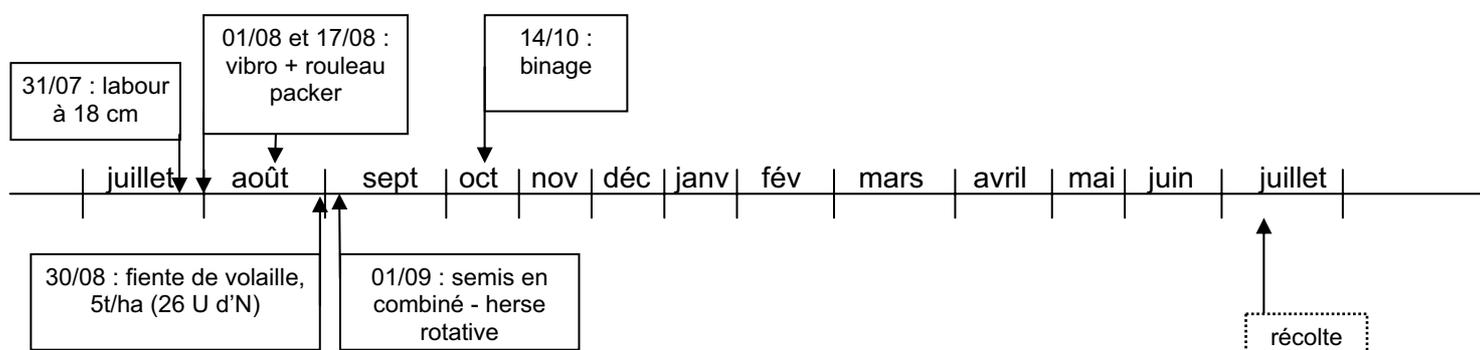
1 PRESENTATION SUCCINCTE DE L'EXPLOITATION

- Exploitation grandes cultures à Combrée (Maine-et-Loire) en bio depuis 2000
- SAU : 125 ha (dont 114 épançables)
- Assolement moyen :

	Surface en ha	Fourchette de rendement (en Qx / ha)
Lupin d'hiver	4 à 5	25 à 35
Féverole d'hiver	15 à 16	30 à 45
Colza	9	20 à 32
Blé	40 à 50	55
Maïs grain	6 à 15	50 à 90
Tournesol	14	25 à 30
Pois de printemps	0 à 16-17	20 à 50
Triticale	0 à 8-10	55

- Les principes de la rotation sur l'exploitation :
 - un blé au moins tous les 3 ans
 - le blé précédé d'un protéagineux et interculture
 - alternance de culture d'hiver et de printemps mais souvent 2 cultures d'hiver puis 1 de printemps
 - colza et lupin précédés de blé et travail précoce

2 ITINERAIRE TECHNIQUE DU COLZA - EXEMPLE CAMPAGNE 2006 - 2007



- précédent blé, sur terre limoneuse et moyennement profonde
- semis de la variété Kador (semence de ferme) à 4 kg/ha
- écartement 30 cm pour pouvoir biner

- comptage levée le 10 octobre 2006 : 14,4 pieds / mètre linéaire (nombre de pieds par mètre linéaire conseillé : entre 12 et 14)
 - pesée du 12 décembre 2006 : entre 1,8 et 2,3 kg de matière verte aérienne par m² : pas besoin de fertilisation azotée au printemps
 - pas d'intervention prévue entre le binage de novembre et la récolte (sauf en cas de fort salissement, possibilité de biner une autre fois au printemps)
- Débouché du colza :
 - projet d'investissement dans une presse pour presser sur la ferme,
 - sinon stockage pour vendre la graine au meilleur moment, en fonction du marché ou pour la vendre à des agriculteurs qui ont le matériel pour presser.

Colza

À chacun son itinéraire technique

De 336 ha en 2003, la culture du colza bio a fait un bond en 2004 pour passer à 1 040 ha (1). Difficile d'estimer la surface récoltée cette année en France, mais il semble qu'elle ait encore progressé. En effet, cette crucifère ne manque pas d'atouts, d'autant plus qu'elle bénéficie d'un marché attractif en raison des qualités diététiques de son huile. Mais ce n'est pas l'unique raison de son intérêt.

Possédant une réputation de culture difficile en bio en raison notamment des attaques d'insectes, les surfaces de colza ont longtemps stagné. Ses débouchés confidentiels en huile comme en tourteaux ont freiné son essor. "Pourtant, en tant que seule plante sarclée d'automne, elle mérite sa place dans l'assolement pour

rompre la succession des céréales à paille. C'est une tête de rotation intéressante qui peut contribuer à résoudre certains problèmes de désherbage", affirment les producteurs qui se sont lancés, attirés par des prix d'achat des graines devenus très attractifs (370 euros/t minimum départ champ pour la récolte 2004).

Or les références techniques sont encore rares. Une étude réalisée par le Cetiom et l'Inra avait mis en avant les facteurs limitants du colza bio (voir *BIOfil* n°30) : l'incidence néfaste sur les rendements des carences azotées à l'automne et à la reprise de la végétation, ainsi que le risque d'étouffement de la plante par les adventices dès l'ins-

tallation. Autres freins pour cette culture : les risques d'attaques au printemps d'altises, de mouches du chou, de pucerons cendrés et de méligèthes, certes localisées, mais pénalisantes en cas de faible vigueur de la culture. Alors comment faire pour obtenir des rendements satisfaisants en bio, entre 15 qx et 25 qx ? Outre le choix de

BIOBOURGOGNE COCEBI

Coopérative de Céréales Biobourgogne

Sentier de la Fontaine - 89310 NITRY

Tél. 03 86 33 64 44 - 03 86 33 68 88

cocebi@biobourgogne.fr - www.biobourgogne.fr



Production de semences certifiées BIO

BLE : Achat, Atrium, Atlass, Capo, Hardi, Renan, Saturnus, Tecnico

ORGE : Angela, Astoria, Extase, Nectaria

AVOINE : Avenuda, Evora, Gérard, Poncho

TRITICALE : Lamberto, Rotégo, Trinidad

EPEAUTRE : Ressac

SARRASIN : La Harpe

SEIGLE : Cilion

LENTILLE VERTE : Anicia

FEVEROLE : Disco, Divine, Karl

POIS FOUR : Assas

POIS PROTEAG : Hardy, Nitouche

TREFLE INCARNAT : Almira

Certifié par ULASE - 26270 LORIOL

Blés tendres d'hiver : **SATURNUS** : barbu riche en protéines, améliorant.

GLOBUS : riche en gluten, supporte les conditions sèches.

ARISTOS : productif de qualité. **CAPHORN** : court et productif.

Orges d'hiver : **SILKE** 6 rgs incassable. **NICOLETTA** : 6 rgs brassicole.

VIRAC : 2 rgs rustique haute en paille.

Triticale : **PASSUS** : court et très productif.

ROTEGO : rustique et productif.

N'oubliez pas de fortifier vos semences contre la carie avec **le Tillecur**.

Le Tillecur est également un répulsif corbeaux sur toutes semences.

BIO-SEMEST 7 rue de l'Escaut - 51100 REIMS

Tél. +333 26 85 55 33 - Fax : +333 26 85 48 25

Voir : Site Internet : www.semest.com

Communiquer : E-mail : vdb@semest.com

Pour un sol sain, alors... **Hatzenbichler** TECHNIQUE AGRICOLE

A-9433 St. Andrä, Fischering 2, Autriche - Tél 0043 4358 / 2287-22 - Téléfax 0043 4358 / 2208
e-mail: landtechnik@hatzenbichler.com - Internet: <http://www.hatzenbichler.com>

Sous-soleuse „DELTA“ avec semoir mécanique „EXAKTOR“



Régénérateur de prairies „VERTIKATOR“



Déchaumeur à disques „DISKO“

Renseignements: Viktor Hanuska Tél: 0043 664 3826730, Réseau SCAR Atelier Conseil: 05.46.93.83.77 ou CAMPASO.CO.DI.CO.R: 01.60.17.67.10



La graine de colza bio possède de multiples atouts, notamment en raison des qualités nutritionnelles de son huile.

variétés résistantes aux maladies, la date et la densité du semis semblent déterminants, mais les stratégies varient, comme le prouvent ces témoignages.

Réussir l'implantation

“L'important est de réussir l'implantation afin que la plante ait assez de vigueur pour déjouer tous ces pièges”, résume Christophe Lecuyer, installé en bio depuis 1995 sur les départements de l'Orne et de l'Eure-et-Loir et

qui en est à sa quatrième récolte de colza. Cette année, sur ses 200 ha de grandes cultures, il lui a consacré 25 ha. Implanté après un précédent de céréales à paille, le colza entre dans un assolement composé de luzerne, blé, orge, triticale, colza, féveroles, dactyle porte-graines, ainsi que quelques légumes. “La principale contrainte, c'est le temps très court imparti pour la préparation des parcelles, le déchaumage et le labour entre 18 cm et 20

cm ; je n'ai qu'une quinzaine de jours devant moi, car je sème tôt, entre le 10 et le 20 août”, explique le producteur. La raison ? “Il est indispensable que la plante se développe vite.” D'où l'importance de la fertilisation. Il a essayé le fumier de cheval (10 t/ha), la vinasse, les fientes compostées associées aux déchets verts. C'est la rapidité d'assimilation qui semble être le critère à prendre en compte. Il a choisi de semer à 5 kg/ha la variété Pollen, “relativement rustique, qui démarre lentement au printemps au rythme de la minéralisation”. L'écartement est soit de 17 cm avec un éventuel passage de herse étrille, soit de 40 cm, s'il veut pouvoir biner une à trois fois, dont une au printemps. “J'ai fait plusieurs essais mais, sans binage, les parcelles sont plus sales”. À la récolte, il lui faut donc trier, ce qui n'est pas facile en raison de la présence de sanve (moutarde des champs) ou de ravenelles. Quant aux insectes, malgré la présence de méligèthes ou de pucerons cendrés en fin de cycle, ils n'ont pas trop affecté le rendement, dont la moyenne se situe, selon les années, entre 17 qx/ha et 23 qx/ha.

Biner par sécurité

“Je ne veux prendre aucun risque, j'ai donc choisi de biner mon colza, comme le reste.” En bio depuis 2000 sur 125 ha de grandes cultures à Combrée, dans le nord du Maine-et-Loire,

Éric Petit bine en effet toutes ses cultures, du blé au pois, en passant par la féverole ou le lupin, avec un attelage avant. L'an dernier, son colza n'y a pas échappé au rythme d'un hectare par heure, même si, parallèlement, un essai non biné a été mis en place par le Cetiom sur son exploitation. Pour cette première année de colza, biné ou non, les résultats ont d'ailleurs été les mêmes : très satisfaisants, avec un rendement moyen de 32 qx/ha sur les 5 ha ensemencés. “Après une année sans colza en raison des contraintes de rotations, je vais renouveler cette culture en semant fin août en ligne avec une densité de 3 kg/ha et un écartement de 30 cm. Pour moi, c'est la sécurité. Au moins, je n'aurais rien à me reprocher.” La lutte contre l'enherbement reste en effet son souci numéro un. De plus, le passage de la bineuse, effectué début octobre au stade 30-40 cm de la plante, même s'il n'a pas été très facile à réaliser en raison de la forte couverture de la plante, a servi aussi à minéraliser. Implanté après un blé, un déchaumage, un labour, un épandage de 4 t/ha de fumier de volaille composté, deux passages de vibroculteur avec rappuyage au rouleau, sa culture de colza n'a pas rencontré de problèmes particuliers. Comme la majorité des producteurs interrogés, il

Irrigation contre les ravageurs

Parmi les insectes se développant sur colza, deux sont fortement préjudiciables :
 - le charançon de la tige a une forte nuisibilité, avec des pertes de rendement de 30 % si on compte plus de 3 piqûres par plante. Les piqûres de l'adulte entraînent la déformation et l'éclatement de la tige. Il en résulte une moins bonne alimentation de la plante en eau et en minéraux ;
 - les méligèthes qui, de la formation des premiers boutons jusqu'à l'apparition des premières fleurs, consomment le pollen à l'intérieur des boutons, provoquant ainsi leur destruction. Les dégâts peuvent être limités si les colzas comptent un nombre de boutons élevés et de grosses tailles. En cas de fortes attaques de ces deux ravageurs, l'irrigation permet de réduire le stress subi par la plante, qui va mieux compenser. Le potentiel de rendement sera ainsi maintenu, voire amélioré dans le contexte local

Extrait d'Info cultures bio, avril 2005, du conseil du réseau Rhône Alpes “Grandes cultures biologiques”.





La seule variété disponible existant actuellement en bio sur le marché est Pollen (lignée) à maturité mi-tardive, multipliée par la Sica bio d'Agralys qui compte en proposer une nouvelle l'an prochain. D'autres existent en non traitées. En plus précoces, citons les lignées Cadillac, Olphi, PR45W04, Savannah, Cando (sud de Paris), ou Campala, Capvert, Columbus (nord de Paris).

n'a pas eu de soucis avec les limaces à l'implantation. Un peu de soufre au printemps a permis de pallier une carence, mais "je ne pense pas que l'impact a été déterminant sur le résultat". Éric Petit estime que cette production a sa place dans sa rotation qui fait se succéder du blé, des protéagineux, un gel, puis à nouveau du blé, du maïs ou du tournesol, avec une interculture de moutarde entre les protéagineux et le blé pour fixer l'azote. À noter qu'un essai réalisé en associant du trèfle nain au semis de colza, dans le but de limiter la levée des adventices indésirables, n'a pas donné de résultats probants car "la crucifère couvre trop et le trèfle n'est pas sorti", explique l'agriculteur.

Attaques de méligèthes

Chez Daniel Evin, installé sur 160 ha convertis en bio en 2000 à Dourdan, dans l'Essonne, la situation est plus délicate. Avec trois ans de recul et 25 qx/ha de rendement la première année, ce producteur croit beaucoup au colza dans la rota-

tion. Mais il a souffert cette année d'une attaque de méligèthes sans précédent qui l'a contraint à broyer ses 12 ha ensemencés. "J'ai déjà été touché l'an dernier sur 15 ha d'une parcelle proche d'une zone boisée, mais cette année en plaine, c'est catastrophique", déplore ce producteur qui cherche des pistes pour résoudre ce problème encore très localisé : "Ce coléoptère est apparu dès la mi-mars et j'ai tout essayé, le purin d'ortie, une dilution de tabasco, en vain." Il espère dans la mise au point d'un aspirateur de méligèthes, une technique déjà employée aux USA sur fraisiers. L'Itab a d'ailleurs l'intention de plancher sur la question. "En dehors de ce risque qui, pour l'instant, est bien réel, le colza s'avère une excellente tête de rotation, mais il doit être suffisamment fort avant

Le colza : une huile miracle ?

Mode ou tendance lourde ? L'huile de colza, qui a défrayé la chronique il y a une trentaine d'années en raison de la présence d'acide érucique – que l'on décèle aussi dans d'autres aliments, comme la moutarde et le maquereau – est en train de retrouver ses lettres de noblesse. Par principe de précaution, elle avait été évincée, suite à des expériences montrant des risques d'infiltration de graisse dans le myocarde décelé chez le rat, mais cela n'a jamais été confirmé chez l'homme. Aujourd'hui, l'huile de colza est en train d'être réhabilitée. Alors qu'elle a été décriée, on lui accorde des vertus exceptionnelles en raison de ses forts taux non seulement en acides oléiques (55 %), mais aussi en acide linoléique de la série oméga 6 (22 %) et en acides alpha-linoléique de la série oméga 3 (9 %), deux acides gras essentiels dans l'alimentation et non synthétisés par l'homme. Comme l'acide érucique a été jugé dangereux (avec un taux de 50 %, estimé excessif pour la consommation humaine (1), la sélection végétale a conduit à la mise au point de variétés n'en contenant plus que des traces (variétés simple zéro).

Mais ce n'est pas tout : une fois l'huile extraite, le tourteau, riche en matières azotées, est utilisé en alimentation animale. Or, il contient des composés soufrés, les glucosinolates qui, après hydrolyse, donnent des produits toxiques riches en nitrites et cyanates (2). Même si, seul l'excès serait véritablement toxique, l'Inra a élaboré des variétés double zéro largement répandues, non seulement sans acide érucique mais aussi à basse teneur en glucosinolate.

Notons que c'est ce même colza, sélectionné à la fois pour l'homme et l'animal, qui sert à faire du carburant. Il est aussi utilisé en lubrification des moteurs et en transmission hydraulique. Mais comme l'huile à haute teneur en acide érucique possède des débouchés plus intéressants pour l'industrie, l'Inra réoriente ses recherches vers des variétés de printemps à haute teneur en acide érucique. Or celles-ci risquent de contaminer celles destinées à l'alimentaire, qui sont des variétés d'automne. C'est un nouveau problème.

C. R-F

(1) On découvrira par la suite que l'acide érucique de l'huile de colza n'était que pour peu de chose dans les problèmes rencontrés chez les rats. L'huile de tournesol, comme celle de maïs, provoquent les mêmes altérations cardiaques car les rats tolèrent mal les huiles végétales. En fait, l'acide érucique aurait même des effets bénéfiques sur l'homme !

(2) Les crucifères (colza, navette) contiennent des hétérosides soufrés ou glucosinolates qui vont se concentrer dans les tourteaux. Ces hétérosides soufrés ont des propriétés goitrigènes (c'est-à-dire qui provoquent un goitre hypothyroïdien) et par conséquent sont responsables de retards ou d'arrêt de la croissance chez les animaux qui consomment ces tourteaux. De plus, ils confèrent un goût amer au tourteau de colza (et de navette). Mais ils peuvent être partiellement détruits par la chaleur. C'est pourquoi les premiers tourteaux de colza subissaient un toastage (cuisson). Cependant, l'utilisation du tourteau de colza n'a pu se développer réellement qu'après l'apparition de variétés de colza à très basse teneur en glucosinolates.



La culture de colza ne rencontre pas de difficultés particulières, à condition de maîtriser le salissement dès la levée.

l'hiver pour se passer d'une fertilisation azotée au printemps." Il sème à faible densité (1,9 kg/ha), peu profond, à 50 cm avec un semoir à betterave et bine dès septembre pour enlever la majorité des ray-grass, voire des rumex, en entre-

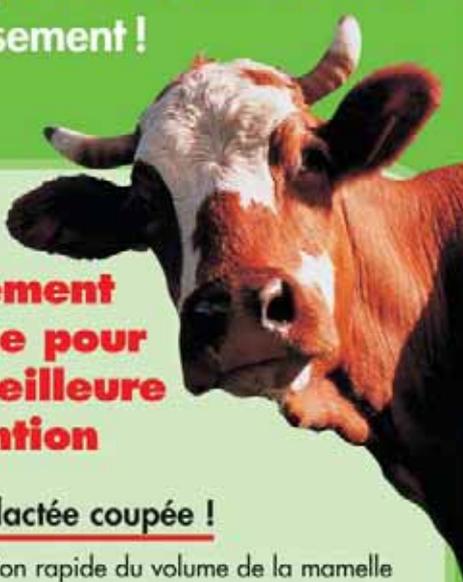
rang. En mars, il butte sa culture pour recouvrir les herbes rebelles.

Interventions réduites

Pour Laurent Coulonnier, éleveur de moutons (races Solognote et Belle-Île) et de porcs (Bayeux) à Ivernay,

OROTAR®

Le seul médicament agréé Agriculture Biologique* qui coupe la sécrétion lactée au tarissement !



Un tarissement efficace pour une meilleure prévention

Sécrétion lactée coupée !
 ↓ Diminution rapide du volume de la mamelle

Limitation des risques d'infection !
 ↓ Fermeture accélérée du canal du trayon (1 semaine)**

Bien-être de l'animal !
 Efficacité validée - Délai d'attente nul



** Source : Monographie Orotar.

* Produit utilisable en Agriculture Biologique, conformément au Règlement CEE n°2092/91 modifié du 24 juin 1991* OROTAR ne doit donc pas être utilisé au nombre de traitements autorisés.

www.virbac.com/orotar/index.html

OROTAR® Granulés : Composition : pour une dose - SALVIA 6 CH, SALVIA 7 CH, SALVIA 8 CH, SALVIA 9 CH. Indications : Chez les vaches et brebis : médicament homéopathe permettant la diminution du volume de la mamelle lors du tarissement. Administration : Voie orale. Le jour du tarissement, déposer le contenu du flacon entre la genouillère inférieure et la lèvre inférieure de l'animal. Vaches : 1 flacon pouvant être utilisé seul ou en même temps que des traitements anti-infectieux administrés par voie générale ou par voie intramammaire. Brebis : 1/2 flacon. Précautions : Ne pas administrer OROTAR® aux animaux atteints de mammmites cliniques, à moins de lui associer un traitement anti-infectieux spécifique. Délais d'attente : Nuls. Catégorie : Médicament homéopathe à usage vétérinaire. Conservation : Conserver au frais et à l'abri de l'humidité et de la lumière. Présentation : Flacon de 1 dose. A.M.M. 607 707.6 du 20/12/84. VIRBAC France, Département Productions Animales, BP 447, 06515 CARRROS CEDEX. Tél : 04 92 08 75 67. Fax : 04 92 08 75 60. Virbac Assistance : 0 811 90 48 08.



en Maine-et-Loire, la culture de colza, qu'il pratique depuis qu'il a converti son exploitation en bio, à savoir 10 ans, n'a jamais été un souci : si elle rate, il la retourne, "car je vise d'abord l'engrais vert". Si elle est belle, il la moissonne : "c'est vite vu, dès la sortie de l'hiver à la reprise de la végétation." Grâce à une moissonneuse-trieuse (Someca datant de 1984), il rentre une récolte propre : "je moissonne avant la maturité des adventices, notamment celle de la moutarde ou de la vesce sauvage, car elles ne peuvent pas être triées", explique le producteur. Avec un précédent de protéagineux, il a aussi des repousses de féveroles. Lorsqu'il récolte, il réussit des rendements de 20 qx/ha en moyenne. Le semis en ligne (10 kg/ha de variété Saturnin) est réalisé entre le 15 et le 30 août, soit en direct après deux passages du déchaumeur, soit après labour si nécessaire pour nettoyer la parcelle et après l'épandage de 10 tonnes de fumier mûri en tas (mélange de porc, bovin, ovin). "Puis, je n'interviens plus, et j'ai rarement des problèmes d'insectes, parfois un peu de pucerons cendrés qui peuvent s'acharner sur un pied après la floraison, mais sans se répandre et

porter préjudice." Chaque année, il sème environ 3 ha à 4 ha de colza, 8 ha cette année, car il a décidé de miser davantage sur cette culture. Avec la Cuma, il a pu acquérir une presse à huile (4 500 euros HT) : "Ainsi je vais valoriser mon colza au maximum, en produisant de l'huile et des tourteaux". Soit 20 litres d'huile à l'heure et 40 kg de tourteaux pour 60 kg de graines de colza pressées. L'huile est vendue mais il n'exclut pas d'en utiliser aussi une partie pour son tracteur, pour améliorer son autonomie énergétique. Quant aux tourteaux, ils vont rentrer dans l'alimentation de ses porcs. En effet, l'intérêt du colza bio réside aussi dans la multiplicité de ses débouchés. C'est pourquoi toutes les régions s'intéressent de près à cette culture et les expérimentations se multiplient pour mieux la maîtriser. Il reste que ce n'est pas la panacée. En effet, la concurrence étrangère, notamment hongroise, est de plus en plus rude. Et le marché en bio est encore étroit.

Christine Rivry-Fournier

(1) Chiffre de l'Observatoire de l'Agence Bio qui comptabilise aussi les surfaces consacrées au colza fourrager destiné à l'engrais vert.

Les techniques de semis

- Date de semis : du 15 août au 1^{er} septembre, pour obtenir des "choux" avant l'hiver : une implantation rapide permet un bon développement avant l'hiver, donc une bonne couverture du sol et un bon prélèvement d'azote. Ainsi, le salissement de la parcelle et les pressions des maladies sont réduits, le rendement optimisé.
- Dose : 60 pieds au m², ce qui correspond environ à 3 kg/ha ; possibilité à 9-10 kg/ha au semoir ou à la volée ; dans ce cas, réduire la densité avec une herse à l'automne (une densité trop forte provoque l'élongation des plantes avant l'hiver et les rend plus sensibles au gel).
- Semoir : de précision (à disques) permet de semer à ces faibles doses ; semoir à céréales en mélangeant avec des brisures de riz (50/50).
- Vitesse d'avancement : 4 à 6 km/h, 2 cm maxi de profondeur.
- Écartement : 15 à 50 cm (à 50 cm, il peut être biné).

Extrait du bulletin d'information du département bio de la chambre d'agriculture du Maine-et-Loire (Patrice Closset)

La conduite du colza en agriculture biologique : une utopie ou bientôt une réalité ?

Par Muriel Valantin-Morison, Gilles Grandeau et Jean-Marc Meynard (INRA¹)

Alors que le tournesol biologique occupe environ 3000 ha en France, le colza biologique avec 800 ha (conversion comprise) est quasiment inexistant de la sole d'oléagineux français biologiques. Les agriculteurs biologiques hésitent à se lancer dans la production de colza, jugée difficile, risquée et peu valorisée sur le marché ; du fait de l'inorganisation de l'aval, les transformateurs estiment que la production française de colza biologique est insuffisante pour alimenter une filière. La mise au point d'une conduite fiable en réponse aux freins techniques permettrait d'introduire de façon durable le colza en agriculture biologique.

Les productions d'oléagineux biologiques en France sont aujourd'hui représentées surtout par le tournesol et le soja. Leurs deux créneaux de commercialisation potentiels sont l'huilerie pour l'alimentation humaine, le tourteau ou les graines entières pour l'alimentation animale. Pourtant, tout comme le tournesol, le colza biologique pourrait trouver un certain débouché dans ces mêmes créneaux et faire ainsi progresser l'offre nationale en volume et en qualité.

La composition en acides gras essentiels polyinsaturés de l'huile de colza permet de la classer parmi les plus équilibrées et aux vertus diététiques excellentes (Renaud, 1996 and Bourre, 1996). Cela devrait stimuler l'émergence de créneaux pour une huile pressée à froid et le mélange d'huiles biologiques. En outre, dans le cadre de l'élevage biologique, le colza viendrait grossir l'offre nationale en tourteau de tournesol. Mais surtout, par son profil en acides aminés assez équilibré, ce tourteau pourrait être très intéressant pour l'alimentation des volailles de chair et des porcs : en effet, il est relativement riche en lysine et méthionine, deux acides aminés essentiels et non synthétisables par l'organisme.

D'un point de vue agronomique, une culture de colza rompt la succession des céréales à paille et constituerait un relais d'assolement commercialement intéressant. La dégradation des résidus de cultures entraîne la dégradation des glucosinolates, ce qui permettrait de réduire les attaques de piétin échaudage sur blé (Kirkegaard and Sarwar, 1998). Ses qualités agronomiques de bon précédent céréale ont été souvent et depuis longtemps reconnues (Kirkegaard *et al.*, 1994). Mais cette culture, réputée exigeante en intrants et techniquement difficile, peut facilement être envahie d'adventices et subir l'attaque de nombreux bioagresseurs comme les limaces

et les insectes, au point que certains ne croient pas à sa faisabilité en agriculture biologique. Il n'est alors pas étonnant de constater que, malgré le potentiel de développement du colza biologique décrit plus haut, il existe un attentisme de tous les acteurs. La conjonction des freins techniques actuels en amont et de la quasi-inexistence de la filière en aval bloque tous les acteurs.



¹ INRA Versailles Grignon
UMR d'Agronomie - BP 01
78850 Thiverval Grignon

Les facteurs limitant sa production

Afin de cerner et hiérarchiser les facteurs limitant essentiels de cette culture, nous avons entamé une approche de diagnostic agronomique sur des parcelles de colza biologique sans imposer une quelconque conduite de culture. L'étude s'est déroulée en 2000-2001 sur 11 parcelles d'agriculteurs, 5 dans le département du Puy de Dôme et 6 dans le sud de la France (Drôme et Gard). De cette étude préalable, il est ressorti que les facteurs limitant la production de colza sont essentiellement représentés par l'azote et les adventices, les maladies (à l'exception de l'oïdium) et les insectes de printemps (à l'exception des pucerons, étant passés inaperçus). Les adventices peuvent être maîtrisées *via* un étouffement du peuplement dès l'installation du couvert. Or, cela n'est réalisable que si l'azote est disponible au semis. Azote et gestion des adventices sont donc liés.

Les solutions techniques testées

En agriculture conventionnelle, des travaux agronomiques permettent d'envisager de contrôler les adventices sans traitement de prélevée-présemis sur la base de semis très précoces (Dejoux, 1999a ; Dejoux *et al.*, 1999b ; Ferré *et al.*, 2000) dans des parcelles en fertilisation organique ou à fort reliquat azoté. Un semis très précoce permet de piéger l'azote du sol, de soustraire les nitrates au lessivage hivernal et peut parfaitement valoriser les effluents d'élevage épandus en été.

Une partie importante de l'azote absorbé à l'automne est utilisable par les plantes pour satisfaire les besoins de printemps, soit par le biais de redistributions internes à la plante, soit suite à la réabsorption de l'azote minéralisé par les feuilles mortes tombées au sol en hiver et au printemps. Cette combinaison "Semis très précoce et forte absorption d'azote" génère une installation rapide d'un indice foliaire élevé, une couverture du sol rapide, favorable pour limiter la compétition des mauvaises herbes (Ferré *et al.*, 2000). Un itinéraire technique sur la base de semis très précoces pourrait permettre, selon la flore présente, de renoncer au désherbage. Certaines hypothèses de travail ont également été formulées à la suite de ce travail.

- 1• Un semis précoce permettra-t-il plus systématiquement qu'un semis normal d'esquiver des attaques de limaces à la levée car les conditions climatiques d'août sont rarement propices au développement de ces ravageurs (stratégie d'évitement) ? Permettra-t-il aussi d'esquiver les attaques d'autres ravageurs d'automne qui arrivent courant septembre comme les grosses altises, les tenthrèdes et la mouche du chou ?
- 2• Le report vers le printemps de l'azote absorbé à l'automne permettra-t-il de satisfaire les besoins en azote de la culture compte tenu d'un objectif de rendement réduit ? Faudrait-il envisager un complément de fertilisation de printemps par un engrais organique à minéralisation rapide ?

C'est sur la base de ces éléments acquis en agriculture conventionnelle et des

hypothèses faites que les premiers tests d'itinéraires techniques ont été réalisés en 2001-2002.

Des tests de stratégies chez l'agriculteur (tableau 1)

Une première stratégie, dite d'évitement, basée sur des semis précoces (SP-avant le 15 août), denses, sans faux semis, avec apport de matière organique au semis, a pour objectif de fixer rapidement l'azote disponible pour assurer une croissance en biomasse compétitive vis-à-vis des adventices.

Une deuxième stratégie plus «curative», basée sur un semis à date normale (SN), avec un écartement de 35 cm et apport de matière organique, a pour objectif de palier à l'enherbement et à des attaques de limaces par des passages d'outils (herse et bineuse) et par l'épandage d'insecticides naturels.

Des mesures de croissance du peuplement et des états du milieu (sol, état sanitaire, mauvaises herbes) en cours de culture et une approche diagnostic permettent d'évaluer les hypothèses faites et sous-jacentes aux stratégies décrites. Ces itinéraires techniques sont également évalués de manière globale en regard de critères de production (rendement, teneur en huile, pureté de la récolte), de critères économiques (marges brutes), de critères d'organisation du travail (nombre de passages, risques de ne pas pouvoir semer tôt) et de critères environnementaux (lessivage d'azote). Ces tests ont été réalisés en parcelles agricoles chez 9 exploitants : 4 en Eure et Loir, 3 dans l'Yonne, 2 dans le Puy de Dôme. Chaque agriculteur a testé les

Tableau 1 : description des stratégies testées en 2001-2002.

Stratégie	Stratégie I (SP)	Stratégie II (SN)
Objectif global	Semis très précoce + apport d'azote organique au semis > Absorption d'azote maximale été/automne > Décalage du cycle	Semis date normale +/- apport de matière organique au semis > Etalement de la minéralisation sur le printemps > Désherbage mécanique > Epandage d'insecticides naturels
Conséquences sur l'itinéraire technique	<ul style="list-style-type: none"> • Semer tôt et vite sans faux semis ni labour • Semer dense (50-60 P/m²) • S'abstenir de piège limace au métaldéhyde • Choix d'une variété résistante au phoma (POLLEN) 	<ul style="list-style-type: none"> • Semer plus tard avec labour et faux semis répétés • Semer écarté pour permettre le passage des outils de désherbage (bineuse) • Piège limace au métaldéhyde autorisé • Choix d'une variété résistante au phoma (POLLEN)
Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> • Agronomique : vérification par le diagnostic que les objectifs ont été atteints • Economique : rendement, teneur en huile, pureté de la récolte, marges brutes • Organisation du travail : nombre de passage, nombre de travaux du sol, nombre de jours disponibles • Environnement : lessivage d'azote, utilisation de métaldéhyde 	

deux itinéraires techniques en bandes de 9 m de large minimum sur 500 m, voire plus. L'un d'entre eux a tenté une troisième stratégie avec labour sur semis précoce (SP lab). Les parcelles de test oscillaient entre 1 ha et 11 ha. Les rendements ont varié entre 2 et 21q/ha, les semis précoces ayant obtenus les meilleurs résultats uniquement en sols profonds (tableau 2).

Les semis précoces moins

Tableau 2 Rendement et Qualité des récoltes 2000-01 (diagnostic) et 2001-2002 (tests itinéraires techniques)

Parcelles 2000-02	Itinéraires techniques	Rendement (q/ha) (9-2)	Impureté %	huile % MS	Protéine %MS
Eure et Loir 1	SN	10.09	0.37	53.81	16.97
Eure et Loir 1	SPlab	19.70	0.14	52.75	17.20
Eure et Loir 2	SP	6.78	0.43	54.31	17.22
Eure et Loir 2	SN	15.19	0.06	53.97	16.35
Eure et Loir 3	SP	12.76	0.27	54.85	15.25
Eure et Loir 3	SPlab	20.07	0.09	54.30	15.57
Eure et Loir 3	SN	7.58	0.13	54.02	16.03
Puy de Dôme 1	SN	3.07	0.69	45.35	22.17
Puy de Dôme 2	SP	11.18	0.23	50.12	21.18
Puy de Dôme 2	SN	20.25	0.08	51.90	19.23
Yonne 1	SP	5.14	0.12	53.41	16.57
Yonne 2	SP	3.87	0.62	46.34	21.18
Yonne 2	SN	8.36	0.21	43.45	21.34
Yonne 3	SP	3.03	0.25	51.36	19.10
Yonne 3	SN	1.43	0.40	52.27	18.20

attaqués par les bioagresseurs d'automne en général

Un semis avancé permet-il d'éviter les attaques de limaces mais aussi les attaques d'altises et autres ravageurs d'automne? Le résultat est variable selon les ravageurs. Aucune parcelle de semis précoce n'a été détruite par les limaces alors que deux parcelles de semis normaux ont été détruites, la population de limaces étant identique (entre 3 et 5 limaces/m² sur les parcelles d'Eure et Loir).

La fréquence d'attaque des altises et de phoma est systématiquement plus faible (figures 1A et 1C) lorsque les semis sont avancés de 1 mois à 15 jours. En revanche, la mouche du chou a été significativement plus présente sur les semis précoces (figure 1B). Néanmoins, les insectes d'automne (altises, mouche du chou, tenthrèdes, charançon du bourgeon), bien que présents, n'ont pas occasionné de dégâts importants. La nuisibilité de ces

insectes, qui interviennent tôt dans le cycle, est difficile à appréhender, compte tenu des capacités de rattrapage de la culture pendant la floraison. Encore faut-il que la vigueur du peuplement le lui permette... Même si le préjudice des insectes d'automne n'est pas direct, ils risquent d'affaiblir davantage le peuplement s'il souffre déjà de carences azotées.

La capacité d'étouffement du

peuplement dépend davantage de l'azote au semis et de la densité que de la date de semis

Ferré *et al.* (2000) avait démontré que la combinaison "Semis très précoce et forte absorption d'azote" génère une installation rapide d'un indice foliaire élevé, une couverture du sol rapide, favorable pour limiter la compétition des adventices. Les essais réalisés en multilocal sur des sols très diversifiés et avec des apports de matières organiques variées (fumiers de fientes, composts de fumiers volaille, cheval, chèvre, bovins, porcs, déchets verts...) confirment cette tendance.

Cependant, certaines conditions de milieu font échouer cette stratégie :

- la présence de nombreuses adventices estivales,
- le travail superficiel du sol, sans faux semis, qui favorise de façon importante la repousse de précédent céréale,
- une levée hétérogène et une densité



Attaque de pucerons sur colza

©Muriel Valantin-Morison

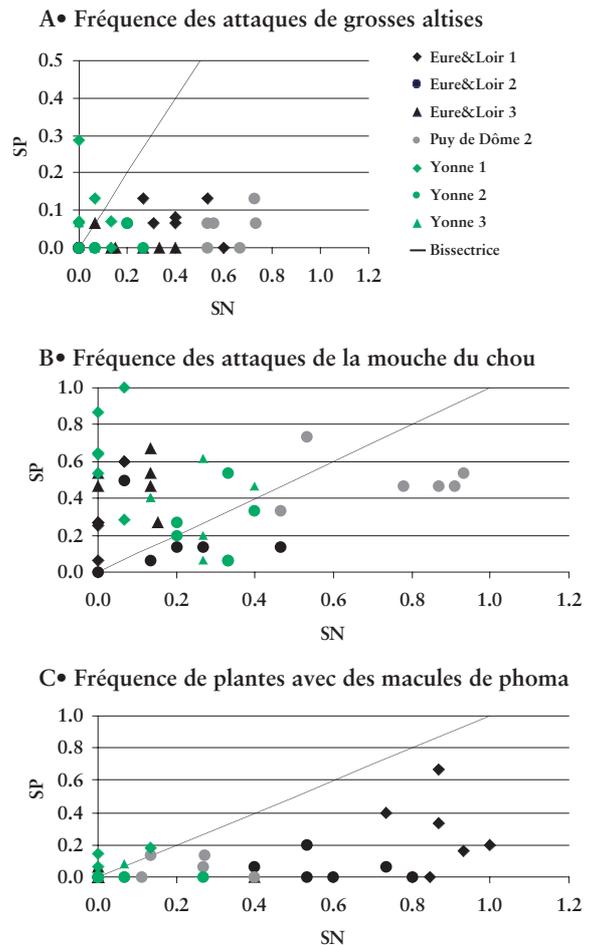


Figure 1 : Comparaison des itinéraires techniques sur la fréquence des plantes attaquées par des bioagresseurs d'automne. Un point représente un sous-échantillon par parcelle. Si le point est en dessous de la bissectrice, cela signifie que la valeur prise sur la bande semis normal est plus forte que sur la bande semis précoce.

de semis inférieure à 40 pieds /m². C'est notamment le cas de la parcelle Eure et Loir 2 en semis précoce qui a cumulé une forte concurrence avec le précédent triticales et une levée hétérogène et faible inférieure à 40 plantes/m². En effet, la compétition avec un précédent céréale est très préjudiciable dès le départ et perdure

sur tout le cycle, d'autant plus si la céréale est rustique et ne gèle pas ou ne souffre pas de maladies. Seul le labour permet d'éviter ces repousses difficilement maîtrisables. Le binage est une solution de rattrapage dans le cas de parcelles assez sales mais les fenêtres de passages, fonctions du type de sols et du climat avant et après passages, sont d'autant plus courtes que le semis est plus tardif. Son efficacité est également limitée car le temps humide d'automne suffit à faire reprendre facilement les adventices binées.

Finalement, l'avancement de la date du



semis n'est intéressant qu'en situation de fort potentiel azote au semis et sous condition d'une bonne implantation (densité seuil de 40-50 pieds/m²).

Tout comme cela avait été observé sur les parcelles suivies en 2000, l'étouffement observé à l'automne est durable et dépend nettement de l'état de nutrition azotée du colza durant l'automne (figure 2). En effet, si les adventices sont maîtrisées pendant tout l'automne, le colza à la reprise ne risque plus d'être dominé par les adventices de manière préjudiciable. Mais là encore cette stratégie n'est durable et efficace que si le peuplement n'entre pas en carence azotée avant l'entrée de l'hiver. Or, cela dépend beaucoup de la disponibilité en azote des composts épandus et de la profondeur des sols, qui conditionnent la réserve en eau et la capacité de minéralisation du sol.

Des attaques d'insectes de printemps fortes et préjudiciables mais non affectées par le choix d'une stratégie

Les attaques de charançon du bourgeon terminal ont été très rares (6% en moyenne sur toutes les régions – 21% en Puy de Dôme), à l'inverse des attaques de charançons de la tige (de l'ordre de 49% en moyenne mais très fortes dans le Puy de Dôme avec 93% des plantes attaquées). Les semis précoces semblent globalement moins attaqués par les charançons de la tige que les semis normaux.

Les insectes de printemps, et en parti-

culier les méligèthes et les cécydomies, ont été particulièrement problématiques dans la région de l'Yonne où les attaques de méligèthes ont atteint 60% des fleurs attaquées. Les attaques des cécydomies-charançons des siliques ont atteint 10 à 30% des siliques. Les itinéraires techniques n'ont eu aucun effet significatif sur ces attaques. La nuisibilité de ces insectes est forte du fait qu'ils s'attaquent aux organes reproducteurs sur une période du cycle où la compensation par ramifications arrive à son terme. La gravité de ces attaques semble être fonction des régions et deux hypothèses peuvent être faites pour tenter d'expliquer ces effets régionaux : la forte pression de colza conventionnel autour des parcelles bio et les zones refuges des bocages. L'Yonne cumule les deux handicaps ; en Eure et Loir, bien que le colza conventionnel y occupe une surface non négligeable, les parcelles testées étaient peu ou pas entourées d'arbres. Enfin, dans le Puy de Dôme, le paysage est assez bocager mais les parcelles suivies étaient peu entourées de colza conventionnel.

Les maladies, les grandes absentes

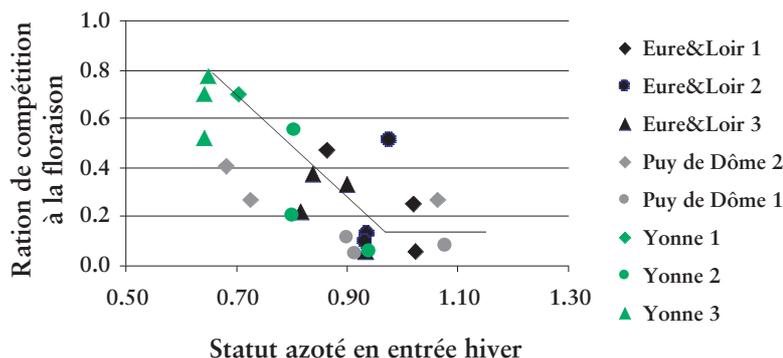
Aucune des maladies communes du colza n'a significativement attaqué les parcelles en 2001-2002 : moins de 1% de plantes attaquées par le Sclerotinia et une note de gravité phoma de 1,5 en moyenne avec 2,5 de maximum sur une échelle de 1 à 9. Les autres maladies comme l'oïdium, la cylindrosporiose et l'alternaria sont passées inaperçues.

Le bilan des solutions aujourd'hui

L'avancement de la date du semis de trois semaines s'avère réalisable en agriculture biologique malgré les contraintes d'organisation du travail, accentuées par la nécessité d'enfouir la matière organique avant le semis. Cette stratégie permet de limiter les attaques de limaces, de grosses altises et de phoma mais pas de mouche du chou. En revanche, le semis précoce a montré ses limites puisque la rapide croissance sensée limiter le développement des adventices n'a pas systématiquement été obtenue. Deux raisons majeures peuvent expliquer ces effets contradictoires :

Figure 2 : Relation entre le statut azoté du peuplement (Indice de nutrition Azoté : INN ; si $INN < 0.9$, le peuplement est carencé en azote) et le ratio de compétition des adventices (=biomasse des adventices / Biomasse adventices + biomasse colza).

Statut azoté en entrée hiver et compétitivité du colza au printemps





©Muriel Valantin-Morison

Finalment, tout en gardant un objectif de maîtrise des adventices dès l'implantation et pendant l'automne, les deux points d'amélioration à trouver concernent la fertilisation azotée de printemps afin de se rapprocher du potentiel des parcelles et la lutte contre les méligèthes. Pour cette dernière, force est de constater que nous sommes assez démunis car les insecticides naturels du type pyrèthres ont une efficacité très faible lors de fortes attaques. Seul un piègeage renforcé pourrait être testé. En effet, des travaux en Suède (Nilsson, 1996) démontrent la capacité de certaines plantes à piéger les méligèthes. C'est pour ces raisons que depuis 2002, des mélanges de variétés, différant par la hauteur et la précocité de floraison, sont en cours. Il est aussi envisagé de tester un piègeage en bande autour de la parcelle avec d'autres variétés dans les années à venir.

C'est entre la sortie de l'hiver et la floraison que le colza exprime rapidement des besoins d'azote. Or, la minéralisation des produits organiques sous forme de composts est faible, et d'autant plus faible qu'ils ne sont pas enterrés. C'est pourquoi différentes stratégies de fertilisation de printemps basées sur des apports de fertilisants organiques à minéralisation rapide enfouis par binaage vont être prochainement testées. ■

Bibliographie

- Bourre JM. 1996. Développement du cerveau et acides gras polyinsaturés. OCL, 3 (3) Mai-Juin 1996 173-178.
- Dejoux J.F., 1999a, Evaluation agronomique environnementale et économique d'itinéraires techniques du colza d'hiver en semis très précoces, Thèse de Doctorat INA P-G Paris 243p.
- Dejoux J.F., Ferré F., Meynard J.M., 1999b, Effects of sowing date and nitrogen availability on competitiveness of rapeseed against weeds in order to develop new strategies of weed control with reduction of herbicide use, 10th International rapeseed congress, Canberra (Australia), 1999/09/26-29, CD-Rom New horizons for an old crop
- Ferré F., Doré T., Dejoux J.F., Meynard J.M., Grandjean G. 2000. Evolution quantitative de la flore adventice dicotylédone au cours du cycle du colza pour différentes dates de semis et niveaux d'azote disponible au semis 11. colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon (France), 06-08 sept.2000
- Kirkegaard JA. and Sarwar 1998. Biofumigation of brassicae. Plant soil 201, 71-89.
- Kirkegaard JA., Gardner PA Angus JF, Koetz EA. 1994, Effect of brassicae break crops on the growth and yield of wheat. Australian journal

of agriculture research, 45, 529-545.

- Nilsson C. Integrated control of pests in oil plants – traps crops for pollen beetles in spring rape. Agriculture – pests diseases and weeds. 37th Swedish crop protection conference, Uppsala, Sweden, 26-27 January, 1996.
- Renaud S. 1996. Prévention secondaire de l'infarctus par le régime. Rôle de l'acide alpha-linolénique. OCL, 3 (3) Mai-Juin 1996 169-172.

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais pu être réalisé sans les agriculteurs eux-mêmes ; je les remercie pour leur accueil, leur patience à répondre à toutes nos questions, leur persévérance et leur témérité à tenter des "essais colza". Je les remercie aussi car j'ai beaucoup appris d'eux et j'espère que la réciprocité est vraie. Il faut aussi remercier le personnel technique de notre laboratoire, tous les experts, les conseillers, ingénieurs qui entourent les agriculteurs et nous ont conseillés et aidés lors des prélèvements de plantes/sols et observations : V. Tanneau (INRA), R. Baudoin, A. Chauveau, C. Bonnemort (CA Aude), D. Chollet (Cetiom-Lyon), Y. Ballanger (Cetiom) et O. Durand et P. Morrand (CA Drôme), E. Michel (Agralia), C. Denis (CA Yonne), M. Garreau (CA Eure et Loir). Enfin, ce travail n'aurait pu se faire et ne pourra se poursuivre sans les aides financières conjointes de l'INRA (Ciab) et de l'ONIRL. Merci donc aussi aux ingénieurs qui ont travaillé à la recherche de ce financement : L. Quéré, R. Reau.

- des levées irrégulières, faibles et hétérogènes, essentiellement dues à un travail du sol superficiel mal maîtrisé et rapide après la moisson du précédent,
- une rapide entrée en carence azotée, liée à une profondeur de sol très limitante (assèchement du profil en eau et azote), un trop faible apport de MO compostée pauvre en azote ou une compétition pour l'azote avec le précédent céréale envahissant. Dans ces conditions, le ralentissement du peuplement conduit en semis précoce a eu pour conséquence une rapide dominance des adventices impossible à rattraper après l'hiver. Le statut azoté du peuplement en entrée d'hiver détermine majoritairement la compétitivité du colza sur les adventices, sous condition d'un peuplement à densité homogène supérieur à 40 pieds/m².

Les améliorations à trouver

Ces travaux débouchent sur un premier jeu de règles de décision pour la date de semis et le désherbage, fonction du potentiel de la parcelle, du type de matière organique disponible sur l'exploitation agricole et du type de flore présent sur la parcelle.

Les solutions existent donc, même si elles doivent être améliorées et même si le colza reste une culture délicate. L'utopie deviendra donc sûrement réalité pour ceux qui veulent s'en donner la peine.

Blés tendres d'hiver

SATURNUS :

barbu – riche en protéines

MOLDAU :

BPS – haut et rustique

Orges d'hiver

SILKE : 6 rangs – incassable

VIRAC : 2 rangs – rustique –

haute en paille

Triticale

ROTEGO : rustique et productif

N'oubliez pas de fortifier vos semences contre la carie avec le **Tillecur**.

Le **Tillecur** est également un répulsif corbeaux sur toutes semences.

**BIO-SEMEST - 7 rue de l'Escaut
51100 Reims**

Tél. : +333 26 85 55 33

Fax : +333 26 85 48 25

www.semest.com • vdb@semest.com

Effets allélopathiques des Brassicacées via leurs actions sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes : analyse bibliographique. Partie 1

Raymond REAU¹
 Jean-Marie BODET²
 Jean-Paul BORDES²
 Thierry DORE³
 Sabah ENNAIFAR⁴
 Anne MOUSSART⁵
 Bernard NICOLARDOT⁶
 Sylvain PELLERIN⁷
 Christian PLENCHETTE⁸
 Alain QUINSAC¹
 Christophe SAUSSE¹
 Bernard SEGUIN²
 Bernard TIVOLI⁵

¹ CETIOM, BP 4, 78850 Thiverval-Grignon
 <reau@cetiom.fr>

² ARVALIS Institut du végétal, 91720 Boigneville

³ INA Paris-Grignon, UMR d'agronomie
 INRA/INA P-G, BP 1, 78850 Thiverval-Grignon

⁴ INRA, UMR d'agronomie INRA/INA P-G,
 BP 1, 78850 Thiverval-Grignon

⁵ INRA, UMR INRA-ENSA Rennes Bio3P,
 BP 35327, 35653 Le Rheu, cedex

⁶ INRA, Unité d'agronomie Laon-Reims-Mons,
 BP 224, 51686 Reims, cedex 2

⁷ INRA, UMR INRA-ENITA Bordeaux

« Transfert sol-plante et Cycle des Eléments
 Minéraux dans les écosystèmes cultivés »,
 BP 81, 33883 Villenave d'Ornon, cedex

⁸ INRA Dijon, BP 86510, 21065 Dijon cedex

Abstract: Brassicas contain glucosinolates (GSL) which decomposition is able to reduce the growth of populations of soil-borne fungi, bacterias or nematodes. These biocid effects on soil-borne microorganisms make a form of allelopathy phenomenon. The allelopathic properties depends on the GLS composition of the Brassicas: Indian mustard and in a lower extend Oilseed rape could have the most powerful action, White mustard would have a weaker action. These properties also depends on crop residues: green manure with quick decomposition would result with a higher action than crop residues after grain harvest.

The main mechanisms are known. In vitro, isothiocyanates obtained from the GSL decomposition inhibit all the phases of the cycle of *Aphanomyces eutiches*, the fungus responsible for root rot of peas. The mycelian growth of *Gaeumannomyces graminis tritici*, the fungus responsible for the wheat take all is inhibited by some isothiocyanates at low concentration.

Furthermore, several studies give the evidence that the incorporation of Brassicas residues into the soil does inhibit the growth of both soil-borne pathogens. At last, the presence of roots of Brassicas inhibits the germination of the mycorrhizas known to improve the mineral nutrition of its host plant. This phenomenon could explain the depressive effect of oilseed rape on the nutrition of a subsequent maize. This knowledge of Brassicas effects into cropping systems offers issues for a better management of precedent effects of Brassicas; these effects being positive (integrated crop protection) or negative (management of subsequent crop nutrition after Brassicas).

Key words: allelopathy, Brassicas, glucosinolates, soil-borne pathogens, mycorrhizas

Les glucosinolates (GSL) sont des composés glucidiques soufrés fréquents dans des familles de dicotylédones comme les Brassicacées. Ils jouent un rôle dans la résistance des Brassicacées aux ravageurs et aux agents pathogènes. Ainsi Bodnaryk [1] a montré que la sinalbine, glucosinolate aliphatique, protège les cotylédons de jeunes plants de moutarde blanche (*Sinapis alba*) de l'attaque du coléoptère *Phyllotreta cruciferae*. Menard [2] a quant à lui mis en évidence le rôle de deux glucosinolates indoliques, la sinigrine et la glucobrassicine, et de leurs dérivés dans la résistance du chou-fleur (*Brassica oleracea*) à *Peronospora parasitica* (agent du mildiou des Brassicacées). Les produits issus de la dégradation des glucosinolates ont également un rôle biologique, puisqu'ils sont susceptibles d'influencer la croissance des populations fongiques, de nématodes, et bactériennes du sol. Parmi ces produits, les isothiocyanates (ITC) auraient les propriétés biocides les plus efficaces [3], certains composés de cette famille entrent d'ailleurs dans la composition de fumigants du commerce (MethylITC, Metam sodium). Ces composés interagiraient de façon non spécifique et irréversible avec les protéines pour former des produits stables. Le fait que les Brassicacées fassent partie des rares plantes à ne pas posséder d'endomycorhizes pourrait égale-

Article reçu le 2 décembre 2004
 Accepté le 11 février 2005

FONDAMENTAL

La seconde partie de cet article paraîtra dans le prochain numéro de la revue.

OCL VOL. 12 N° 3 MAI-JUIN 2005 261

ment s'expliquer par la présence dans leur rhizosphère d'ITC toxiques dérivés des glucosinolates soufrés qu'elles contiennent [4, 5].

Ces effets biocides sur les micro-organismes du sol liés à la présence de composés libérés dans le milieu sont une des formes du phénomène plus général d'allélopathie, définie par Rice [6] comme « tout effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante sur une autre à travers la production de composés chimiques libérés dans l'environnement ». Les mécanismes à l'origine de ces phénomènes et la manière de les aborder en agronomie font l'objet d'une attention croissante [7] ; l'utilisation dans les successions de cultures d'espèces et de variétés présentant des propriétés allélopathiques s'exprimant contre des bioagresseurs est une des voies intéressantes de valorisation du phénomène, qui pourrait ainsi être utilisé dans des stratégies de protection intégrée des cultures. C'est dans ce contexte que les cultures de Brassicacées sont fréquemment citées dans la littérature pour leurs propriétés assainissantes. Les dérivés des glucosinolates peuvent en effet être impliqués dans la diminution de problèmes parasitaires telluriques liés à des nématodes (*Meloidogyne incognita* [8]), bactéries (*Salmonella typhimurium* [9]) ou champignons (*Rhizoctonia solani* [10]), *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* [11], *Pythium ultimum* [12]...). Inversement, les Brassicacées pourraient être impliquées, de manière négative cette fois-ci, dans des perturbations des phénomènes de mycorhization des cultures suivantes. Compte tenu de leur action sur les micro-organismes du sol, la dégradation des glucosinolates présents dans leurs résidus de récolte pourrait donc expliquer, au moins partiellement, des effets précédents des Brassicacées dans les rotations. La présente revue aborde les mécanismes qui seraient à l'origine de ces effets, de l'importance des glucosinolates dans la plante à leur dégradation. Trois cas concernant des champignons sont ensuite présentés : deux cas impliquant des agents pathogènes, *Aphanomyces euteiches*, agent de la maladie de la pourriture molle du pois, et *Gaeumannomyces graminis*, maladie agent du piétin échaudage du blé, puis le cas des endomycorhizes, qui contribuent à la nutrition phosphatée de cultures comme le maïs.

Les glucosinolates et leurs produits de dégradation

Les molécules bioactives mises en jeu dans les mécanismes de biofumigation ou d'allélopathie chez les Brassicacées sont essentiellement des isothiocyanates issus du catabolisme des GSL présents dans les tissus des végétaux enfouis dans le sol. L'utilisation ou la maîtrise des processus complexes d'allélopathie ou de biofumigation nécessite de connaître le mieux possible les paramètres tels que la structure des composés précurseurs, leur diversité et leur quantité, la nature des matrices végétales les renfermant, la présence de cofacteurs (enzymatiques ou non), ainsi que les conditions du milieu (température, pH). Après une présentation générale des GSL et de leurs dérivés, cette partie envisage leur présence et leur réactivité dans le cadre des espèces *Brassica napus* L. var. *oleifera* (colza), *B. juncea* (moutarde brune) et *Sinapis alba* (moutarde blanche), plantes potentiellement intéressantes pour la biofumigation et raisonnablement utilisables dans les rotations.

Structure et diversité des glucosinolates

Les GSL sont des β thio-D-glucopyranosides anioniques constitués d'un groupement thiohydroximate-O-sulfonate lié à du glucose et à une chaîne latérale. Les GSL ont une grande similitude de structure (figure 1). À l'exception de certains, contenant un groupement cinnamoyl sur le glucose [13], tous possèdent le même squelette et diffèrent seulement par la nature de la chaîne latérale R. Celle-ci peut être constituée d'une chaîne carbonée linéaire ou ramifiée, posséder des insaturations, des groupements hydroxyle, cétone ou un atome de soufre à un degré

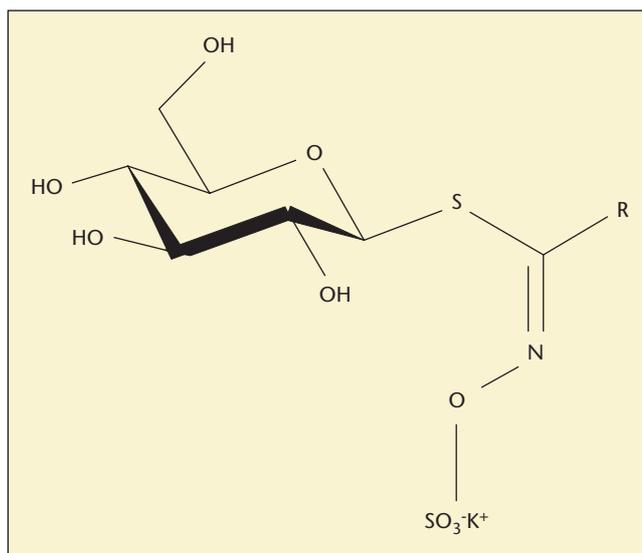


Figure 1. Structure générale des glucosinolates.

d'oxydation variable. Elle peut aussi renfermer un cycle ou un hétérocycle plus ou moins substitué (figure 1).

Les GSL sont au nombre d'une centaine environ. Ils peuvent être classés en plusieurs grandes familles (tableau 1) en fonction de la chaîne latérale R : les alkylGSL, les aralkylGSL et les indolylGSL. Une autre famille de GSL, les cinnamoylGSL [13, 14], se caractérise par la présence sur le glucose en position 2 et/ou 6 de dérivés de l'acide cinnamique : acide sinapique ou isoféruleique. Les structures de la partie R des cinnamoylglucosinolates sont peu variables.

Biosynthèse des glucosinolates

La diversité et la parenté des GSL s'expliquent par les voies de biosynthèse. Les trois classes : alkylglucosinolates, aralkylglucosinolate et indolylglucosinolates dérivent respectivement de la méthionine, de la phénylalanine et du tryptophane.

La volatilité des ITC dépend de la structure de la chaîne latérale R associée à la fonction isothiocyanate. Lorsque R est un groupement alkyle non hydroxylé, par exemple prop-2ényl ou but-3-ényl, l'ITC est volatil. Inversement lorsque R est un groupement aralkyle, par exemple benzyle ou 2-phénylethyle, l'ITC correspondant est peu volatil (tableau 1).

Présence des glucosinolates dans le règne végétal

Les GSL ont été détectés dans 11 familles de plantes dicotylédones. Ils sont présents dans presque toutes les familles constituant l'ordre des Capparales *sensu* Cronquist (*Capparaceae*, *Cruciferae*, *Gyrostemonaceae*, *Limnanthaceae*, *Moringaceae*, *Résédaceae*, *Salvadoraceae*, *Tovariaceae*, *Tropaeolaceae*) et plus rarement dans les familles *Caricaceae*, *Euphorbiaceae* [15]. Certains GSL (benzylglucosinolate) peuvent être largement rencontrés dans la classification ou au contraire (méthylglucosinolate) être spécifiques d'une origine botanique et constituer alors un critère chémotaxonomique [16].

Par ailleurs, ils peuvent être présents en nombre et en quantités très différents. La moutarde blanche n'en contient que deux alors que le raifort (*Armoracia rusticana* L.) en compte plus de 30, les teneurs variant de moins de 0,02 $\mu\text{mol/g}$ à plus de 100 $\mu\text{mol/g}$ [15]. On peut rencontrer aussi à l'intérieur d'une espèce une diversité importante. Les multiples variétés de chou (*B. oleracea* L.) ont des teneurs très variables et certains GSL y sont présents de manière sporadique [17]. La même variabilité

Tableau 1. Les glucosinolates (GSL) rencontrés chez le colza, la moutarde blanche et la moutarde brune et leurs principaux produits de dégradation.

Glucosinolates				Produit de dégradation		
Classe	Nomenclature semi-systématique	Nomenclature triviale	Abréviation	Type (1)	Volatilité (2)	
Alkyl-	prop-2-ényl-	Sinigrine	SIN	ITC	++++	
	but-3-ényl-	Gluconapine	GNA	ITC	+++	
	pent-4-ényl-	Glucobrassicinapine	GBN	ITC	+++	
	(R)-2-hydroxybut-3-ényl-	Progoitrine	PRO	OT	-	
	(S)-2-hydroxybut-3-ényl-	Epi-progoitrine	E-PRO	OT	-	
	(R)-2-hydroxypent-4-ényl-	Gluconapoléiférine	GNL	OT	-	
	3-méthylthiopropyl-	Glucoibervirine	GIV	ITC	+++	
	(R)-3-méthylsulfanylpropyl-	Glucoibérine	GIB	ITC	++	
	4-méthylthiobutyl-	Glucocérocine	GER	ITC	+++	
	(R)-4-méthylsulfanylbutyl-	Glucoraphanine	GRA	ITC	++	
	(R)-5-méthylsulfanylpentyl-	Glucolalysine	GAL	ITC	++	
	Aralk-	benzyl-	Glucotropaéoline	GTL	ITC	+
		2-phényléthyl-	Gluconasturtiine	GST	ITC	+
4-hydroxybenzyl-		Sinalbine	SNB	SCN ⁻	-	
Indoly-	indol-3-ylméthyl-	Glucobrassicine	GBS	SCN ⁻	-	
	1-méthoxyindol-3-ylméthyl-	Néoglucobrassicine	NGBS	SCN ⁻	-	
	4-hydroxyindol-3-ylméthyl-	4-hydroxyglucobrassicine	4-OHGBS	SCN ⁻	-	
	4-méthoxyindol-3-ylméthyl-	4-méthoxyglucobrassicine	4-OMGBS	SCN ⁻	-	

(1) ITC : Isothiocyanate, OT : oxazolidine-2-thione, SCN⁻ : ion thiocyanate, (2) ++++ : très volatil ; - : non volatil).

quantitative peut être rencontrée à l'intérieur d'une variété, entre plantes ou entre parties de plantes. Les graines, les feuilles, les racines ou les fleurs ne renferment pas exactement les mêmes GSL. Les liens de parenté existant entre les principales espèces (le colza est un hybride naturel entre *B. oleracea* L. (chou) et *B. campestris* L. (navette)) sont mis en évidence par le nombre de chromosomes et par la nature des différents GSL rencontrés dans ces espèces [18, 19].

Les GSL sont donc présents dans de nombreux végétaux de la famille des Brassicacées qui constituent une part importante des ressources alimentaires pour l'Homme et les animaux. Choux, navet, radis, cresson, rutabaga, crambe, raifort, moutardes sont largement utilisés comme légume ou condiment. Le colza, la navette, le crambe et la moutarde produisent des fourrages ou des graines utilisées en alimentation humaine comme en alimentation animale.

Rôle des glucosinolates dans la plante

Les GSL ont longtemps été considérés comme les formes neutralisées de molécules toxiques pour l'organisme végétal [20]. Il est admis maintenant qu'ils peuvent jouer un rôle plus actif dans le développement et la défense de la plante. Néanmoins, la connaissance de leur métabolisme est encore parcellaire et la contribution de la myrosinase à ces phénomènes reste à préciser [21].

L'étude de l'accumulation des GSL chez le colza indique qu'ils sont des réservoirs de soufre organique utilisable pour la synthèse des acides aminés en cas de nutrition carencée [22]. De plus, les indol-3-ylméthylglucosinolates pourraient être des précurseurs d'auxines telles que l'acide indol-3-ylacétique [23]. Cependant, la fonction la plus reconvenue des GSL et de leurs métabolites dans la plante se situe au niveau des interactions avec le monde extérieur : micro-organismes, insectes, animaux. La localisation périphérique des cellules les plus riches en GSL dans les organes végétatifs des plantes laisse penser que cette réaction constitue un moyen de défense non sélectif contre toutes sortes d'agresseurs (micro-organismes, insectes, animaux) [24, 25]. La réactivité élevée des isothiocyanates envers des fonctions chimiques très répandues dans les organismes vivants (amines, sulfures, hydroxyle) est doublée d'une volatilité importante [26]. Bien que non volatiles, les quinones dérivées de

l'oxydation du 4-hydroxyindol-3-ylméthylglucosinolate, pourraient aussi avoir des effets semblables [27].

Les quantités d'isothiocyanates mises en jeu par le métabolisme à partir des GSL sont très faibles, mais ces composés peuvent avoir des activités antifongiques et antibactériennes [15, 28, 29]. Ils peuvent aussi être très répulsifs pour certains insectes, alors que pour d'autres, notamment ceux vivant habituellement sur les Brassicacées, ils peuvent stimuler la ponte et la prise de nourriture [30]. À l'occasion d'une attaque d'insectes ravageurs ou d'animaux, des quantités d'isothiocyanates beaucoup plus importantes peuvent être libérées par l'action de la myrosinase sur les GSL stockés dans les tissus périphériques de la plante. Ainsi, il a été constaté que les nouvelles variétés de colza à teneur en GSL abaissée étaient davantage appréciées par la faune sauvage [30, 31]. L'interaction entre l'insecte et les produits de dégradation des GSL se réalise à distance ou au contact de la plante. Elle pourrait parfois être retardée et avoir lieu dans l'insecte après ingestion des GSL, comme le laisse penser la découverte d'une activité myrosinase dans le puceron cendré du chou [32]. Les GSL pourraient être métabolisés en composés moins toxiques que les isothiocyanates [26].

Teneurs en glucosinolates chez le colza, la moutarde blanche et la moutarde brune

Chez le colza, le 2-hydroxybut-3-énylglucosinolate (PRO) est majoritaire dans la graine, le 2-phényléthylglucosinolate (GST) l'est dans la racine et l'indol-3-ylméthylglucosinolate (GBS) dans les feuilles. La teneur varie aussi en fonction du degré de développement de la plante, de fortes valeurs étant constatées lors des périodes de croissance importante [21]. Les teneurs mesurées à mi-floraison par Kirkegaard et Sarwar (tableau 2), confirment ces résultats à l'exception de la GBS dans les feuilles. En général, les résultats montrent une assez grande disparité au niveau des teneurs mesurées ; la biosynthèse et l'accumulation des GSL étant influencée par le stade de développement de la plante, sa fertilisation azotée ou soufrée ainsi que certains oligo-éléments [33] (tableau 2). Chez la moutarde blanche, les GSL aromatiques (aralkylGSL) sont majoritaires. Dans la partie aérienne, il y a prédominance de la SNB et dans les racines la GST, la SNB et la GTL sont présentes à des teneurs voisines.

Tableau 2. Teneurs en glucosinolates ($\mu\text{mol/g}$) des racines et parties aériennes de colza (à huile et fourrager), de moutarde blanche et de moutarde brune. Stades de prélèvement : (a) : mi-floraison ; (b) : inconnu [34, 35].

Plante	Organe	AlkylGSL					AralkylGSL				IndolylGSL			Ref	
		SIN	GRA	GNA	PRO	GBN	GNL	GTL	SNB	GST	GBS	4-OH GBS	4-OM GBS		NGBS
<i>Brassica napus</i>	Partie aérienne	-	0.2-0.3	0.5-3.3	1.6-9.2	0.8-7.8	0.6-1.9	-	-	0.6-2.3	0.2-0.4	-	0.1	0.1-0.3	(a)
var. <i>oleifera</i> (à huile)	Racines	-	0.4-0.7	0.4-1.0	0.3-3.7	0.4-4.4	0.7-2.6	1.0-2.7	-	7.9-19.3	0.3-0.5	-	0.2-0.7	0.1	(a)
<i>B. napus</i> var.	Partie aérienne	-	0.5-0.8	0.3-8.7	0.5-5.9	0.5-4.5	0.8-2.9	-	-	0.4-0.9	0.1-0.6	0.1	0.1	0.1-0.4	(a)
<i>oleifera</i> (fourrager)	Racines	-	0.5-0.9	0.7-10.2	1.3-5.0	0.6-7.5	0.8-2.0	1.1-3.4	-	7.1-19.5	0.2-1.1	-	0.4-1.1	0.1-0.4	(a)
<i>B. napus</i> (var. Humus)	Feuilles	-	-	1.0	2.3	3.3	-	-	-	0.4	0.5	traces	-	-	(b)
<i>Sinapis</i>	Partie aérienne	-	-	-	0.4-0.5	1.0-3.4	-	1.9-9.6	9.0-14.4	0.3-0.4	0-0.1	-	-	0-0.1	(a)
<i>alba</i>	Racines	-	0.9-1.7	-	0-0.4	-	-	2.0-5.3	2.7-3.9	2.1-4.1	0-0.2	-	0.1-0.9	0.2-1.2	(a)
<i>B. juncea</i>	Partie aérienne	0.1-18.7	-	0.0-7.5	-	0.1-2.0	0.1-0.3	-	-	0-1.3	0-0.2	0-0.1	-	0.1-0.2	(a)
	Racines	0-4.8	-	0-1.9	-	0-0.5	-	0-0.6	-	2.5-12.5	0-0.9	0-0.2	0.1-1.1	0-0.7	(a)

Chez la moutarde brune, les alcénylGSL (SIN, GNA et GBN) sont présents avec prédominance de la SIN. En revanche, dans les racines, la GST est majoritaire.

Hydrolyse enzymatique des glucosinolates

Dans toutes les plantes contenant des GSL, se trouvent également des enzymes appelées myrosinases (thioglycoside glucohydrolase E.C. 3.2.3.1.) capables de catalyser leur dégradation en composés présentant le plus souvent une certaine activité biologique. Des activités du type myrosinase ont été détectées dans d'autres sources, telles que les moisissures [36], la mouche du chou [32], la flore microbienne intestinale de mammifères [3, 37-39].

Dans la plante, la myrosinase est située dans des cellules peu nombreuses appelées idioblastes (*myrosin cells*) dont le type dépend de leur localisation. Dans les parties vertes, elles appartiennent au tissu parenchymateux ; dans les racines, au cortex, et dans les graines, elles sont présentes dans l'embryon [24]. À l'intérieur de la cellule, la myrosinase est uniformément présente dans le cytoplasme avec quelques agglomérations sur des membranes, alors que les GSL sont confinés dans les vacuoles [40]. Ces observations expliquent la stabilité des GSL dans les tissus intacts et leur autolyse observée lors de la rupture de l'intégrité cellulaire provoquée par un broyage.

La myrosinase hydrolyse la liaison thioglycosidique des GSL pour donner le D-glucose et un thiohydroximate-O-sulfonate. Ce composé instable libère spontanément le sulfate et se transforme ensuite en fonction de la nature de la chaîne latérale et des conditions du milieu en composés divers tels que les isothiocyanates, thiocyanates organiques ou ioniques, cyanoépithioalcanes, nitriles, oxazolidine-2-thiones (figure 2). Les conditions optimales d'activité pour les myrosinases sont généralement une température d'environ 55 °C et un pH compris entre 4,0 et 9,0 [41]. Certaines isoenzymes peuvent être plus ou moins activées par l'acide L-ascorbique (vitamine C). Ce cofacteur agit par effet allostérique : il modifie, en se liant à elle, la conformation de l'enzyme dans la région de son site actif [42]. La température optimale d'activité est alors abaissée de 55 °C à 35 °C. Il a été constaté que l'activité peut être multipliée par un facteur 100 si la concentration de l'acide ascorbique est voisine de 1 mM, néanmoins des concentrations supérieures à 5 mM provoquent des inhibitions d'activité [43]. L'activité de la myrosinase dépend aussi de son origine botanique. La myrosinase extraite de la moutarde blanche est cinq à dix fois plus active que celle extraite du colza [44]. L'activité de la myrosinase dans la plante est réduite au moment de la maturité [15, 45].

Les produits de la dégradation enzymatique des glucosinolates (figure 2)

Isothiocyanates

De nombreux GSL sont transformés en présence de myrosinase en isothiocyanates (ITC) stables. Ce catabolisme « normal ou naturel » a valu autrefois aux GSL le nom de glucosides d'essences de moutarde ; l'exemple le plus connu est la sinigrine, principal glucosinolate présent dans la moutarde brune et la moutarde noire (*Brassica nigra*) et qui se dégrade en prop-2-ényl ITC (essence de moutarde). Les ITC sont des molécules très réactives, notamment vis-à-vis des protéines [46] et le plus souvent volatiles. L'association de ces deux propriétés rend les ITC biologiquement actifs car ils sont facilement mis en contact avec des récepteurs. Lorsque la chaîne latérale R du glucosinolate contient une fonction hydroxyle en position 2 ou 3, l'isothiocyanate résultant est instable et se cyclise spontanément pour donner un hétérocycle à 5 ou 6 chaînons : une oxazolidine-2-thione (OT) ou une tétrahydro-1,3-oxazine-2-thione [28]. Ces derniers composés ont également une activité biologique mais sont beaucoup moins volatils que les ITC. Leurs effets ont surtout été mis en évidence dans des dysfonctionnements thyroïdiens chez l'homme ou l'animal. Cependant, dans un certain nombre de cas, la dégradation ne produit pas des ITC. Un pH faible [47], la présence d'ions ferreux ou d'un facteur protéique spécifique (ce dernier, observé avec le *Crambe abyssinica*) favorisent la formation de nitriles [48, 49].

Épithionitriles

La formation d'un épithionitrile est subordonnée à plusieurs conditions : la présence d'une insaturation terminale sur la chaîne latérale, d'un élément favorisant la formation d'un nitrile (ions Fe^{2+}) et d'un nouveau facteur appelé protéine épithiospécifique (ESP). Il y a alors création d'une fonction épithio. Le facteur ESP a été détecté dans *Crambe abyssinica*, *Brassica napus* et *B. oléracéa* [50, 51]. Il est incapable d'hydrolyser les GSL car il agit après l'action de la myrosinase.

Formation d'ions thiocyanates

Les isothiocyanates aromatiques ou indoliques sont instables en milieu neutre ou alcalin. Ils se scindent facilement en ions thiocyanates et ions carbonium stables. Ceux-ci peuvent néanmoins se transformer. Le 4-hydroxybenzylglucosinolate se dégrade en ion thiocyanate et en alcool

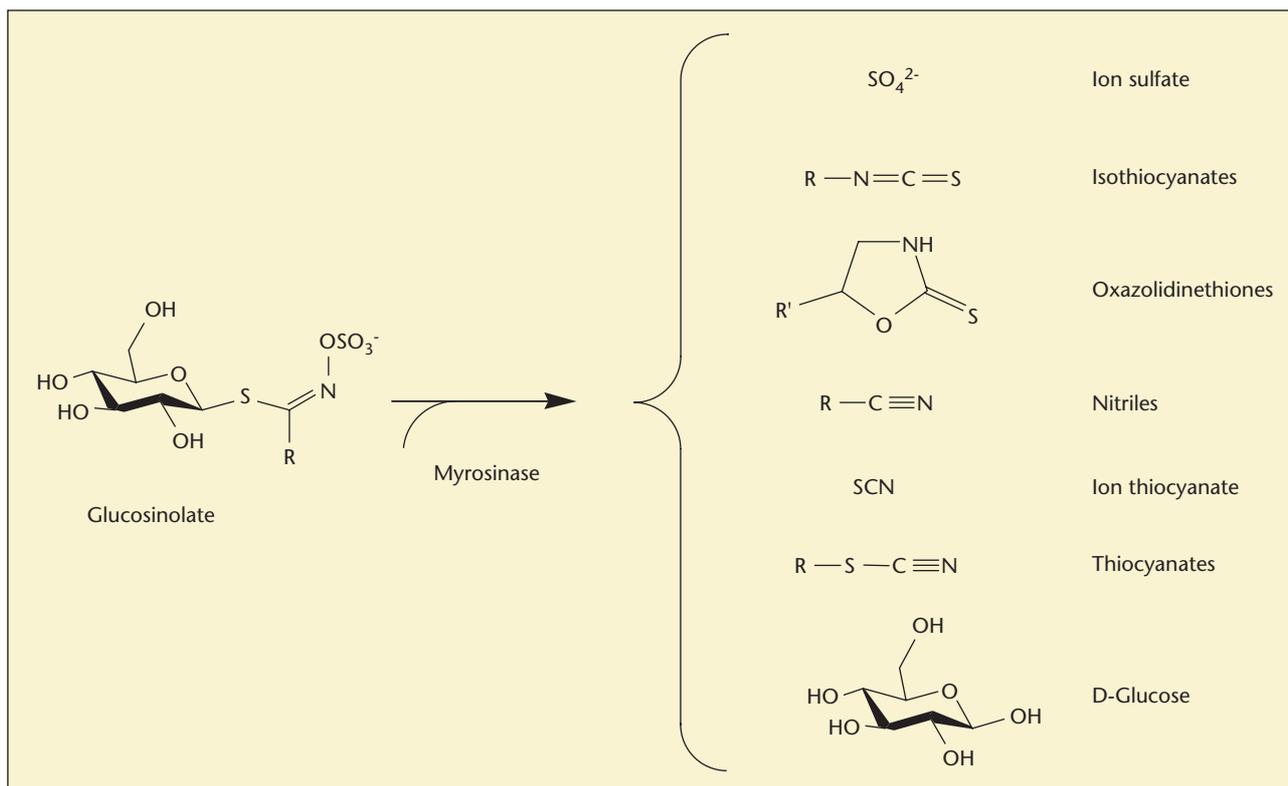


Figure 2. Les principaux produits de dégradation des glucosinolates.

para-hydroxybenzylique [26]. La dégradation des GSL indoliques conduit à davantage de composés [52].

Formation de thiocyanates organiques

Les voies de formation de ces composés sont mal connues. Les thiocyanates organiques ont été observés lors de l'hydrolyse des GSL présents seulement dans les genres botaniques *Thlaspi*, *Lepidium*, *Alyssum* et *Coronopus*. L'existence d'un facteur enzymatique agissant après la myrosinase et orientant la transformation de l'aglycone vers le thiocyanate au lieu de l'isothiocyanate a été évoquée assez tôt [53]. Cette enzyme, une isomérase, modifie la configuration de l'aglycone autour de la liaison C=N pour rendre prédominante l'attaque de la chaîne latérale R au niveau du soufre au lieu de l'azote.

Conversion des glucosinolates en produits actifs en biofumigation

La biofumigation est un élément de lutte contre les ravageurs, les maladies fongiques ou les adventices. Elle met en œuvre des substances chimiques actives provenant de la dégradation des GSL présents dans les Brassicacées cultivées et enfouies dans le sol. Les analyses de sols et de plantes ont permis d'y identifier des isothiocyanates (ITC) comme d'autres produits, ce qui suggère l'existence des multiples voies de dégradation des GSL. Le 2-phényléthyl-ITC provenant de la GST qui est le glucosinolate majoritaire dans les racines est le principal ITC détecté dans ces organes (de 5 à 28 $\mu\text{mol/g}$ [34]).

La conversion des GSL précurseurs en ITC ou autres produits dosés (nitriles) n'est pas complète et des rendements de seulement 15 % ont été observés [39]. Les propriétés physico-chimiques des ITC telles que leur volatilité (allyl- et but-3-enyl-ITC) ou leur réactivité élevée avec le milieu peuvent faciliter leur disparition dès leur formation et expliquer les

faibles valeurs de taux de conversion observés. Compte tenu de la bioactivité des ITC et de leur présence observée dans de nombreuses expérimentations, la problématique de la biofumigation est traitée principalement autour de ces composés.

Propriétés des isothiocyanates du colza, et des moutardes blanche, brune et noire utilisés en biofumigation

Ces Brassicacées sont appelées à être utilisées en biofumigation pour leur contenu en GSL précurseurs d'isothiocyanates et également pour leurs qualités agronomiques. Les isothiocyanates présents dans ces plantes peuvent être rangés dans l'ordre de leur volatilité croissante de la manière suivante : 2-phényléthyl-, benzyl-, penten-4-yl-, but-3-enyl et allyl- ce qui signifie que le phényléthyl-ITC serait beaucoup plus persistant dans le sol que l'allyl-ITC qui peut disparaître au fur et à mesure de sa formation. Ces caractéristiques de volatilité peuvent augmenter ou diminuer l'efficacité de l'action de l'ITC sur le récepteur selon que celui-ci sera sensible à une action « coup de fouet » ou au contraire longue durée. En fonction de la sensibilité des cibles ou récepteurs et de leur accessibilité, les effets d'un même ITC peuvent donc être différents.

Cependant, il est possible de connaître dans les plantes utilisées en fumigation (colza, moutardes blanche et brune) la teneur et la nature des GSL, et ainsi de prévoir leur efficacité potentielle en traitement de biofumigation sur la base des propriétés des produits de leur dégradation. Le tableau 3 résume le potentiel en biofumigation de chaque plante et partie de plante à partir des teneurs des GSL dans ces plantes et des propriétés de leurs produits de dégradation présentées précédemment dans les tableaux 2 et 1.

Chez le colza, le potentiel de biofumigation est notable à cause du pent-4-ényl-ITC (partie aérienne) et du phényléthyl-ITC (racines). Ces deux ITC ont des actions respectivement rapide et lente qui peuvent

Tableau 3. Présence et effets potentiels en fumigation des principaux produits de dégradation des glucosinolates des organes de colza, moutarde blanche et moutarde brune.

Plante	Organe	Produits de dégradation des glucosinolates et type d'action						
		OT	SCN ⁻	Phényléthyl-ITC	Benzyl ITC	Pent-4-ényl ITC	But-3-ényl ITC	Allyl-ITC
		Inconnue	Inconnue	(GST)	(GTL)	(GBN)	(GNA)	(SIN)
Colza	Parties aériennes	-	--	+	o	++	+	o
	Racines	-	o	+++	+	+	+	o
Moutarde blanche	Parties aériennes	o	----	O	++	+	O	o
	Racines	o	--	+	++	o	O	o
Moutarde brune	Parties aériennes	o	o	O	o	+	++	+++
	Racines	o	o	++	o	o	+	++

ITC : Isothiocyanate ; OT : oxazolidine-2-thione ; SCN⁻ : ion thiocyanate ; o : absence ; + : présence et effet potentiel ; - : présence et effet potentiel négligeable ; (le nombre de signes - et + indique le degré de présence).

présenter une complémentarité intéressante. Chez la moutarde blanche, le potentiel provient du phényléthyl-ITC (racines), du benzyl-ITC (parties aériennes et racines) et du pent-4-ényl-ITC (parties aériennes). Globalement, les ITC de la moutarde blanche sont moins volatils que ceux du colza et devraient avoir une action plus lente. Chez la moutarde brune, les alcénylGSL (SIN, GNA et GBN) sont présents en quantité importante dans les parties aériennes et sont hydrolysés en ITC volatils susceptibles d'avoir une action rapide. Dans les racines, la SIN et la GST sont présentes et peuvent libérer l'allyl-ITC très volatil et le phényléthyl-ITC qui l'est beaucoup moins. En résumé, dans ces trois plantes, les teneurs observées en GSL et les propriétés connues des produits de dégradation indiquent que la moutarde brune doit avoir l'action la plus puissante. En revanche, le colza et la moutarde blanche sont capables de libérer des ITC à action plus lente. Ces conclusions reposent cependant sur des hypothèses de disponibilité et d'action des ITC qui restent théoriques, et qu'il conviendrait de vérifier *in situ*.

Dégradation des résidus de récolte de colza oléagineux et des engrais verts à base de Brassicacées et devenir des glucosinolates dans le sol

À la maturité du colza destiné à la production de graines oléagineuses, seules les graines sont récoltées en Europe. Les pailles comme les racines restent dans la parcelle où elles sont plus ou moins rapidement incorporées dans le sol. Au moment de la destruction des cultures intermédiaires utilisées comme engrais vert, les Brassicacées utilisées (moutardes, colza) sont généralement enfouies avec éventuellement un broyage préalable, et c'est la plante entière encore à un stade végétatif qui est incorporée au sol.

L'importance de ces résidus, et la façon dont ils se dégradent, est importante à connaître parce qu'il est probable qu'elle conditionne la dégradation des GSL et la libération des composés actifs comme les ITC.

Quantités de résidus restituées au sol

Les quantités de résidus restituées au sol après récolte sont très variables et dépendent fortement de la croissance de la culture et notamment de son niveau de fertilisation azotée (tableau 4). Enfin, devraient être prises également en considération les quantités de graines perdues sur la parcelle avant et au cours de la récolte et qui peuvent représenter environ 10 % du rendement (données CETIOM non publiées, [54]).

Caractéristiques et biodégradabilité des résidus de récolte

Les caractéristiques biochimiques et physiques des résidus de culture déterminent leur cinétique de décomposition, la proportion de compo-

sés susceptibles de diffuser vers le sol, le mode de colonisation microbienne et la nature des populations microbiennes impliquées lors de la décomposition. Ces caractéristiques varient pour une espèce donnée avec le degré de maturité, et les conditions de croissance et de nutrition. Ces caractéristiques sont très variables selon les organes considérés. La teneur en azote (ou le rapport carbone/azote) est un critère qui permet de prédire globalement l'effet net de l'incorporation des résidus sur la dynamique de l'azote minéral du sol (minéralisation nette ou organisation nette d'azote) ; c'est le critère qui est retenu dans le module « résidus » du modèle de culture STICS [57] pour décrire la qualité des résidus de culture et prévoir les quantités d'azote libérées lors de leur décomposition. Pour une même culture, cette teneur varie fortement entre organes et pour chaque organe en fonction de la nutrition azotée de la culture (suivant entre autres le précédent cultural et la fertilisation azotée). Les cultures intermédiaires utilisées comme piège à nitrates sont généralement d'une teneur en azote plus élevée (figure 3).

Les tissus végétaux sont principalement constitués de composés solubles, d'hémicelluloses, de celluloses et lignine dont les proportions respectives sont fonction des organes considérés (tableau 5). Ces proportions sont différentes et moins variables pour les résidus jeunes (type cultures intermédiaires) avec des teneurs en composés solubles généralement plus élevées et des teneurs en cellulose et lignine plus faibles que les résidus à maturité (figure 4).

Ces proportions déterminent en définitive l'aptitude intrinsèque des résidus à être décomposés, tout au moins sur le court terme comme l'illustre la figure 5.

Pour les résidus de cultures intermédiaires, la décomposition du carbone est relativement comparable pour différentes espèces (radis, moutarde,

Tableau 4. Quantités de matière sèche et d'azote présentes dans les différents organes d'une culture de colza à maturité en fonction du niveau de fertilisation azotée [55, 56].

Fertilisation (kg N/ha)		0	135	270
Grains	t m.s./ha	2,79	4,13	4,87
	kg N/ha	62,50	100,60	155,80
Parois de siliques	t m.s./ha	2,12	3,10	4,33
	kg N/ha	6,70	12,20	26,00
Tiges	t m.s./ha	3,17	5,82	6,58
	kg N/ha	13,70	21,50	60,10
Racines	t m.s./ha	1,06	1,01	0,86
	kg N/ha	4,90	5,00	7,90
Feuilles mortes	t m.s./ha	2,36	4,41	4,78
	kg N/ha	26,90	48,6	95,20
Indice de récolte	m.s.	0,24	0,22	0,23
	N	0,54	0,54	0,45

Tableau 5. Caractéristiques biochimiques de divers organes de colza [58].

Organes	Tiges	Parois de siliques	Racines
C total (%) ^a	45,2	43,7	43,6
N total (%) ^a	0,35	0,38	1,10
C-soluble (%) ^b	24,8	28,9	27,2
C-hémicellulose (%) ^b	17,9	20,7	19,3
C-cellulose (%) ^b	42,0	40,6	32,3
C-lignine (%) ^b	14,9	12,7	19,5

^a % matière sèche.

^b % du carbone du résidu.

ray-grass) (figure 6), ce qui s'explique par les compositions biochimiques comprises dans une gamme relativement étroite (figure 4). Par contre, la dynamique de l'azote minéral après enfouissement est elle aussi fortement liée à la teneur en azote des matériaux végétaux (figure 3).

Par ailleurs, ces caractéristiques biochimiques et l'organisation des parois des tissus végétaux déterminent également les propriétés mécaniques (résistance au cisaillement et à la flexion) des résidus qui jouent par exemple un rôle très important lors des opérations mécaniques de travail du sol et de semis en présence de paille [59].

Finalement, ces caractéristiques font apparaître les cultures intermédiaires comme des résidus riches en azote dont la dégradation des parties

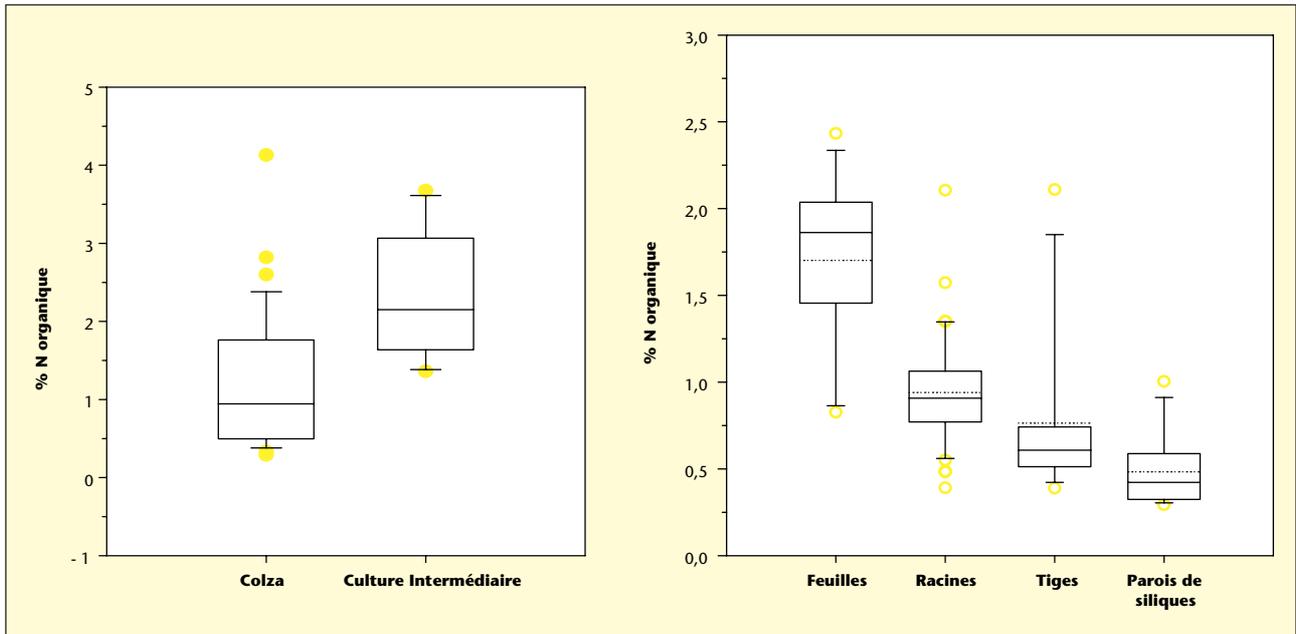


Figure 3. Variabilité de la teneur en azote de différents organes de colza à maturité (source : INRA Reims-CETIOM, résultats d'enquête non publiés) et comparaison des teneurs en azote des résidus de colza avec ceux des cultures intermédiaires au moment de l'enfouissement (d'après Nicolardot et al., non publié).

Légende des boîtes : bord supérieur et inférieur = 10^e et 90^e quintiles ; ligne continue à l'intérieur de la boîte = médiane ; ligne discontinue = moyenne ; extrémités des barres = 5^e et 95^e quintiles ; symboles = données extrêmes (d'après Nicolardot et al., non publié).

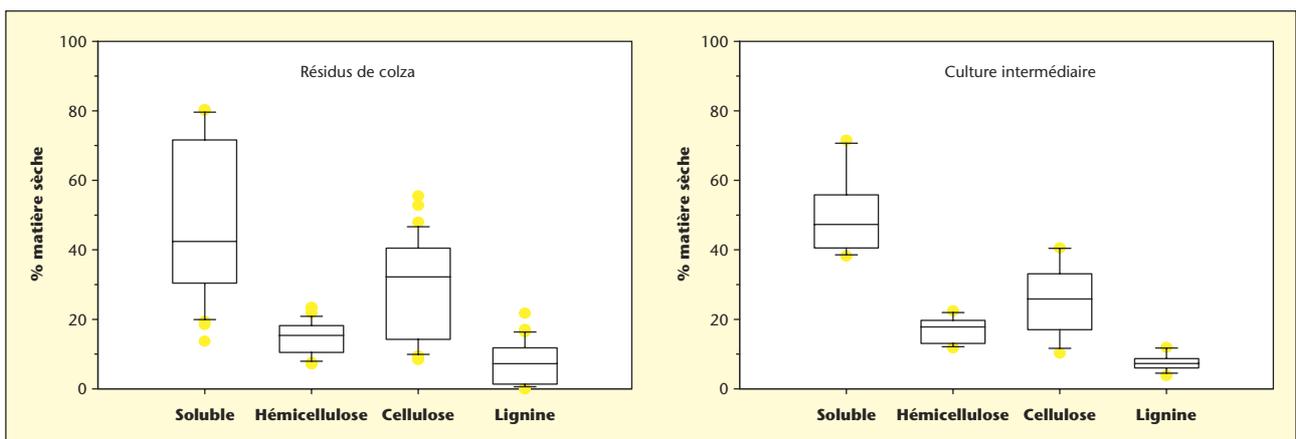


Figure 4. Comparaison de la composition biochimique des résidus de colza présent à maturité et des résidus de culture intermédiaire au moment de l'enfouissement.

Légende des boîtes : bord supérieur et inférieur = 10^e et 90^e quintiles ; ligne continue à l'intérieur de la boîte = médiane ; ligne discontinue = moyenne ; extrémités des barres = 5^e et 95^e quintiles ; symboles = données extrêmes). D'après [58], Nicolardot et al., non publié.

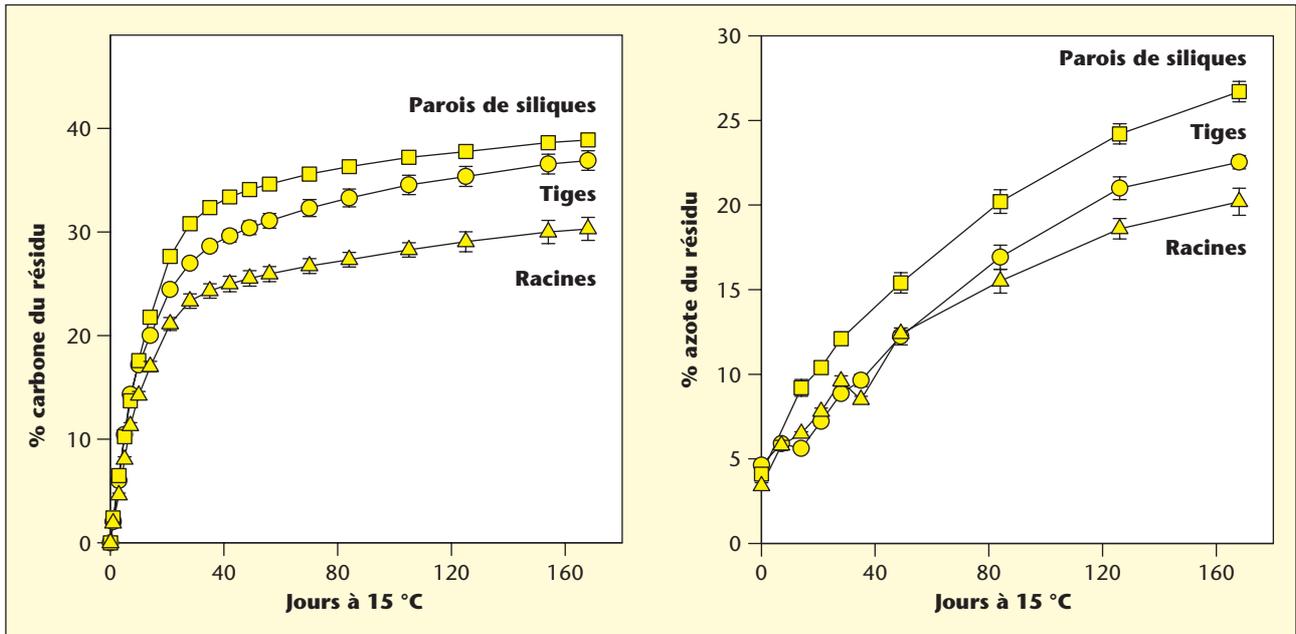


Figure 5. Minéralisation nette du carbone et de l'azote de divers organes de colza à forte teneur en azote marqués ^{13}C et ^{15}N au cours d'une incubation en conditions contrôlées. Les valeurs sont exprimées en % du carbone du résidu et en mg N par g de carbone l'azote organique présent dans le résidu. D'après [60].

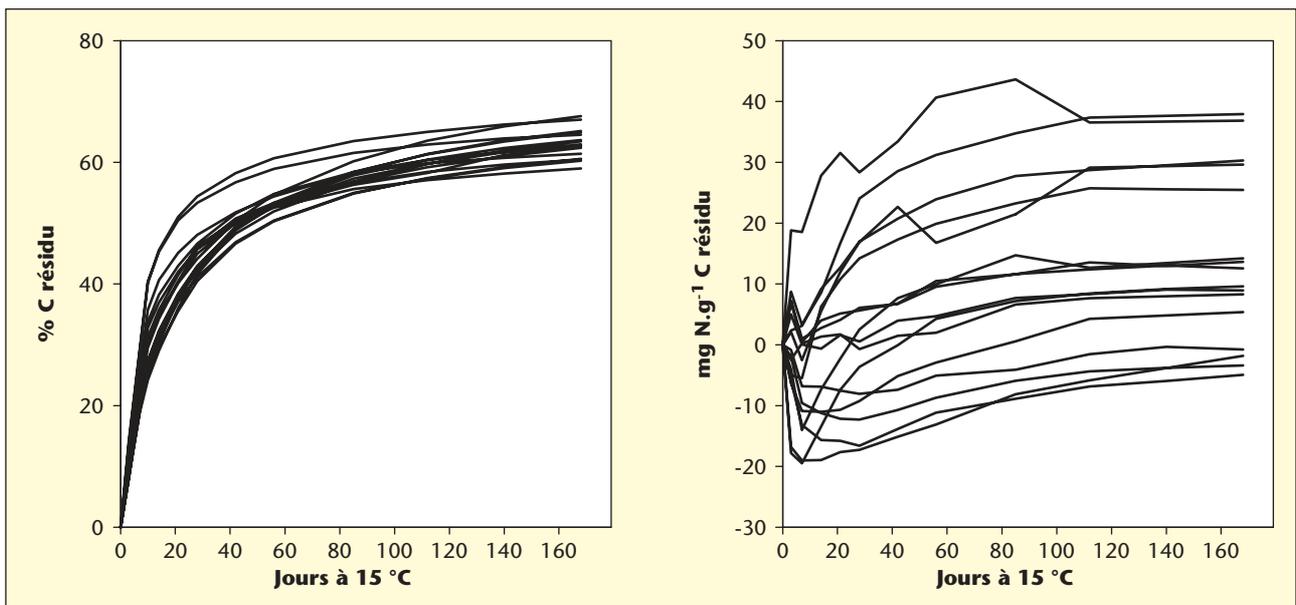


Figure 6. Minéralisation nette du carbone et de l'azote de résidus de cultures intermédiaires prélevés au moment de l'enfouissement et étudiée au cours d'une incubation en conditions contrôlées. D'après Nicolardot et al., non publié.

aériennes peut être assez rapide. Pour le colza récolté à maturité des graines, on peut distinguer trois classes d'organes :

- 1) les feuilles qui tombent avant la maturité et commencent à se dégrader assez vite, notamment avant la récolte, et avant l'enfouissement par le déchaumage ou le labour ;
- 2) les racines dont la biomasse est limitée, et la dégradation probablement assez lente ;
- 3) les tiges et les siliques dont la biomasse est plus significative et la vitesse de dégradation intermédiaire.

Les facteurs influençant la décomposition des résidus

La décomposition des résidus est influencée par de nombreux facteurs [57]. La disponibilité en azote minéral du sol agit sur la dynamique et la décomposition des résidus [61]. En effet, le manque d'azote restreint la croissance des micro-organismes hétérotrophes et/ou modifie leur métabolisme en affectant leur taux de renouvellement ou leur rendement d'assimilation. En définitive, ce manque finit par réduire la décomposition du carbone mais également le ratio quantité d'azote minéral par

unité de carbone décomposé. Ces situations de manque d'azote disponible ont été mises en évidence au champ et peuvent ainsi expliquer le ralentissement de la décomposition des résidus pendant des périodes (par exemple : période automnale) où toutes les conditions (température, humidité...) sont *a priori* réunies pour favoriser leur évolution, mais où l'azote minéral est peu disponible (faibles reliquats azotés, présence de cultures intermédiaires prélevant l'azote...). L'environnement physique des résidus influe également très fortement sur la cinétique de décomposition dans le sol. L'environnement peut se définir, pour un résidu donné, par la taille des particules de résidu, leur distribution et leur localisation dans le sol, et les propriétés du sol environnant (porosité, température et potentiel hydrique). La taille du résidu et la porosité du sol agissent sur la surface de contact existant entre le sol et le résidu [62]. Cette surface influe sur la colonisation du résidu par les micro-organismes du sol et sur les possibilités d'échange d'eau et de nutriments entre le résidu et le sol. Ainsi, plus cette surface de contact est importante, plus la décomposition est facilitée [63, 64]. Toutefois, le broyage des résidus, qui diminue la taille des particules, n'a pas le même effet quel que soit le type de résidu, montrant ainsi qu'il existe des interactions complexes entre la nature des résidus et leurs propriétés physiques : par exemple, des expérimentations conduites en laboratoire ont montré que le broyage de racines de colza augmentait fortement leur décomposition dans le sol, alors que cela affectait peu la décomposition des parois de siliques (Recous, résultats non publiés). Par ailleurs, la localisation des résidus de culture, qu'ils soient laissés à la surface, enfouis par une opération de labour ou incorporés de manière relativement homogène, ainsi que l'intensité de compactage du sol et des résidus (passage de roue par exemple), jouent un rôle fondamental sur les transferts d'eau, de solutés, de chaleur dans le sol. Les propriétés physiques des sols (stabilité structurale par exemple) peuvent être également fortement influencées par la présence de résidus (en fonction de leur nature, quantité et distribution) à la surface du sol. Ces facteurs physiques influencent en retour la cinétique de décomposition des résidus organiques et les biotransformations dans leur ensemble, laquelle modifie les propriétés physiques qui vont de nouveau influencer les processus biologiques.

Décomposition des résidus de colza dans le sol

Quelques références ont été acquises en conditions de laboratoire [60, 65], mais très peu de données ont été acquises *in situ* [66-68]. En France, des données ont été acquises pour le colza [69]. Leurs résultats montrent que les résidus sont rapidement décomposés, 50 % du carbone des résidus étant minéralisé sous forme de CO₂ pendant les deux premiers mois suivant l'incorporation dans le sol (figure 7). L'incorporation des résidus a induit tout d'abord une immobilisation de l'azote minéral du sol d'environ 20 kg N ha⁻¹ à l'automne. Neuf mois après incorporation, les résidus issus de la culture fertilisée (apport de 270 kg N ha⁻¹) induisent une fourniture nette d'azote minéral (+ 9 kg N ha⁻¹) correspondant à 10 % de l'azote apporté par les résidus alors que la fourniture pour les résidus issus de la culture sans fertilisation azotée reste nulle (- 3 kg N ha⁻¹, valeur non statistiquement différente de 0).

Décomposition des résidus et libération de composés à effets allélopathiques

Si de nombreux travaux ont mis en évidence les effets allélopathiques de résidus de culture de colza suite à leur incorporation dans le sol [71], finalement peu de références relient expressément les effets allélopathiques des résidus de colza et leur décomposition dans le sol. Purvis [72] a mis ainsi en relation les effets allélopathiques avec le degré de décomposition des chaumes de colza. *A priori*, aucune référence ne rapporte de travaux mettant en relation la dynamique de relargage des GSL dans le sol ou leur décomposition et la dynamique de décomposition des résidus.

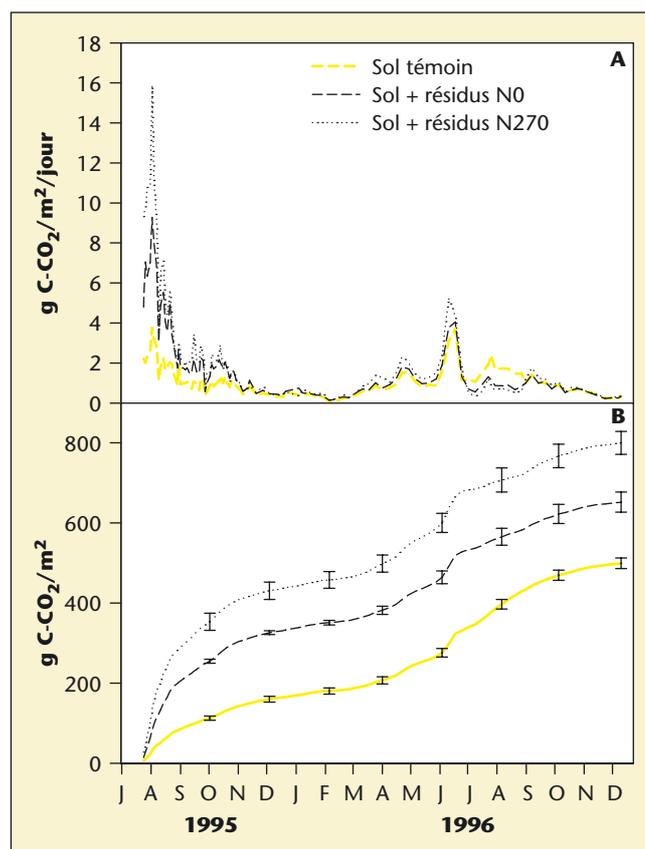


Figure 7. Vitesse de minéralisation du carbone (a) et évolution cumulée (b) du CO₂ émis par le sol au champ avec ou sans apport de résidus de culture de colza. Les résidus de colza sont issus d'une culture non fertilisée (N0) ou fertilisée avec 270 kg N par ha (N270). D'après [70].

Également peu de travaux récents concernent la décomposition des GSL dans les sols, plusieurs auteurs [73-75] ont mesuré au champ et en laboratoire le relargage et la rétention dans le sol des isothiocyanates après l'incorporation de résidus de brassicacées, et ont mis en évidence l'importance de la teneur initiale des résidus en GSL et de l'humidité du sol.

Davantage de références existent quant au devenir des produits de décomposition des GSL dans la mesure où ces composés chimiques sont utilisés comme fumigants. C'est notamment le cas des isothiocyanates avec en particulier le méthyl isothiocyanate [76-80]. Les études portent sur les processus de dégradation (biologique ou abiotique), l'adsorption par le sol [80], l'entraînement par les eaux de lessivage [76] ou la volatilisation [78]. La persistance de ces molécules dans le sol dépend en particulier des conditions de température et d'humidité [77], mais est aussi fonction de l'adaptation de la microflore des sols suite à des apports répétés [79].

RÉFÉRENCES

- BODNARYK RP. Developmental profile of sinalbin (p-hydroxybenzyl glucosinolate) in mustard seedlings, *Sinapsis alba* L., and its relationship to insect resistance. *J Chem Ecol* 1991 ; 17 : 1543-56.
- MÉNARD R. Rôle des glucosinolates et de leurs produits de dégradation dans la résistance du chou-fleur (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) à *Peronospora parasitica*, agent pathogène du mildiou. Thèse de doctorat, Université de Rennes I, 2000.

3. BROWN PD, MORRA MJ. Control of soil-borne plant pests using glucosinolate-containing plants. *Advances in Agronomy* 1997 ; 61 : 167-231.
4. VIERHEILIG H, OCAMPO JA. Role of root extract and volatile substances of non-host plants on vesicular-arbuscular mycorrhizal spore germination. *Symbiosis* 1990 ; 9 : 199-202.
5. VIERHEILIG V, OCAMPO JA. Effect of isothiocyanates on germination of spores of *G. Moseae*. *Soil Biol Biochem* 1990b ; 22 : 1161-2.
6. RICE EL. *Allelopathy*. 2nd ed. Florida : Academic Press, Inc. Orlando, 1984.
7. DORE T, SENE M, PELLISSIER F, GALLET C. Approche agronomique de l'allélopathie. *Cahiers Agricultures*, 2004.
8. STAPELTON JJ, DUNCAN RA. Soil desinfection with cruciferous amendments and sublethal heating: effects on *Meloidogyne incognita*, *Sclerotium rolfsii* and *Pythium ultimum*. *Plant Pathol* 1998 ; 47 : 737-42.
9. TIEDING HGM, MALINGRÉC E, VAN BROEKHOVEN LW, JONGEN WMF, LEWIS J, FENWICK GR. Role of glucosinolates in the formation of N-nitroso compounds. *J Agric Food Chem* 1991 ; 39 : 922-6.
10. BLOCK WJ, LAMERS JG, TERMORSHUIZEN AJ, BOLLEN GJ. Control of soil-borne plant pathogen by incorporating fresh organic amendments followed by tarping. *Phytopathology* 1999 ; 90 : 253-9.
11. ANGUS JF, GARDNER PA, KIRKEGAARD JA, DESMARCHELIER JM. Biofumigation : isothiocyanates released from *Brassica* roots inhibit growth of the take-all fungus. *Plant Soil* 1994 ; 162 : 107-12.
12. LAZZERI L, MANICI LM. The glucosinolate-myrosinase system: a natural and practical tool for biofumigation. In : Gullino ML, Katan J, Matta A, eds. *Proceedings of an International Symposium 'Chemical and non-chemical soil and substrate desinfection'*. 2000.
13. LINSCHIED M, WENDISH D, STRACK D. The structures of sinapic acid esters and their metabolism in cotyledons of *Raphanus Sativus*. *Z Naturforsch* 1980 ; 35C : 907.
14. BJERG B, SØRENSEN H. Quantitative analysis of glucosinolates in oilseed rape based on HPLC of desulfoglucosinolates and HPLC of intact glucosinolates. In : *World Crops: Production, Utilization, Description*. Ed. Wathelet J-P, Martinus Nijhoff, Dordrecht 1987 ; 13 : 125-50.
15. FENWICK GR, HEANEY RK, MULLIN WJ. Glucosinolates and their breakdown products in food and food plants. *CRC, Critical Review in Food Science and Nutrition* 1983 ; 18 : 123-201.
16. UNDERHILL EW. Glucosinolates. In : Bell EA, Charlwood BV, Eds, *Encyclopaedia of Plant Physiology*. Heidelberg : Springer-Verlag, 1980 ; 8 : 493-511.
17. VAN ETTEN CH, DAXENBICHLER ME, WILLIAMS PH, KWOLEK WF. Glucosinolates and derived products in cruciferous vegetables. Analysis of the edible part from twenty-two varieties of cabbage. *J Agric Food Chem* 1976 ; 24 : 452-5.
18. RÖBBELEN, THIES W. Variation in rapeseed glucosinolates and breeding for improved meal quality. In : Tsunoda S, Hinata K, Gomez-Campo G, eds. *Brassica Crops and Wild Allies, Biology and Breeding*. Tokyo : Japan Scientific Societies Press, 1980 : 285.
19. GLAND A, RÖBBELEN G, THIES W. Variation of alkenyl glucosinolates in seeds of *Brassica* Species. *Z Pflanzenzüchtg* 1981 ; 87 : 96-110.
20. PLANTEFOL L. Les hétérosides. In : *Biologie cellulaire et végétale*. Paris : Eugène Belin, 1955 : 680-1.
21. CLOSSAIS-BESNARD N. Aspects analytiques et physiologiques de l'accumulation des glucosinolates chez le colza (*Brassica napus* L.). Thèse de doctorat, Université de Rennes, 593 : 110 p, 1991.
22. SCHNUG E. Relation between sulfur supply and glucosinolate Content of 0-and 00- oilseed rape. *Proc Int Rapeseed Congr 7th*, Poznan, Poland 1987 ; 3 : 682-6.
23. RAUSCH T, BUTCHER DN, HILGENBERG W. Indole-3-methylglucosinolate biosynthesis and metabolism in clubroot diseased plants. *Physiol Plant* 1983 ; 58 : 93-100.
24. HÖGLUND AS, LENMAN M, FALK A, RASK L. Distribution of myrosinase in rapeseed tissues. *Plant Physiol* 1991 ; 95 : 213-21.
25. BIRCH ANE, GRIFFITHS DW, MACFARLANE SMITH WH. Changes in forage and oilseed rape (*B. napus*) root glucosinolates in response to attack by turnip root fly (*Delia floralis*). *J Sci Food Agric* 1990 ; 51 : 309-20.
26. BENN M. Glucosinolates. *Pure Appl Chem* 1977 ; 49 : 197-210.
27. TRUSCOTT RJW, MANTHEY MK. The oxydation of 4-Hydroxyindole as a model system for the oxidation of 4-Hydroxyindolyl-3-Methyl glucosinolate. *J Sci Food Agric* 1989 ; 47 : 191-5.
28. LARSEN PO. Glucosinolate. In : Stumpf PK, Conn EE, eds, *The Biochemistry of Plants. A comprehensive Treatise*. Academic Press 1981 ; 7 : 501-25.
29. DOUGHTY KJ, PORTER AJR, MORTON AM, KIDDLE G, BOCK CH, WALLS-GROVE RM. Accumulation of glucosinolates in oilseed rape leaves as a result of fungal infection. *Proc Int Rapeseed Cong 8th*, Saskatoon, Eds GCIRC, Canola Council of Canada, 1991 ; 6 : 17-37.
30. LERIN J. Influence des substances allélochimiques des crucifères sur les insectes. *Acta OEcologica/OEcol gener* 1980 ; 1 : 215-35.
31. DOUVILLE DE FRANSSU P, CHAPUIS JL, GIOVANNI R, MOUTOU F. Conséquences physiologiques de l'ingestion du colza à graines (*Brassica napus* L.) variété Tapidor (OO), par le lièvre d'Europe (*Lepus europaeus Pallas*) en condition de semi-captivité. *Rec Méd Vét* 1991 ; 167(9) : 873-81.
32. MACGIBBON DB, ALLISON RM. Glucosinolate system in the aphid *Brevicoryne brassicae*. *NZJ Sci* 1968 ; 11 : 440-6.
33. JIRACEK V, KUTACEK M, SALKADE S, KOSTIR J. Effect of zinc on the biosynthesis of indole glucosinolates, glucobrassicin and neoglucobrassicin in etiolated rape seedlings (*Brassica napus* var. *arvensis* (Lam. Thell.). *Biol Plantarum (Prague)* 1974 ; 16 : 454.
34. KIRKEGAARD JA, SARWAR M. Biofumigation potential of Brassicas. I. Variation in glucosinolates profiles of diverse field-grown brassicas. *Plant Soil* 1998 ; 201 : 71-89.
35. BROWN AP, BROWN J, DAVIS JB. Developing high glucosinolate cultivars suitable for bio-fumigation from intergeneric hybrids. In : *Proc. of the 10th International Rapeseed Congress*. Canberra, Ed : GCIRC, Paris, 1999.
36. REESE ET, CLAPP RC, MANDELS M. A thioglucosidase in fungi. *Arch Biochem Biophys* 1958 ; 75 : 228.
37. OGINSKY EL, STEIN AE, GREER MA. Myrosinase activity in bacteria as demonstrated by the conversion of progoitrin to goitrin. *Proc Soc Exp Biol Med* 1965 ; 119 : 360.
38. NUGON-BAUDON L, RABOT S, WAL JM, SZYLIT O. Interactions of the intestinal microflora with glucosinolates in rapeseed meal toxicity: first evidence of an intestinal *Lactobacillus* possessing a myrosinase-like activity *in vivo*. *J Sci Food Agric* 1990 ; 52 : 547-59.
39. BOREK V, MORRA MJ, MCCAFFREY JP. Myrosinase activity in soil extracts. *Soil Sci Exp Am J* 1996 ; 60 : 1792-7.
40. GROB K, MATILE P. Vacuolar location of glucosinolate in horseradish root cells. *Plant Sci Lett* 1979 ; 14 : 327-35.
41. MACLEOD AJ, ROSSITER JT. Isolation and examination of thioglucoside glucohydrolase from seeds of *Brassica napus*. *Phytochemistry* 1986 ; 25 : 1047-51.
42. OHTSURU M, HATA T. The interaction of L-ascorbic acid with the active center of myrosinase. *Biochim Biophys Acta* 1979 ; 567 : 384-91.
43. WILKINSON AP, RHODES MJC, FENWICK RG. Myrosinase Activity of Cruciferous Vegetables. *J Sci Food Agric* 1984 ; 35 : 543-52.

44. BJÖRKMANN R. Plant myrosinase. In: Vanghan JG, MacLeod AJ, Jones BMG. *The biology and chemistry of the Cruciferae*. London : Academic Press : 191-205, 1976.
45. PIHAKASKI K, PIHAKASKI S. Myrosinase in Brassicaceae (Cruciferae). II. Myrosinase activity in different organs of *Sinapis alba* L. *J Exp Bot* 1978 ; 29 : 335.
46. KAWAKISHI S, NAMIKI M. Oxidative cleavage of the disulfide bond of cystine by allyl isothiocyanate. *J Agric Food Chem* 1982 ; 30 : 618-20.
47. GIL V, MACLEOD AJ. Effects of a *Lepidium sativum* enzyme preparation on the degradation of glucosinolates. *Phytochem* 1980 ; 19 : 2071-6.
48. TOOKEY HL. Solubilization and selected properties of crambe seed thioglucosidase (Thioglucoside Glucohydrolase, E C 3.2.3.0.). *Can J Biochem* 1973 ; 51 : 1305-10.
49. VAN ETEN CH, DAXENBICHLER ME. Formation of organic nitriles from progoitrins in leaves of *Crambe abyssinica* and *Brassica napus*. *J Agr Food Chem* 1971 ; 19 : 194-5.
50. DAXENBICHLER ME, VAN ETEN CH, WOLFF IA. Diastereomeric Episulfides from Epi-Progoitrin upon Autolysis of Crambe Seed Meal. *Phytochemistry* 1968 ; 7 : 989-96.
51. PETROSKI RJ, TOOKEY HL. Interaction of thioglucoside-glucohydrolase and epithiospecific protein of cruciferous plants to form 1-cyanoepithioalkanes. *Phytochemistry* 1982 ; 21 : 1903-7.
52. TOOKEY HL, VAN ETEN CH, DAXENBICHLER ME. Glucosinolates. In: Liener IE, Ed. *Toxic constituents of plants foodstuffs*. 2nd ed., New-York : Academic Press, 103, 1980.
53. VIRTANEN AI, SAARIVIRTA M. The formation of benzyl thiocyanate in the seeds of *Lepidium sativum* Suomen Kemistil. 35B : 102, 1962.
54. PRICE JS, HOBSON RN, NEALE MA, BRUCE DM. Seed losses in commercial harvesting of oilseed rape. *J Engineering Research* 1996 ; 65 : 183-91.
55. GABRIELLE B, DENOROY P, GOSSE G, JUSTES E, ANDERSEN MN. A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Res* 1998 ; 57 : 209-22.
56. GABRIELLE B, DENOROY P, GOSSE G, JUSTES E, ANDERSEN MN. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Res* 1998 ; 57 : 95-111.
57. NICOLARDOT B, RECOUS S. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés – Décomposition des résidus : une affaire d'histoire culturelle et de travail du sol. *Perspectives Agricoles* 2001 ; 272 : 49-53.
58. TRINSOUTROT I, JOCTEUR MONROZIER L, CELLIER J, WATON H, ALAMERCY S, NICOLARDOT B. Assessment of the biochemical composition of oilseed rape (*Brassica napus* L.) ¹³C-labelled residues by global methods, FTIR and ¹³C NMR CP/MAS. *Plant Soil* 2001 ; 234 : 61-72.
59. PLISSON-ANNOUSSAMY M, RICHARD G, RECOUS S, GUÉRIF J. Change in mechanical properties of wheat straw due to decomposition and moisture. *Applied Engineering in Agriculture* 2000 ; 16 : 657-64.
60. TRIINSOUTROT I, RECOUS S, MARY B, NICOLARDOT B. C and N fluxes of decomposing ¹³C and ¹⁵N Brassica napus L. : effects of residue composition and N content. *Soil Biol Biochem* 2000 ; 32 : 1717-30.
61. RECOUS S, ROBIN D, DARWIS D, MARY B. Soil inorganic N availability : effect on maize residue decomposition. *Soil Biol Biochem* 1995 ; 27 : 1529-38.
62. FRUIT L, RECOUS S, RICHARD G. Plant residue decomposition: effect of soil porosity and particle size. In : Berthelin J, et al., eds. *Effect of Mineral-Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments*. 1999 : 189-96.
63. ANGERS D, RECOUS S. Decomposition of wheat straw and rye in soil as affected by particle size. *Plant Soil* 1997 ; 189 : 197-203.
64. RECOUS S, RICHARD G, FRUIT L, GUÉRIF J. Effect of contact between straw particles and soil on the short-term mineralization of C. *European Journal of Soil Science* 2002.
65. JANZEN HH, KUCEY RM. C, N, and S mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. *Plant Soil* 1988 ; 106 : 35-41.
66. FRANZLUEBBERS AJ, HONS FM, ZUBERER DA. Tillage induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil Tillage Res* 1995 ; 34 : 41-60.
67. THOMSEN IK, CHRISTENSEN BT. Availability to subsequent crops and leaching of nitrogen in ¹⁵N-labelled sugarbeet tops and oilseed rape residues. *J Agric Sci Camb* 1996 ; 126 : 191-9.
68. JENSEN LS, MUELLER T, MAGID J, NIELSEN NE. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field. *Soil Biol Biochem* 1997 ; 29 : 1043-55.
69. GOSSE G, CELLIER P, GABRIELLE B, et al. Bilan environnemental du colza. *CR final contrat INRA/ADEME/CETIOM*, 137 p, 1997.
70. TRINSOUTROT I, NICOLARDOT B, JUSTES E, RECOUS S. Decomposition in the field of residues of oilseed rape grown at two levels of nitrogen fertilisation. Effects on the dynamics of soil mineral nitrogen between successive crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2000 ; 56 : 125-37.
71. GARDINER JB, MORRA MJ, EBERLEIN CV, BROWN PD, BOREK V. Allelochemicals released in soil following incorporation of rapeseed (*Brassica napus*) green manures. *J Agric Food Chem* 1999 ; 47 : 3837-42.
72. PURVIS CE. Differential response of wheat to retained crops stubbles. I. Effect of stubble type and degree of decomposition. *Aust J Agric Res* 1990 ; 41 : 225-42.
73. BROWN PD, MORRA MJ, MCCAFFREY JP, AULD DL, WILLIAMS I. Allelochemicals produced during glucosinolate degradation in soil. *J Chem Ecol* 1991 ; 17 : 2021-34.
74. BOREK V, MORRA MJ, BROWN PD, MCCAFFREY JP. Allelochemicals produced during Sinigrin decomposition in soil. *J Agric Food Chem* 1994 ; 42 : 1030-4.
75. MORRA MJ, KIRKEGAARD JA. Isothiocyanate release from soil-incorporated Brassica tissues. *Soil and Biochemistry* 2002 ; 34(11) : 1683-90.
76. SAEED IAM, HARKIN JM, ROUSE DI. Leaching of methyl isothiocyanate in plainfield sand chemigated with metam-sodium. *Pestic Sci* 1996 ; 46 : 375-80.
77. GAN J, PAPIRNIK SK, YATES SR, JURY WA. Temperature and moisture effects on fumigant degradation in soil. *Journal of Environmental Quality* 1999 ; 28 : 1436-41.
78. FRICK A, ZEBARTH BJ, SZETO SY. Behaviour of the soil fumigant methyl isothiocyanate in repacked soil columns. *Journal of Environmental Quality* 1998 ; 27 : 1158-69.
79. VERHAGEN C, LEBBINK G, BLOEM J. Enhanced biodegradation of the nematocides 1,3-dichloropropene and methyl isothiocyanate in a variety of soils. *Soil Biol Biochem* 1996 ; 28 : 1753-6.
80. BROWN PD, MORRA MJ. Fate of ionic thiocyanate (SCN-) in soil. *J Agric Food Chem* 1993 ; 41 : 978-82.

Effets allélopathiques des Brassicacées via leurs actions sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes : analyse bibliographique.

Partie II

Raymond REAU¹
 Jean-Marie BODET²
 Jean-Paul BORDES²
 Thierry DORE³
 Sabah ENNAIFAR⁴
 Anne MOUSSART⁵
 Bernard NICOLARDOT⁶
 Sylvain PELLERIN⁷
 Christian PLENCHETTE⁸
 Alain QUINSAC¹
 Christophe SAUSSE¹
 Bernard SEGUIN²
 Bernard TIVOLI⁵

¹ CETIOM, BP 4, 78 850 Thiverval-Grignon
 <reau@cetiom.fr>

² ARVALIS institut du végétal, 91 720 Boigneville

³ INA Paris-Grignon, UMR d'agronomie

INRA/INA P-G, BP 1, 78 850 Thiverval-Grignon

⁴ INRA, UMR d'agronomie INRA/INA P-G, BP 1,
 78 850 Thiverval-Grignon

⁵ INRA, UMR INRA-ENSA Rennes Bio3P, BP
 35 327, 35 653 Le Rheu, cedex

⁶ INRA, Unité d'agronomie Laon-Reims-Mons,
 BP 224, 51686 Reims, cedex 2

⁷ INRA, UMR INRA-ENITA Bordeaux "Transfert
 sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans
 les écosystèmes cultivés", BP 81, 33 883
 Villenave d'Ornon, cedex

⁸ INRA Dijon, BP 86 510, 21065 Dijon cedex

Article reçu le 2 décembre 2004
 accepté le 12 mars 2005

Abstract: Brassicas contain glucosinolates (GSL) which decomposition is able to reduce the growth of populations of soil-borne fungi, bacterias or nematodes. These biocid effects on soil-borne microorganisms make a form of allelopathy phenomenon. The allelopathic properties depends on the GSL composition of the Brassicas: Indian mustard and in a lower extend Oilseed rape could have the most powerful action, White mustard would have a weaker action. These properties also depends on crop residues: green manure with quick decomposition would result with a higher action than crop residues after grain harvest. The main mechanisms are known. In vitro, isothiocyanates obtained from the GSL decomposition inhibit all the phases of the cycle of *Aphanomyces euteiches*, the fungus responsible for root rot of peas. The mycelian growth of *Gaeumannomyces graminis tritici*, the fungus responsible for the wheat take all is inhibited by some isothiocyanates at low concentration. Furthermore, several studies give the evidence that the incorporation of Brassicas residues into the soil does inhibit the growth of both soil-borne pathogens. At last, the presence of roots of Brassicas inhibits the germination of the mycorrhizas known to improve the mineral nutrition of its host plant. This phenomenon could explain the depressive effect of oilseed rape on the nutrition of a subsequent maize. This knowledge of Brassicas effects into cropping systems offers issues for a better management of precedent effects of Brassicas; these effects being positive (integrated crop protection) or negative (management of subsequent crop nutrition after Brassicas).

Key words: allelopathy, Brassicas, glucosinolates, soil-borne pathogens, mycorrhizas

Effet allélopathiques des Brassicacées sur les champignons telluriques

Cas d'*Aphanomyces euteiches*, responsable de la pourriture molle du pois

Nous nous intéresserons ici plus particulièrement à l'influence des cultures de Brassicacées sur un premier champignon pathogène tellurique, le champignon pathogène tellurique : *Aphanomyces euteiches*, responsable de la pourriture molle du pois.

La pourriture molle du pois (*Pisum sativum*) due à *A. euteiches*

La pourriture molle du pois (*Pisum sativum*) est due à un champignon oomycète, *Aphanomyces euteiches*. Ce champignon est capable de provoquer des pertes de rendement très conséquentes suite à la destruction plus ou moins précoce du système racinaire. Ces pertes peuvent atteindre 10 à 30 q/ha, selon le niveau d'infestation du champ et les conditions climatiques. De nouveaux cas de nécroses racinaires dus à *A. euteiches* sont signalés chaque année. L'absence de méthodes de protection, hormis la prévision des risques, explique que ce problème soit devenu, depuis les années 1993-1994, une grande préoccupation pour les agriculteurs des régions les plus touchées (grand Bassin parisien en particulier). Parmi les méthodes de lutte envisagées, la réduction du potentiel infectieux du sol par un choix judicieux de plantes « de coupure » semble être une piste intéressante.

Plusieurs études concernant l'effet précédent des Brassicacées sur la pourriture molle du pois (*A. euteiches*) ont été réalisées aux États-Unis à partir des années 60. Nous nous intéresserons dans un premier temps à l'effet des amendements organiques constitués par des enfouissements de Brassicacées sur le potentiel infectieux d'un sol infesté par *A. euteiches*. Dans un deuxième temps, nous essaierons d'analyser les mécanismes d'action.

Voir la première partie dans OCL ; volume 12, n° 3, mai-juin 2005.

Effet des amendements à base de Brassicacées sur le potentiel infectieux du sol

L'effet des amendements constitués de Brassicacées sur l'évolution de la pourriture molle due à *A. euteiches* a été étudié en conditions contrôlées (serre) dans des sols infestés naturellement ou artificiellement et/ou en conditions naturelles (champ). Ces études mettent en évidence l'influence de plusieurs facteurs sur l'efficacité des amendements.

Toutes les espèces de Brassicacées testées en conditions contrôlées permettent de diminuer les nécroses racinaires dues à *A. euteiches*. En revanche, le niveau d'efficacité peut varier en fonction de l'espèce considérée [81]. Comme précisé dans la première partie de cette revue (voir OCL n° 3, mai-juin 2005) les produits issus de la décomposition des GSL ainsi que leurs concentrations varient d'une espèce à l'autre. Lewis et Papavizas [82] expliquent l'efficacité supérieure du chou (*Brassica oleracea*) par rapport à la moutarde blanche par les fortes concentrations en composés volatils soufrés libérés par cette espèce. Les auteurs en déduisent que la quantité de matériel végétal à incorporer doit dépendre des teneurs en GSL de l'espèce considérée. Muehlchen *et al.* [83] précisent que l'âge des plantes au moment de l'incorporation, le type d'organe incorporé ainsi que l'utilisation de tissus secs ou frais influencent les résultats. Les auteurs obtiennent en effet de meilleurs résultats avec la moutarde blanche que Chan et Close [81]. Or, ces derniers utilisaient uniquement des plantes ayant poussé à l'extérieur pendant 4 mois et n'incorporaient au sol que les tiges et les feuilles séchées.

Les résultats dépendent également du potentiel infectieux initial du sol. Chan et Close [81] mettent en évidence, lors d'un essai réalisé en conditions contrôlées, que la diminution des nécroses racinaires observées sur des plantes de pois ayant poussé dans un sol amendé par différentes espèces de Brassicacées est d'autant plus importante que le taux d'inoculum initial du sol est faible. Ainsi, les résultats décevants obtenus au champ par Papavizas et Lewis en 1971 [84] pourraient être expliqués au moins en partie par le fort niveau d'infestation de la parcelle : la majorité des espèces utilisées, très efficaces en serre pour diminuer les nécroses racinaires, n'ont eu aucun effet bénéfique au champ. Les auteurs expliquent que dans un sol très infesté la diminution du potentiel infectieux doit être très importante pour pouvoir en observer les conséquences sur les plantes.

En serre, Chan et Close [81] font également varier la durée de la phase de décomposition : les pois sont semés 3 ou 6 semaines après enfouissement. L'efficacité de l'amendement est supérieure après 6 semaines de décomposition quelle que soit l'espèce de Brassicacée considérée. En revanche, la durée optimale de la période de décomposition semble dépendre de la culture. Dans le cas de la moutarde blanche, les résultats obtenus après 3 ou 6 semaines de décomposition sont proches, alors que l'efficacité du chou est améliorée de 50 %. Lewis et Papavizas [82] avaient effectivement observé que les composés volatils issus de la décomposition du chou étaient encore détectables cinq semaines après enfouissement.

Les résultats au champ semblent dépendre des conditions climatiques. Papavizas et Lewis [83] expliquent que si l'humidité du sol est trop importante, les composés volatils soufrés ne sont pas libérés lors de la décomposition des Brassicacées. Les stress environnementaux peuvent également affecter la croissance et le développement des Brassicacées, altérant ainsi leurs propriétés [84].

Les travaux de Lewis et Papavizas en 1971 mettent en évidence que les vapeurs issues des composés de synthèse sont plus efficaces que les vapeurs issues de la décomposition naturelle du chou dans le sol. Or, de fortes concentrations en sulfures et ITC sont mises en évidence suite à la décomposition du chou. Les auteurs suggèrent que les caractéristiques physico-chimiques du sol doivent être prises en compte. Les composés issus de la dégradation des GSL pourraient en effet être adsorbés par les colloïdes du sol ou transformés en composés instruments. Munnecke et

Martin [85] avaient en effet observé que les concentrations en MethylITC (MIT) étaient très faibles dans certains sols riches en matière organique et en argile. Lloyd [86] a effectivement montré que le MIT réagissait avec NH₄OH pour former un composé non volatil et non toxique.

Mécanismes d'action : effet des dérivés des glucosinolates sur les différentes phases du cycle infectieux d'*A. euteiches*

Afin de comprendre les mécanismes impliqués dans l'effet négatif des Brassicacées, utilisées comme engrais vert, sur le champignon pathogène *A. euteiches*, des essais ont été réalisés au laboratoire. Les auteurs se sont intéressés à l'action des composés issus de la dégradation des GSL sur les différentes phases du cycle infectieux.

En 1971, Lewis et Papavizas étudient l'effet des composés volatils issus de la décomposition des GSL sur la croissance mycélienne du champignon. Les composés volatils provenant d'un sol amendé avec du chou inhibent de façon irréversible la croissance mycélienne à partir du deuxième jour après enfouissement, et ce, pendant 21 jours. En utilisant des ITC (MethylITC, ButylITC, AllylITC, PhenethylITC) et des sulfures (carbon disulfure, methanethiol, diméthyl sulfure, diméthyl disulfure) de synthèse, les auteurs montrent que l'effet varie en fonction du composé et de sa concentration. Les vapeurs de sulfures ne sont pas aussi toxiques que les vapeurs d'ITC : selon le sulfure utilisé, des concentrations de 10 à 30 ppm sont nécessaires pour inhiber la croissance contre seulement 0,07 ppm pour les vapeurs d'ITC. Smolinska *et al.* [87, 88] comparent l'effet des GSL bruts provenant de graines de colza avec celui des composés volatils et solubles issus de leur décomposition (essentiellement ITC et nitriles). Ils mettent en évidence que les GSL non hydrolysés ont une faible action sur la croissance mycélienne alors que les composés solubles et volatils sont inhibiteurs, les ITC étant plus efficaces que les nitriles. Les auteurs ne précisent cependant pas si cette différence d'efficacité entre ITC et nitriles est due à une plus faible concentration en nitriles ou à une toxicité inférieure.

Lewis et Papavizas [89] s'intéressent également à l'action des composés volatils sur les zoospores, forme infectieuse du champignon. Les vapeurs d'ITC et sulfures de synthèse inhibent non seulement la formation des zoospores mais également leur mobilité et leur germination. Comme pour la croissance mycélienne, les auteurs montrent que les vapeurs d'ITC sont plus efficaces que les vapeurs de sulfures et que l'efficacité dépend du composé et de sa concentration. Smolinska *et al.* [87] mettent également en évidence l'inhibition de la germination des zoospores par les composés volatils issus de graines de colza en décomposition.

La formation des oospores, forme de conservation du champignon, est affectée par les vapeurs provenant du chou en décomposition [89] : les oogones restent immatures et sont déformées. Les auteurs précisent cependant que seuls les ITC auraient une action négative sur les oospores.

Conséquences pour la protection contre *A. euteiches*

L'ensemble des travaux cités dans cette étude bibliographique met en évidence un manque de concordance, d'une part, entre les essais réalisés en conditions contrôlées et les essais réalisés au champ, et d'autre part entre les résultats des différents auteurs. Ce problème semble être dû principalement au fait que l'effet assainissant des Brassicacées dépend d'un grand nombre de facteurs (conditions climatiques, conduite de culture...). Or, les essais décrits dans les différentes publications relèvent d'objectifs souvent similaires, mais les conditions d'expérimentation (variété utilisée, température, type de sol, niveau d'infestation...) varient d'un auteur à l'autre. Il est par ailleurs nécessaire de préciser qu'une culture dérobée peut, d'une façon générale et indépendamment de ses effets allélopathiques, avoir une action indirecte sur un pathogène interférant avec les effets fongicides : en particulier, le travail du sol peut diluer l'inoculum en modifiant les horizons et/ou en perturbant le réseau

mycélien du champignon [90, 91], et l'enfouissement de matières organiques peut modifier les caractéristiques physico-chimiques et/ou modifier les populations microbiennes du sol [10, 92].

Néanmoins, les cultures de Brassicacées, utilisées en engrais vert, pourraient constituer un moyen de protection efficace contre *Aphanomyces*. Toutes les phases du cycle infectieux du pathogène sont en effet susceptibles d'être affectées par l'action des composés libérés lors de la dégradation des GSL contenus dans les plantes. L'action étant irréversible, elle peut être qualifiée de fongicide. Parmi ces produits, les composés volatils et plus précisément les vapeurs d'ITC seraient les plus efficaces. L'efficacité de ces cultures dérobées dépend toutefois de plusieurs facteurs, qui peuvent agir en interaction : l'espèce de Brassicacée cultivée, voire la variété au sein d'une espèce, les conditions climatiques et les caractéristiques physico-chimiques du sol, enfin la conduite de la culture. Au sein de celle-ci, la densité de semis, la durée de la culture, la méthode d'enfouissement, la durée de la phase de décomposition sont susceptibles d'avoir un effet significatif.

Cas de *Gaeumannomyces graminis*, responsable du piétin échaudage du blé d'hiver

Gaeumannomyces graminis (Sacc.) Arx & Olivier var. *tritici* Walker, agent pathogène responsable de la maladie du piétin-échaudage des céréales, constitue un deuxième cas d'étude intéressant. Il s'agit également d'un champignon tellurique ; contrairement au cas précédent, ce sont à l'heure actuelle autant des cultures commerciales de Brassicacées (en l'occurrence le colza) que des cultures intermédiaires qui, dans les systèmes de culture, sont susceptibles d'avoir un effet assainissant, et ont été étudiées de ce point de vue.

Le piétin échaudage des céréales

Le piétin échaudage (*Gaeumannomyces graminis*) devient est un problème récurrent des systèmes de culture céréaliers dans les situations où le blé revient trop souvent sur les mêmes parcelles. Il est à l'origine d'une grande partie des pertes de rendement observées en monoculture. Ce champignon attaque le collet et les racines des céréales, entraînant une stérilité totale ou partielle de l'épi. Certaines conditions climatiques sont favorables au développement de la maladie, en particulier les semis précoces suivis d'hiver doux et humides. Des solutions de lutte chimiques par traitement des semences existent mais restent coûteuses et d'une efficacité variable et incomplète. L'évitement des situations à risque dans le cadre de successions culturales adaptées reste un moyen de lutte privilégié.

On connaît bien l'effet de la succession de culture sur la dynamique de l'agent pathogène. De manière schématique, les populations du champignon s'accroissent en cas de monoculture, jusqu'à un palier atteint au bout de quatre ans, qui précède une phase de déclin de la maladie [93]. Cette dynamique serait liée au développement, avec un certain retard par rapport à l'agent pathogène, d'une flore antagoniste constituée de bactéries, entre autres des *Pseudomonas* [94-96]. Le développement du champignon est ainsi fonction de la succession de culture, et varie selon le caractère hôte ou non des espèces présentes (le lin, le pois et le colza par exemple sont non-hôtes) et de leur effet sur la flore antagoniste, qui peut amener à un rôle amplificateur sur la maladie.

Les effets précédents des Brassicacées sur le rendement du blé et sur le piétin échaudage

Plusieurs essais sur les effets de différentes plantes de coupure dans une monoculture de blé tendre d'hiver ont été réalisés en Angleterre à la fin des années 1980 par l'ADAS [97]. Ces travaux ont montré que le premier blé suivant un colza d'hiver dans une monoculture présente un rendement plus important que le premier blé suivant une féverole d'hiver. En revanche, dans ces essais, la production du deuxième blé suivant le colza

d'hiver est équivalente voire inférieure à celle du deuxième blé suivant la féverole d'hiver. L'une des principales explications avancées pour expliquer ces résultats est que les attaques de piétin échaudage sont plus importantes derrière une féverole d'hiver que derrière un colza d'hiver. Le deuxième blé après féverole serait, au contraire, moins sujet aux attaques de piétin échaudage que le deuxième blé après colza.

Effets des Brassicacées sur le piétin échaudage

De leur côté, les Australiens de la Nouvelle Galle du Sud [98] et les suisses de la station de Changins [99] en Suisse constatent que les attaques de piétin échaudage sont nettement moins importantes dans un premier blé suivant un colza d'hiver que dans un blé venant immédiatement après une pâture ou un autre blé. Ces différences entre précédents en ce qui concerne les attaques de piétin échaudage observées sur les premiers blés ont tendance à disparaître voire à s'inverser avec les deuxièmes blés [100].

En France, les résultats récents obtenus dans l'Yonne par la délégation régionale de l'ITCF de Dijon et la chambre d'agriculture de l'Yonne montrent aussi que le premier blé tendre d'hiver suivant un colza d'hiver peut présenter des rendements nettement supérieurs à un blé tendre d'hiver suivant un blé tendre d'hiver, et que ces différences peuvent en grande partie s'expliquer par une réduction des dégâts de piétin échaudage dans le premier blé suivant le colza.

Comme évoqué ci-dessus, on sait de manière bien documentée la différence entre une monoculture de blé et une succession céréalière avec coupure par une culture non hôte, du point de vue de la dynamique du piétin échaudage. Cet effet du colza sur l'agent pathogène ne peut ainsi être uniquement attribué aux ITC : le seul fait que la plante de coupure soit non hôte de la maladie suffit à diminuer la présence du champignon, par contre la différence entre les plantes non hôtes pourrait être attribuée aux ITC.

Néanmoins, même si moins d'études semblent avoir été réalisées que sur *A. euteiches*, néanmoins, il semble vraisemblable que dans ce cas également une partie de la réduction des attaques par l'agent pathogène de piétin échaudage observée au champ dans le premier blé suivant une Brassicacée serait liée à la présence de GSL dans les tissus végétaux des plantes de cette famille. Au cours de leur décomposition dans le sol, ces GSL produisent des isothiocyanates. Plusieurs études, menées avec différentes espèces de Brassicacées ou directement avec des ITC, convergent en effet en ce sens. Ainsi, en conditions contrôlées sur des cultures de champignon, Brown et Morra [3] ont montré que certains ITC (Méthyl ITC, Allyl ITC, Benzyl ITC) ont un effet dépressif sur le piétin échaudage à très faible concentration (0,1 à 0,2 µg/mL).

Parallèlement, plusieurs études menées en Australie [101-104] établissent que la dégradation des résidus de Brassicacées a un effet dépressif sur l'inoculum pathogène du piétin-échaudage. Les mécanismes seraient globalement les mêmes que dans le cas de la pourriture molle du pois.

Lors de la période de décomposition des tissus végétaux issus des Brassicacées, il se produirait une biofumigation défavorable au développement du piétin échaudage, par altération de certaines fonctions biologiques. Cette biofumigation semble plus importante suite à l'enfouissement de tissus frais que des tissus âgés. En effet, ces tissus frais contiennent plus de GSL que les tissus anciens. Certaines études montrent que l'effet répressif des Brassicacées sur le pathogène dépend du type de sol [105], du type de résidu, de son âge et de son degré de décomposition – phénomènes tous compatibles avec les mécanismes de la biofumigation par libération des GLS et leur transformation en ITC. Angus et al. [11] ont observé que des racines sèches et irradiées (donc désinfectées) de différentes espèces de Brassicacées diminuent significativement la croissance de *Gaeumannomyces graminis tritici*, mais que tant que les racines sont vivantes cet effet n'est pas significatif – ce qui de nouveau est cohérent avec l'hypothèse d'une nécessité de décomposi-

tion des tissus contenant les GLS. Les résidus frais sont réputés ne pas avoir d'effet notable sur l'agent pathogène [11] mais réduisent la levée et la croissance du blé suivant [72], alors que les résidus bien décomposés inhibent la croissance de l'agent pathogène et favorisent la croissance du blé. Enfin, en ce qui concerne les teneurs en GLS, Kirkegaard et Sarwar [103] ont montré qu'elles varient fortement entre les espèces et les variétés ; Angus *et al.* [11] et Kirkegaard *et al.* [102] observent pour leur part un effet plus important de la moutarde brune par rapport à celui du colza sur l'agent pathogène.

Conséquences pour la protection contre *G. graminis tritici*

Les résultats obtenus en conditions contrôlées d'une part et au champ d'autre part sont plus convergents que dans le cas d'*A. euteiches*, et semblent ainsi ouvrir des perspectives plus rapides d'utilisation des propriétés allélopathiques des Brassicacées dans des stratégies intégrées de lutte contre la maladie. Au champ, l'effet potentiellement répressif des Brassicacées sur la maladie est cependant variable, et dépend des conditions climatiques et des conditions de survie de l'inoculum [104]. Il est bien évident que cet effet de la précédente Brassicacée ne se manifeste que les années où les conditions climatiques sont favorables au développement de la maladie : semis précoces du blé suivis d'hivers doux et humides. Il est par ailleurs reconnu que l'effet du colza diminue quand la pression de la maladie est faible [102].

Pour extérioriser un effet, il importe, en outre, que les modalités de conduite de la Brassicacée ne favorisent pas le développement du piétin échaudage dans le blé suivant. C'est ainsi qu'une surfertilisation azotée du colza favorise la survie saprophytique du champignon après la récolte de la Brassicacée [93]. De même, la présence de repousses de blé contaminé dans un colza sert de relais entre les blés précédant et suivant le colza. Ces phénomènes peuvent masquer partiellement ou totalement les effets positifs des isothiocyanates issus de la décomposition des GSL. Enfin, dans le deuxième blé suivant la Brassicacée, l'effet protecteur des isothiocyanates disparaîtrait et le piétin échaudage pourrait, à nouveau, se développer, d'autant plus que les isothiocyanates auraient un effet dépressif non seulement sur le piétin échaudage, mais aussi sur sa flore antagoniste. Ceci pourrait expliquer pourquoi les deuxièmes blés venant après une Brassicacée peuvent présenter des dégâts de piétin échaudage plus importants que les deuxièmes blés venant d'autres plantes de coupure.

Cas des mycorhizes et de l'alimentation phosphatée du maïs

Les Brassicacées, et en particulier le colza et le chou, sont réputées induire des carences en phosphore sur le maïs qui les suit. Peu d'expérimentations en plein champ ont été menées sur ce sujet. Gavito et Miller [106, 107] ont montré l'effet dépressif d'un précédent colza sur la nutrition en phosphore du maïs à un stade précoce, avec des répercussions sur le rendement final. Petersen *et al.* (1999) [108] ne constatent pas d'effets notables sur la croissance et le rendement après une culture intermédiaire de navet. La présente revue examine l'hypothèse d'une inhibition des mycorhizes par des molécules fongostatiques produites par les Brassicacées.

Fonctionnement des champignons mycorhiziens à arbuscules

De nombreux micro-organismes vivent dans le sol au voisinage des racines des plantes. Parmi eux, on trouve les champignons mycorhiziens à arbuscules (MA) dont le développement est complètement inféodé aux cultures en place (on parle de plantes hôtes) puisque ce sont des symbiotes obligatoires. Ils s'associent de manière intime aux racines des plantes pour former un nouvel organe appelé *mycorhize à arbuscule*. Cette association à bénéfice réciproque constitue une symbiose mutualiste [109, 110]. Une mycorhize est donc constituée par une racine colonisée par des structures fongiques de transport (le mycélium), de

transfert (l'arbuscule) et de stockage (la vésicule), et par un réseau de mycélium se développant dans le sol rhizosphérique. Schématiquement, la plante fournit au champignon les sucres qu'il n'est pas capable de synthétiser et qui sont nécessaires à son développement, et le champignon fournit à la plante de l'eau et des éléments minéraux. Les plantes agricoles et horticoles, à l'exception de celles appartenant aux familles des Brassicacées et des Chénopodiacées, forment des mycorhizes à arbuscules. La symbiose permet (i) d'assurer la croissance et la reproduction du champignon sous la forme de mycélium et de spores dans le sol, et de mycélium, de vésicules ou de spores dans la racine grâce aux sucres fournis par la plante; (ii) une amélioration de la nutrition minérale de la plante, en particulier pour les éléments peu mobiles comme le phosphore et des oligo-éléments tels que le cuivre, le zinc et le fer, ce qui se traduit généralement par une stimulation de la croissance [111]. Par ailleurs, on observe chez les plantes mycorhizées une résistance accrue aux stress (hydrique, thermique, salin), ainsi qu'une protection contre certains agents pathogènes des systèmes racinaires.

Dans les sols agricoles, les champignons MA se propagent en fonction des rotations des différentes cultures sous la forme de spores (organes de réserve et de reproduction) libres dans le sol, sous la forme de mycélium et sous la forme de morceaux de racines colonisées par le champignon et portant, même après leur mort, des hyphes (mycélium) et des vésicules (organes de réserve et de reproduction) viables. L'ensemble de ces structures fongiques ou propagules constituent le potentiel infectieux mycorhizogène du sol [112].

L'influence de la culture est prédominante pour le développement de ces champignons puisqu'elle favorise ou non la formation et le développement de la symbiose. On parle alors de la *dépendance mycorhizienne* des plantes [113] qui varie en fonction des exigences de la plante et de la fertilité du sol. La dépendance mycorhizienne est élevée chez les plantes à système racinaire peu ramifié, faible chez les graminées et nulle pour quelques espèces qui ne forment pas de mycorhizes à arbuscules (Brassicacées, Chénopodiacées). Les facteurs biotiques ou abiotiques qui ont une action sur le sol et le développement des plantes ont des actions directes ou indirectes sur la population de champignons MA d'un sol. Parmi les facteurs abiotiques, les techniques culturales peuvent avoir des effets favorables ou défavorables.

Bien que l'observation de structures fongiques ait pu être faite chez quelques Brassicacées [114], il est admis que celles-ci ne forment pas de mycorhizes à arbuscules, ce qui ne favorise pas le développement des champignons MA. L'hypothèse la plus souvent avancée met en cause les GSL et les ITC [16,115]. Certains d'entre eux seraient responsables de l'absence de mycorhizes à arbuscules chez les Brassicacées [5,116-118]. Schreiner et Koide [116, 117] ont montré qu'en présence de racines d'espèces du genre *Brassica*, la germination des spores d'un champignon mycorhizien était inhibée. L'ajout de composés inactivant les ITC supprime l'effet inhibiteur, ce qui démontre bien l'implication de ces molécules dans l'inhibition de la germination des spores du champignon.

Effet précédent des espèces du genre *Brassica* sur le potentiel infectieux mycorhizogène du sol et la nutrition phosphatée du maïs

Le potentiel infectieux mycorhizogène du sol peut être affecté par les techniques culturales (travail du sol, traitements fongicides, etc.) mais aussi par la succession de cultures [119]. Il a été déjà observé que la présence d'une chénopodiacée (espèce non mycotrophe) dans une rotation diminue le potentiel infectieux mycorhizogène du sol [120]. Plusieurs auteurs ont relaté une moindre mycorhization des racines du maïs lorsqu'il est cultivé après colza plutôt qu'après maïs [106, 121]. Dans certains cas cette moindre mycorhization des racines est associée à un moindre prélèvement de phosphore [107, 119]. Deux mécanismes, non exclusifs l'un de l'autre, sont susceptibles d'expliquer ces effets : i) diminution de la population de champignons MA par l'absence de

plante-hôte : pendant la culture de la Brassicacée, espèce non mycotrophe, les propagules (spores, vésicules, mycélium) de champignons MA qui germent ne trouvent pas la plante-hôte qui leur convient et elles dégèrent rapidement ; cela conduit à une diminution progressive de la population de champignons indigènes du sol ; ii) élimination des champignons MA par des molécules fongistatiques produites pendant la culture de la Brassicacée ou après, lors de la décomposition des résidus enfouis. Le rôle des mycorhizes vis-à-vis de la nutrition phosphatée de plantes poussant en sol moyennement ou faiblement pourvu en phosphore est bien connu. L'hypothèse selon laquelle la carence en phosphore observée chez le maïs derrière une Brassicacée pourrait être due à une élimination des champignons mycorhiziens par les mécanismes qui viennent d'être mentionnés mérite donc d'être vérifiée.

Conclusion

La présente analyse bibliographique montre que beaucoup de connaissances sont déjà disponibles quant aux capacités des Brassicacées à produire puis libérer dans le sol des métabolites secondaires dont on sait qu'ils ont, *via* leurs produits de dégradation, des actions inhibitrices sur la croissance de populations de champignons telluriques. On connaît également (quoiqu'avec un degré de précision variable dans la connaissance des mécanismes affectés) la sensibilité de certains champignons pathogènes à ces molécules organiques. Par ailleurs, différents indices portent à croire que plusieurs manifestations de l'effet précédent des Brassicacées au champ pourraient au moins en partie être dues à cet effet allélopathique. C'est le cas pour les effets des Brassicacées sur *Aphanomyces* chez le pois, et sur le piétin échaudage des céréales ; l'effet sur les mycorhizes du maïs et sa nutrition phosphorique reste quant à lui du domaine de l'hypothèse pure, aucun effet des glucosinolates ou de leurs produits de dégradation n'ayant été montré sur les champignons mycorhiziens en conditions contrôlées.

Ces constats ouvrent des perspectives intéressantes pour une meilleure maîtrise des effets précédents des Brassicacées, qu'ils soient positifs ou négatifs. Cependant, plusieurs obstacles demeurent, avant de pouvoir réellement envisager ces applications agronomiques, même pour le cas qui paraît le plus favorable en raisons des connaissances déjà capitalisées, celui d'une contribution de l'allélopathie à des stratégies de protection intégrée des cultures contre des champignons phytopathogènes. Ces obstacles semblent être de trois ordres, et ouvrent vers trois types de travaux.

La première difficulté a trait à la grande diversité (i) des molécules produites, (ii) des niveaux de concentration en ces molécules selon les espèces et cultivars de Brassicacées, (iii) des niveaux de sensibilité des agents pathogènes à ces molécules. Dès lors, il est nécessaire de réaliser un long travail de « screening » pour identifier les couples matériel végétal X agent pathogène pour lesquels on peut espérer un effet biocide du premier sur le second. Ce travail serait d'autant plus difficile s'il existait chez les espèces de champignons phytopathogènes, une variabilité génétique de sensibilité aux isothiocyanates, autrement dit un « effet souche », qui n'a pas pour l'instant, à notre connaissance fait l'objet d'investigations, mais est tout à fait plausible.

La seconde difficulté tient, comme cela a été montré pour la lutte contre *Aphanomyces* chez le pois, au fossé important qui sépare la mise en évidence d'un effet en conditions contrôlées, et l'expression de cet effet dans des conditions agronomiques [119]. L'analyse bibliographique réalisée sur les facteurs de variation de la minéralisation des résidus montre que les techniques de conduite des cultures (fertilisation, date de destruction, proportion d'organes exportés, travail du sol...), en interaction avec les caractéristiques du sol et du climat, sont de nature à faire varier de manière considérable les rythmes de dégradation des résidus contenant les glucosinolates, et donc les quantités instantanées de

composés libérés et les durées de production de ces composés. Ces deux variables (intensité et durée de production) sont certainement des clés de l'efficacité de l'effet biocide des métabolites secondaires ; on notera que même en conditions contrôlées, l'effet des durées d'exposition est moins documenté que celui des intensités. Par ailleurs, les techniques culturales influencent d'autres facteurs de variation probables de l'effet, par exemple la position des résidus dans le profil de sol, qui peut jouer sur la proximité des molécules biocides vis-à-vis des champignons. Il existe donc tout un champ de recherches à mener pour identifier les conditions agronomiques d'expression au champ d'un effet allélopathique des Brassicacées. Elles devraient débiter, sur un couple matériel végétal X agent pathogène pour lequel un effet est avéré en conditions contrôlées, par une analyse de sensibilité du pathogène aux variables de flux (intensité et durée) de composés biocides. Elles devraient se poursuivre par la réalisation d'expérimentations comparant différents systèmes de culture choisis sur la base des connaissances bibliographiques comme étant susceptibles de provoquer des flux variés de libération de composés. Correctement instrumentés, ces sites expérimentaux devraient permettre de tester des hypothèses relatives à ces flux et aux conséquences sur l'effet biocide qui s'ensuit. Les connaissances issues de ces expérimentations devraient permettre de paramétrer un modèle de ces effets allélopathiques, utilisable pour concevoir des itinéraires de conduite des Brassicacées dans l'optique de bénéficier de ces effets.

Enfin, la troisième difficulté tient à un degré de complexité supplémentaire des relations entre présence et conduite des Brassicacées dans la succession d'une part, et effet sur les cultures suivantes d'autre part. En effet, on ne peut ignorer, comme cela a été souligné dans cette analyse, que les pratiques agricoles dans les systèmes à Brassicacées vont jouer sur les champignons phytopathogènes et sur le fonctionnement de la culture suivante par d'autres moyens que la production de composés à effet biocide. Par ailleurs, lorsque ces composés affectent les populations microbiennes du sol, rien ne permet de penser qu'elles ne touchent que celles qui ont un effet néfaste, et préservent celles qui ont un rôle positif. En conséquence, l'évaluation de systèmes de conduite des Brassicacées mis au point dans une optique de bénéficier de leurs effets allélopathiques ne pourra faire l'économie d'une évaluation plus générale, faisant le bilan complet des gains mais aussi des coûts liés à ces pratiques.

L'ensemble de ces travaux nécessite des collaborations de recherche dans des domaines aussi variés que la sélection variétale, la biochimie, la mycologie et l'agronomie.

RÉFÉRENCES

81. HAN MKY, CLOSE RC. *Aphanomyces* root rot of peas 3. Control by the use of cruciferous amendments. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 1987 ; 30 : 225-33.
82. LEWIS JA, PAPAIVAS GC. Evolution of volatile sulfur-containing compounds from decomposition of crucifers in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 1970 ; 2 : 239-46.
83. MUELCHEN AM, RAND RE, PARKE JL. Evaluation of crucifer green manures for controlling *Aphanomyces* root rot of peas. *Plant Dis* 1990 ; 74 : 651-4.
84. PAPAIVAS GC, LEWIS JA. Effect of amendments and fungicides on *Aphanomyces* root rot of peas. *Phytopathology* 1971 ; 61 : 215-20.
85. MUNNECKE DE, MARTIN JP. Release of methylisothiocyanate from soils treated with Mylone (3,5-dimethyl-tetrahydro-1,3,5,2H-thiadiazine-2-thione). *Phytopathology* 1964 ; 54 : 941-5.
86. LLOYD GA. The elimination of methyl isothiocyanate from soil after treatment with metham-sodium. *J Sci Food Agric* 1962 ; 19 : 273-7.
87. SMOLINSKA U, KNUDSEN GR, MORRA MJ. Inhibition of *Aphanomyces euteiches* f. sp. *pisi* by volatiles produced by hydrolysis of *Brassica napus* seed meal. *Plant Dis* 1997 ; 81 : 288-92.

88. SMOLINSKA U, MORRA M, KNUDSEN GR, BROWN PD. Toxicity of glucosinolate degradation products from *Brassica napus* seed meal toward *Aphanomyces euteiches* f. sp. *lisi*. *Phytopathology* 1997 ; 87 : 77-82.
89. LEWIS JA, PAPAIVIZAS GC. Effect of sulfur-containing volatile compounds and vapors from cabbage decomposition on *Aphanomyces euteiches*. *Phytopathology* 1971 ; 61 : 208-14.
90. DAVET P. *Vie microbienne du sol et production végétale*. INRA édition, 1996 ; (07 p3).
91. COLBACH N. Modélisation de l'influence des systèmes de culture sur les maladies du pied et des racines du blé tender d'hiver. Thèse INA-PG, 258 p. + annexes, 1995.
92. SHETTY KG, SUBBARO KV, HUISMAN OC, HUBBARD JC. Mechanism of broccoli-mediated Verticillium wilt reduction in cauliflower. *Phytopathology* 1999 ; 90 : 305-10.
93. HORNBY D, BATEMAN GL, GUTTERIDGE RJ, ET AL. *Take-all disease of cereals. A regional perspective*. Wallingford, UK : CAB International, 1998 ; (384 p).
94. BRISBANE PG, ROVIRA AD. Mechanisms of inhibition of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* by fluorescent pseudomonas. *Plant Pathol* 1988 ; 37 : 104-11.
95. SARNIGUET A, LUCAS P, LUCAS M, SAMSON R. Soil conduciveness to take-all of wheat : Influence of the nitrogen fertilizers on the structure of populations of fluorescent pseudomonads. *Plant Soil* 1992 ; 145 : 29-36.
96. WELLER DM, COOK RJ. Suppression of take-all of wheat by seed treatment with Fluorescent *Pseudomonas*. *Phytopathology* 1983 ; 73 : 463-9.
97. BOWERMAN P, BANFIELD CF. The effect of break crops on winter wheat. *Experimental husbandry* 1982 ; 38 : 10-9.
98. LEMERLE D, TANG HONG Y, MURRAY GM, MORIS S. Survey of weeds and diseases in cereal crops in the southern wheat belt of New South Wales. *Australian journal of Experimental Agriculture* 1996 ; 36(C1, C3) : 545-54.
99. JADOT R. Influence du système de rotation et de la monoculture sur le niveau d'infection du piétin échaudage, *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) var. *tritici*. *Revue Suisse de l'agriculture* 1981 ; 43 : 1299-319.
100. KOLLMORGEN JF, GRIFFITHS JB, WALSGOTT DN. The effects of various crops on the survival and carry-over of the wheat take-all fungus *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Plant Pathol* 1983 ; 32 : 73-7.
101. KIRKEGAARD JA, GARDNER PA, ANGUS JF, KOETZ E. Effect of Brassica Break Crops on the Growth and Yield of Wheat. *Aust J Agric Res* 1994 ; 45 : 529-45.
102. KIRKEGAARD JA, HOCKING PJ, ANGUS JF, HOWE GN, GARDNER PA. Comparison of Canola, Indian mustard and Linola in two contrasting environments. II. Break-crops and nitrogen effects on subsequent wheat crops. *Field Crops Res* 1997 ; 52 : 179-91.
103. KIRKEGAARD JA, SARWAR M. Glucosinolate profiles of Australian canola (*Brassica napus annua* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars : implications for biofumigation. *Aust J Agric Res* 1999 ; 50 : 315-24.
104. KIRKEGAARD JA, SARWAR M, WONG PTW, MEAD A, HOWE G, NEWELL M. Field studies on the biofumigation of take-all by *Brassica* break crops. *Aust J Agric Res* 2000 ; 51 : 445-56.
105. BENDING GD, LINCOLN SD. Characterisation of volatile sulphur compounds produced during decomposition of *Brassica juncea* in soil. *Soil Biol Biochem* 1999 ; 31 : 695-703.
106. GAVITO ME, MILLER MH. Changes in mycorrhizae development in maize induced by crop management practices. *Plant Soil* 1998 ; 198 : 185-92.
107. GAVITO ME, MILLER MH. Early phosphorus nutrition, mycorrhizae development, dry matter partitioning and yield of maize. *Plant Soil* 1998 ; 199 : 177-86.
108. PETERSEN J, BELZ R, WALKER F, HURLE K. Weed suppression by release of isothiocyanates from turnip-rape mulch. *Agron J* 2001 ; 93-1 : 37-43.
109. SMITH SE, READ DJ. *Mycorrhizal symbiosis*. London : Academic Press, 1997 ; (605 p).
110. STRULLU DG, GARBAYE J, PERRIN R, PLENCHETTE C. *Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées*. Paris : Technique et Documentation, Lavoisier, 1991 ; (250 p).
111. PLENCHETTE C. Utilisation des mycorhizes en agriculture et horticulture. In : Strullu D, Garbaye J, Perrin R, Plenchette C, eds. *Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées*. Paris : Technique et Documentation, Lavoisier, 1991 : 131-96.
112. PLENCHETTE C, PERRIN R, DUVERT P. *The concept of soil infectivity and a method for its determination as applied to endomycorrhizas* 1989 ; 67 : 112-5.
113. PLENCHETTE C, FORTIN JA, FURLAN V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. I *Mycorrhizal dependency under field conditions* 1983 ; 70 : 199-209.
114. DE MARS BG, BOENER REJ. Vesicular arbuscular mycorrhizal development in the Brassicaceae in relation to plant life span. *Flora* 1996 ; 191 : 179-89.
115. STOEWESAND GS. Bioactive organosulfur phytochemicals in Brassica oleracea vegetables. *Food and chemical toxicity* 1995 ; 33 : 537-43.
116. SCHREINER PR, KOIDE RT. Mustards, mustard oils and mycorrhizas. *New Phytol* 1993 ; 123 : 107-13.
117. SCHREINER PR, KOIDE RT. Antifungal compounds from the roots of mycotrophic and non-mycotrophic plant species. *New Phytol* 1993 ; 123 : 99-105.
118. VIERHEILIGH, BENNETT R, KIDDLE G, KALDORF M, LUDWIG-MÜLLER J. Difference in glucosinolate patterns and arbuscular mycorrhizal status of glucosinolate-containing plant species. *New Phytol* 2000 ; 146 : 3650-60.
119. CREPIN F. *Les endomycorhizes V.A. dans les agro-écosystèmes : influence des facteurs édaphiques et des pratiques culturales. Mémoire d'Etudes de l'ENSSAA*. Dijon, 1988 ; (63 p).
120. PLENCHETTE C. *Potentiel infectieux mycorrhizogène du sol des parcelles du dispositif Dehérain* 1989 ; 75 : 23-9.
121. ARIHARA J, KARASAWA T. Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. *Soil Sci Plant Nutr* 2000 ; 46-1 : 43-51.

AUXILIAIRES DE CULTURES

INTRODUCTION – LA GESTION DU PAYSAGE POUR FAVORISER LES AUXILIAIRES DE CULTURE QUELLES PISTES DE RECHERCHE ?

De nombreux insectes ravageurs posent de gros problèmes en agriculture biologique, face auxquels aucune méthode de lutte efficace n'est connue : méligèthes sur colza, bruches et sitones sur protéagineux, pour ne citer que quelques uns d'entre eux. Plusieurs pistes sont évoquées pour y remédier : test de produits naturels en traitement, rôle de la rotation, modalités de semis, etc. Un domaine reste à explorer : quelle est l'influence des éléments paysagers entourant la parcelle (bandes fleuries, bois, haies, etc.) ? Comment favoriser le développement d'auxiliaires prédateurs des insectes ravageurs, sans pour autant favoriser la présence de ces derniers ?

COMMUNICATION ORALE

- **Potentialités de la lutte biologique par conservation et gestion des habitats en grandes cultures** (*Jean-Pierre Sarthou, ENSA Toulouse*)

INFORMATIONS SUPPLEMENTAIRES

- Dossier Biodiversité (*Jean-Pierre Sarthou, ENSA Toulouse*) ; *Alter Agri 76* ; 2006.
- Impact des pratiques culturales sur les populations d'arthropodes des sols de grandes cultures - Déterminer des espèces "bio-indicatrices" (Philippe Viaux et Virginie Rameil, ARVALIS-Institut du végétal) ; *Alter Agri 66* ; 2004.

POTENTIALITES DE LA LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION ET GESTION DES HABITATS EN GRANDES CULTURES

J.-P. SARTHOU

*Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse
UMR Dynafor, BP 32607,
F – 31326 Castanet-Tolosan cedex
sarthou@ensat.fr*

RESUME

Les fondements scientifiques du rôle de la diversité biologique dans le fonctionnement et la régulation des écosystèmes sont rappelés et des éléments permettant leur transposition au fonctionnement des agroécosystèmes sont donnés. Le rôle majeur des milieux semi-naturels dans la dynamique des auxiliaires entomophages est montré, de même que celui de la structure et de la composition du paysage à diverses échelles. L'influence positive du mode de production biologique sur la biodiversité générale et les auxiliaires est également rappelée. A partir des principales exigences écologiques des auxiliaires, des possibilités d'aménagements et de gestion autour et au sein des parcelles de grandes cultures pour une protection biologique effective de celles-ci, sont données. Enfin, le cas des méligèthes sur colza est discuté et des éléments relatifs à l'application des mêmes principes d'ingénierie agroécologique face à ces ravageurs sont donnés.

MOTS-CLES : Agroécosystèmes ; auxiliaires ; grandes cultures ; lutte biologique par conservation et gestion des habitats ; milieux semi-naturels ; méligèthes ; colza.

INTRODUCTION

Afin de montrer les potentialités de la lutte biologique par conservation et gestion des habitats, que ce soit en grandes cultures ou dans d'autres systèmes de production, il est important dans un premier temps d'exposer les fondements scientifiques du rôle de la diversité biologique dans le fonctionnement et la régulation des écosystèmes.

La question de l'influence du nombre d'espèces dans un écosystème donné sur l'accomplissement des fonctions de base de ce dernier a toujours été largement débattue entre les scientifiques. Si la fonction de productivité nette (quantité de biomasse produite, éventuellement récoltable, par unité de surface) a fait assez tôt l'objet de recherches, ayant abouti aujourd'hui à un large consensus stipulant qu'elle augmente effectivement avec la biodiversité lorsque les espèces sont compatibles entre elles (e.g. Tilman *et al.*, 2001), la question de la relation entre richesse spécifique et stabilité des écosystèmes apparaît plus difficile à résoudre. Néanmoins, il est clair d'une part que la majorité des résultats aujourd'hui obtenus vont dans le même sens d'un lien fonctionnel entre biodiversité et stabilité (e.g. Bengtsson *et al.*, 2003 ; Wolfe, 2000), et d'autre part que beaucoup des recherches ayant abouti à un résultat inverse avaient mis en œuvre un nombre trop restreint d'espèces. Il y a en effet peu de pertinence à comparer les effets de communautés de 3 ou 4 espèces d'auxiliaires seulement à ceux d'espèces prises isolément lorsque l'on sait que plusieurs dizaines sont habituellement, en tout ou partie, à l'œuvre dans les écosystèmes naturels.

Les mécanismes gouvernant les relations entre biodiversité et fonctions de productivité et de stabilité des écosystèmes, sont de quatre types et amènent à 3 types d'effets :

- effet "échantillonnage" : les chances de recruter les "meilleures" espèces augmentent avec l'augmentation du nombre d'espèces ;
- effet "complémentarité" : les espèces utilisant leurs ressources de façons diverses et celles-ci variant d'une espèce à une autre, les ressources globales d'un écosystème sont mieux utilisées lorsque de nombreuses espèces sont présentes (Loreau & Hector, 2001) ;
- effet "redondance-résilience" : malgré ces diverses stratégies d'utilisation des ressources, les similitudes fonctionnelles peuvent parfois être fortes entre certaines espèces, amenant

ainsi à une certaine redondance fonctionnelle ; en cas de perturbations amenant à la perte d'espèces, ces espèces proches les unes des autres sont, dans certaines limites, interchangeables et permettent ainsi de maintenir le milieu stable (résilience) (Bengtsson *et al.*, 2003).

3 BIODIVERSITE ET STABILITE DANS LES AGROECOSYSTEMES : QUELS SONT LES EFFETS DES MICRO- ET MACRO-PAYSAGES D'UNE PART, ET DES MODES DE PRODUCTION BIOLOGIQUE ET CONVENTIONNEL D'AUTRE PART, SUR LA DYNAMIQUE DES INSECTES RAVAGEURS ET AUXILIAIRES DES CULTURES ?

Il faut entendre par micro-paysages ceux renfermant les micro-habitats que l'insecte va utiliser pour accomplir les diverses phases mais aussi affronter les divers événements au cours de son cycle biologique, à savoir hiverner, éventuellement estiver, se nourrir aux stades larvaires comme adulte, se reproduire, se protéger contre intempéries, ennemis, certaines pratiques culturales etc. Ces micro-paysages, que sont lisières, haies, bandes herbeuses, bord de champs, talus, fossés, bord de mares etc. deviennent alors les milieux semi-naturels (MSN) favorables aux insectes auxiliaires zoophages. En effet, 90% de ces derniers en ont besoin à une ou plusieurs périodes de l'année, alors que seulement 50% des ravageurs sont dans ce cas (Keller & Häni, 2000). Cela a plusieurs fois été vérifié : ces MSN, même les bandes herbeuses issues d'enherbement spontané et parvenues à un certain équilibre écologique après 3 ou 4 années d'évolution (les plantes pionnières envahissantes de type adventices – dites à stratégie "r" i.e. capables de pullulations soudaines comme également nombre de ravageurs - ont alors laissé la place à des plantes plus pérennes – dites à stratégies "K" i.e. à dynamique plus stable), hébergent davantage d'arthropodes zoophages que phytophages, mais en majeure partie des arthropodes dits "neutres" qui très utilement servent de proies/hôtes aux premiers (Thomas *et al.*, 1992). Des travaux non encore publiés de notre équipe ont consisté à dénombrer et à identifier les arthropodes ayant émergé (sous un piège de 2,3 m² au sol), en fin d'hiver, de 50 MSN de natures diverses situés à proximité de parcelles cultivées ou pâturées. Parmi les 105 000 individus capturés, 15% étaient des ravageurs, 22% des auxiliaires (dont des pollinisateurs) et 63% des "neutres". Les ravageurs représentaient moins de 5% des groupes systématiques alors que les auxiliaires en représentaient 41%. Même à l'intérieur de parcelles de grandes cultures, il a été montré par Chambon (1984) que ces ordres de grandeur sont à peu près maintenus avec toutefois une légère prédominance en effectifs d'individus des ravageurs sur les auxiliaires (mais cela s'inverse totalement en terme de nombre de taxons puisque ces derniers ne représentaient alors plus que 3% des 1000 taxons identifiés) mais surtout une très nette domination des "neutres" qui représentaient les deux tiers des 2,75 millions d'individus identifiés. Il ne fait aucun doute que la quasi-totalité des taxons était issue d'individus (potentiellement peu pour les ravageurs puisqu'ils se multiplient ensuite dans la parcelle) ayant colonisé ces dernières à partir des MSN de l'environnement plus ou moins proche. Il est en effet prouvé qu'à chaque succession culturale, les divers travaux du sol, à commencer par le labour, éliminent la plus grande partie des invertébrés supérieurs au moins temporairement édaphiques (e.g. Wardle *et al.*, 1999).

Cela explique que dans un paysage agricole spatialement complexe, diversifié tant au niveau de l'assolement que des MSN et composé de parcelles de taille modérée, il ait été montré dans plusieurs expérimentations que les auxiliaires zoophages sont plus variés et abondants et qu'au contraire les bioagresseurs sont en général moins abondants que dans des paysages agricoles spatialement simplifiés du type "openfields" (Andow, 1991 ; Thies & Tschamtké, 1999 ; Altieri & Nicholls, 2002 ; Nyffeler & Sunderland, 2003 ; Marino & Landis, 1996).

Concernant le mode de production, de très nombreuses expérimentations ont montré une plus grande représentation de la biodiversité en général dans des exploitations en Agriculture Biologique comparativement à d'autres en conventionnel (e.g. Mäder *et al.*, 2002). Une composante fonctionnelle de cette biodiversité, à savoir précisément les

auxiliaires zoophages, apparaît également être plus active et plus efficace dans les exploitations en Agriculture Biologique que dans celles en conventionnel (Bommarco, 1998 ; Östman *et al.*, 2001a ; Östman *et al.*, 2001b).

4 EMERGENCE DE L'INGENIERIE AGROECOLOGIQUE APPLIQUEE A LA PROTECTION DES CULTURES : PEUT-ON CONFERER UNE STABILITE ACCRUE AUX AGROECOSYSTEMES ET A LEURS PARCELLES CULTIVEES GRACE A DES AMENAGEMENTS SPECIFIQUES ET A UNE GESTION ADAPTEE ?

Les éléments exposés précédemment montrent qu'une présence accrue de MSN spontanés au sein d'une matrice agricole à assolement hétérogène, améliore en règle générale le statut des populations d'auxiliaires zoophages régulant ainsi plus efficacement celles des ravageurs.

Dans les paysages agricoles ayant subi de fortes transformations structurelles ces dernières décennies (remembrement avec arrachage de haies et bosquets, arasement de talus, comblement de fossés mis en drains, agrandissement des parcelles), transformations s'étant traduites par une diminution parfois très forte du pourcentage de la surface agricole totale occupée par des MSN, il peut être intéressant d'en recréer pour, entre autres, tenter de bénéficier à nouveau du service écologique de régulation des bioagresseurs. Il est à noter qu'au niveau mondial ce service rendu par la biodiversité a été estimé à une valeur de 100 milliards de dollars (Pimentel *et al.*, 1997), ce qui le place devant les services de fourniture de bois (84 milliards de dollars), de molécules phytopharmaceutiques (84 également) et même devant la chasse et la pêche (85).

Il peut être également intéressant, si les assolements et par conséquent les rotations ont été par trop simplifiés, de réinstaurer une diversité culturale dans l'espace et dans le temps. Cette diversité spatio-temporelle profitera à certains auxiliaires grâce à une offre améliorée en ressources diverses ; c'est la théorie "*enemy*" de Pimentel (1961) qui stipule que les populations de ravageurs sont réduites dans les systèmes diversifiés parce que l'activité des ennemis naturels est augmentée par des paramètres environnementaux qui prévalent dans les agroécosystèmes complexes. Mais cette variété culturale agira également directement et de façon négative sur les bioagresseurs et plus particulièrement sur les ravageurs spécialisés, ceux-ci ayant alors plus de difficultés à localiser visuellement et olfactivement leurs plantes-hôtes lors des phases d'installation et de dissémination ; c'est la théorie "*resource concentration*" de Root (1973) qui stipule que la présence d'une flore plus diversifiée a des effets négatifs directs sur la capacité du ravageur à trouver et à utiliser la plante hôte, mais aussi à rester dans la culture.

Les partisans de chacune des deux théories se sont longtemps disputé la prévalence de celle qu'ils défendaient mais plusieurs études ont démontré que cette prévalence dépend de nombreux facteurs (composition et structure du paysage et de la matrice agricole, nature des aménagements et de la gestion adoptés pour favoriser la protection des cultures) et que les deux mécanismes opèrent globalement à parts égales, et sont même parfois mis concomitamment en œuvre sous le terme de "*Push and Pull strategy*".

Si certaines dynamiques de couples ravageurs/auxiliaires, voire plus largement des relations tri-trophiques cultures/ravageurs/auxiliaires, peuvent être mises en évidence à l'échelle de paysages lorsque ceux-ci arborent des différences structurelles entre eux, dans le cas de la restauration de MSN dans des agroécosystèmes ayant été trop simplifiés, l'échelle d'action et de perception des résultats est bien celle de la parcelle ou de l'îlot parcellaire, échelle d'action adéquate bien évidemment pour l'agriculteur. Il est par contre fort probable que si de telles actions de restauration sont systématisées dans toute une petite région agricole, leurs effets puissent alors être perceptibles à cette échelle paysagère également.

5 SATISFAIRE LES EXIGENCES ECOLOGIQUES DES AUXILIAIRES

Tous les aménagements qu'il sera possible de réaliser pour favoriser les auxiliaires, auront comme but de satisfaire leurs exigences écologiques à diverses phases de leur cycle en leur offrant diverses ressources :

**** des sites d'hivernation** : les possibilités d'hivernation d'arthropodes entomophages dans les parcelles cultivées elles-mêmes sont très limitées dès que les hivers peuvent être qualifiés d'assez froids (cas de certains parasitoïdes dans des pucerons de céréales d'hiver) et les auxiliaires doivent alors, pour la quasi-totalité d'entre eux, avoir trouvé des sites d'hivernation dans les MSN offrant une meilleure protection. Ce phénomène est maintenant particulièrement bien connu pour les prédateurs généralistes de la surface du sol, telles certaines espèces de Carabes, de Staphylins et d'Araignées qui recherchent des couverts herbacés denses et non inondables. C'est ainsi que les premiers aménagements réalisés pour favoriser le développement des insectes dans des agroécosystèmes ont été les "Beetle banks" en Grande-Bretagne, à l'initiative du Game Conservancy Trust, afin de faciliter l'alimentation des poussins de perdrix, de faisans et de cailles. Rapidement, il est apparu que ces bandes de 3 à 8 mètres de large, au profil bombé pour qu'elles ne soient pas submergées d'eau en périodes de fortes pluies (leur centre est 30 à 40 cm au-dessus du niveau des parcelles cultivées), et souvent semées à base de graminées telles la fétuque élevée et le dactyle, étaient des refuges idéaux pour l'hivernation d'une faune prédatrice importante de la strate herbacée (grâce au port en touffe de ces graminées), notamment des carabes, des staphylins et des araignées, tous prédateurs plutôt généralistes. Ces bandes refuges sont aujourd'hui assez répandues outre Manche où elles sont souvent implantées au milieu de grandes parcelles de cultures annuelles, sont espacées de 150 à 200 m afin de favoriser une meilleure répartition des auxiliaires (la plupart des carabes ne dépassent pas les 80 à 90 m des bandes refuges et leur action est donc limitée au-delà – Collins *et al.*, 2002) et reliées si possibles à des MSN ligneux tels que haies ou bosquets qui offrent de meilleurs abris en cas de froids intenses ;

**** des sites d'estivation** : même s'ils sont peu fréquemment évoqués, les sites d'estivation n'en sont pas moins importants tant pour les auxiliaires entomophages qui marquent naturellement une diapause estivale (ou estivo-hivernale comme la Coccinelle à 7 points), que pour ceux qui trouvent peu voire ne trouvent pas de sites de ponte adéquats dans certains milieux (comme les femelles du Syrpe *Episyrphus balteatus* en situation de coteaux secs, sans maïs, du sud de la France). Ces derniers subissent alors une diapause reproductrice totale ou partielle et se maintiennent au stade adulte grâce à quelques fleurs spontanées en milieux peu desséchés (lisières nord de bois, bords de ruisseaux et rares sources) ;

**** des sites refuges** : lors d'une opération culturale menée au cours du développement de la plante, les auxiliaires pouvant se déplacer suffisamment vite (donc essentiellement les adultes bons voiliers) recherchent des endroits assez proches et non perturbés, le temps que la parcelle devienne à nouveau attractive pour eux. Les traitements insecticides mettent particulièrement en exergue l'importance de ces sites refuge du fait qu'ils éliminent tout ou partie des arthropodes présents dans les parcelles. Celles-ci ne pourront être correctement et rapidement recolonisées (après disparition de l'effet répulsif du traitement du à son odeur) que si les zones refuge ne sont pas trop éloignées, les auxiliaires à déplacement rapide étant les premiers à se réinstaller ;

**** des aliments principaux pour les adultes**, i.e. permettant leur reproduction : il est bien connu, notamment chez les prédateurs généralistes tels les Carabes et les Araignées, que des proies de qualité insuffisante ne permettent pas la reproduction lorsqu'elles sont données comme unique aliment (ex : pucerons). De la même façon, les insectes prédateurs au stade larvaire mais floricoles au stade adulte, soit obligatoirement tels les Syrpes soit facultativement tels les Chrysopes, ont besoin d'une offre variée en fleurs car la valeur nutritive du pollen et du nectar est très variable d'une espèce à une autre (les acides aminés du pollen étant nécessaires à l'ovogenèse, et les sucres au vol). Les adultes d'insectes

parasitoïdes ont, pour la plupart des espèces, également besoin de butiner des fleurs leur apportant acides aminés et glucides. Cette nécessité d'aliments différents pour un même stade (pollens et nectars variés pour des adultes) ou entre les stades larvaires (prédateurs) et adulte (floricole), correspond au phénomène écologique de la complémentarité ;

**** des proies / hôtes dits de substitution** (respectivement pour les prédateurs et pour les parasitoïdes) : ils sont nécessaires lorsque celles et ceux propres à la culture ne suffisent pas à la population des auxiliaires entomophages ou sont absents. Pour permettre aux femelles de pondre, afin ne pas perdre le potentiel d'une génération, ces proies / hôtes de substitution doivent se trouver dans un environnement proche des parcelles susceptibles de connaître à court ou moyen terme des phases de pullulation de ravageurs. Cette nécessité de trouver une seconde source de la même ressource proie ou hôte (la première étant insuffisante) correspond au phénomène écologique de la supplémentation.

Les aliments principaux pour adultes et les proies / hôtes dits de substitution sont fournis par ce qu'il est d'usage de nommer en terme agroécologique, les sites ou zones relais.

Ainsi, les plantes sauvages sont pourvoyeuses non seulement de ressources alimentaires indispensables aux auxiliaires entomophages mais aussi parfois simplement de ressources physiques en terme d'abris pour l'hivernation notamment. Il est remarquable de noter que ces ressources, surtout alimentaires, i.e. le pollen et le nectar mais aussi les phytophages qu'elles hébergent et qui sont autant de proies ou hôtes principaux ou de substitution pour les auxiliaires (certaines plantes offrant simultanément fleurs et phytophages, voire également du miellat lorsque ces derniers sont des Homoptères - qui se nourrissent obligatoirement de sève), sont d'une grande constance dans leur occurrence et dans leur qualité. Cela signifie que des espèces végétales données offriront toujours les mêmes ressources, appréciées ou non, aux auxiliaires entomophages (à condition parfois que leur environnement ait permis leur colonisation par des phytophages lorsque ces derniers leur sont plus ou moins spécifiques).

Ces interrelations précises et parfois strictes entre espèces végétales et espèces d'arthropodes, expliquent pourquoi il est aujourd'hui admis que c'est d'une part un usage important et parfois abusif d'herbicides (éliminant non seulement les réelles adventices des cultures mais aussi les autres fleurs sauvages en fait peu concurrentielles - bleuet, nielle des blés, miroir de Vénus...- et toutes les non messicoles de bordures, sensibles aux dérives de traitements) et d'autre part la simplification des paysages avec une forte diminution des MSN et une fragmentation des habitats relictuels, qui sont le principal facteur expliquant la raréfaction des insectes, donc des auxiliaires entomophages, dans les agroécosystèmes de type industriel. Ainsi, ces interrelations sont l'explication fondamentale de la forte dépendance entre les communautés végétales et les arthropodes.

6 DES PLANTES AU SERVICE DES PLANTES, ET DES AMENAGEMENTS A LA PORTEE DES AGRICULTEURS

La connaissance des relations plantes-insectes et l'identification des espèces végétales support d'auxiliaires tout comme de celles support de ravageurs des cultures, sont à la base de toute action d'aménagement des agroécosystèmes pour favoriser la lutte biologique par conservation et gestion des habitats : si les plantes directement ou indirectement support d'auxiliaires disparaissent, ces derniers disparaissent aussi, et *a contrario*, si on réinstalle les plantes utiles, on peut espérer leur retour.

Il est évident que les plantes favorisant les ravageurs ne sont pas à préconiser dans les aménagements ; c'est le cas des crucifères ou Brassicacées qui sont toutes hôtes du puceron cendré du chou *Brevicoryne brassicae*, ravageur important non seulement du chou mais aussi du colza. Ces mêmes plantes hébergent aussi des densités importantes d'altises *Phyllotreta nemorum* et *P. atra*, tout comme de méligèthes *Meligethes aeneus*, ravageur de plus en plus problématique du colza.

Installer des plantes très peu attractives pour les arthropodes entomophages est également à éviter au risque de résultats insuffisants, ce qui est le cas par exemple de l'anthesisque

Anthriscus cerefolium, du lin *Linum usitatissimum*, de la consoude officinale *Symphytum officinale*, de l'ortie royale *Galeopsis tetrahit*...

A l'opposé, certaines plantes sont particulièrement attractives pour ces auxiliaires, grâce à divers types de ressources allant des fleurs ou nectaires extra-floraux à butiner du printemps à l'automne (selon les espèces) aux abris pour la période hivernale (dans des tiges creuses ou sous d'épaisses feuilles), en passant par des phytophages proies ou hôtes qui peuvent être indifférents aux cultures voire inféodés à ces "plantes auxiliaires". Ainsi, des mélanges à base des plus intéressantes d'entre elles, i.e. celles possédant ces caractéristiques intéressantes pour la faune auxiliaire mais présentant aussi d'autres traits indispensables pour leur utilisation au voisinage de grandes cultures (comportement non invasif dans les parcelles, résistance à l'invasion par des adventices majeures –chardons, rumex, chiendent, liseron-, tolérance large aux conditions pédo-climatiques, absence ou tolérance allélopathique et de domination verticale, maintien dans le temps), ont été étudiés en Suisse en bordure de grandes cultures, avec des résultats très probants : augmentation du nombre d'espèces et d'individus d'auxiliaires entomophages (dans la bande de fleurs et souvent sur une frange plus ou moins large de la parcelle cultivée), amélioration de la prolificité et de la longévité des femelles de certaines espèces, présence plus précoce des prédateurs généralistes dans la parcelle, parfois avant celle des ravageurs (e.g. Nentwig, 1998 ; Pfiffner & Wyss, 2004). Ces meilleures plantes sauvages, indigènes dans notre pays, annuelles, bisannuelles ou pérennes, alliées à certaines plantes cultivées (comme le sarrasin *Fagopyrum esculentum*, le fenouil *Foeniculum vulgare*, le sainfoin cultivé *Onobrychis viciifolia*, le panais cultivé *Pastinaca sativa*, la bourrache officinale *Borago officinalis* et la moutarde blanche *Sinapis alba*) sont par exemple : la nielle des blés *Agrostemma githago*, l'achillée millefeuille *Achillea millefolium*, le bleuet *Centaurea cyanus*, la grande marguerite *Chrysanthemum leucanthemum*, la chicorée sauvage *Cichorium intybus*, la vipérine vulgaire *Echium vulgare*, le millepertuis perforé *Hypericum perforatum*, le miroir de Vénus *Legousia speculum-veneris*, la mauve sylvestre *Malva silvestris*, la luzerne lupuline *Medicago lupulina*, le mélilot blanc *Melilotus albus*, la marjolaine sauvage *Origanum vulgare*, le compagnon blanc *Silene alba*, la molène faux bouillon blanc *Verbascum densiflorum*... Il faut noter que plusieurs de ces espèces possèdent des pucerons qui leur sont spécifiques comme le bleuet, le panais, l'achillée millefeuille, le compagnon blanc... Bien que certaines de ces fleurs sauvages puissent héberger des espèces de pucerons ravageurs des cultures (comme *Aphis* spp., *Macrosiphum euphorbiae*, *Metopolophium dirhodum*), il a été prouvé en Suisse qu'étant donné que ces espèces sont elles aussi des proies ou des hôtes alternatifs pour de nombreux auxiliaires aphidiphages, les taux d'infestation en pucerons dans les cultures à proximité des bandes fleuries où se trouvent ces pucerons, sont plus bas que dans les parcelles témoins grâce à l'intervention de davantage d'ennemis naturels favorisés par les bandes fleuries (Nentwig *et al.*, 1998). Ces dernières peuvent être des sites d'hivernation de charançons (*Sitona*, *Ceutorhynchus*), de méligèthes mais il a été prouvé à plusieurs reprises qu'ils sont au printemps nettement moins abondants que dans les bordures de champs naturelles du fait des auxiliaires entomophages qui y sont également favorisés (Nentwig *et al.*, 1998).

Les espèces végétales ligneuses peuvent évidemment répondre aux besoins des arthropodes auxiliaires selon le même principe. Ainsi, même s'il a été prouvé que les haies favorisent moins fortement et moins directement les communautés d'auxiliaires des grandes cultures que les bandes herbeuses ou fleuries (Nentwig, 1988), elles leur sont néanmoins très utiles aussi bien pour les ressources trophiques qu'en tant qu'abris physiques. De plus, elles améliorent le microclimat des parcelles ce qui améliore également la prospection de ces dernières par les auxiliaires. Ce sont surtout les essences à feuillage persistant et floraison très précoce au printemps (parfois même hivernale comme la viorne-tin, selon les années) ou tardive en automne comme le lierre, de même que celles hébergeant des phytophages phyllogénétiquement proches de ceux affectant les cultures (même ordre ou même famille mais espèces différentes ne présentant aucun risque pour la culture) et servant donc de nurserie aux auxiliaires (comme le sureau noir ou le noisetier qui ont tous deux un puceron spécifique), qui sont à privilégier dans les plantations. Il est important de

considérer le fait que les essences non présentes à l'état spontané dans une région n'auront que très peu de chances de recruter des phytophages indigènes et donc de servir de nurserie, et ne pourront éventuellement intéresser les auxiliaires locaux que par des fleurs facilement accessibles, comme la viorne-tin à nouveau dans les régions non méditerranéennes.

L'agriculteur a un autre moyen d'action en périphérie des parcelles, toujours en utilisant les propriétés sémiocchimiques et morphologiques précises et fixes de certaines espèces végétales mais en visant à faire fuir cette fois des insectes ou autres ravageurs bien sûr. C'est le cas du radis oléifère *Raphanus sativus* var. *oleiformis* contre les nématodes, ou encore de la navette contre les méligèthes du colza, dont nous reparlerons, mais dont l'efficacité est très variable (apparemment fonction de la coïncidence temporelle entre l'attractivité de la navette et l'émergence des méligèthes, couplée à une destruction nécessaire et efficace de la culture piège ce qui peut poser problème en Agriculture Biologique).

Reste à l'agriculteur toutes les possibilités de gestion et d'aménagements au sein même de ses parcelles de culture.

Cela commence par la tolérance d'une certaine présence d'adventices au milieu des plantes cultivées. En effet, de très nombreuses expérimentations (e.g. Shelton & Edwards, 1983 ; Häni *et al.*, 1998) ont montré que la présence même non concurrentielle de certaines adventices permet d'augmenter l'activité d'auxiliaires prédateurs et parasitoïdes au sein des cultures.

Le semis direct sous mulch diminue l'attractivité des céréales pour les pucerons, par effet indirectement répétant du mulch mais aussi par celui plus direct des nombreux prédateurs polyphages circulant au niveau du mulch et laissant probablement de nombreux signaux sémiocchimiques (Schmidt *et al.*, 2004a).

Le semis d'une plante de couverture intercalaire, donc entre les rangs de la culture principale, a prouvé expérimentalement être en général une pratique réduisant significativement les dégâts de ravageurs. Citons comme exemples les semis du mélange ray-grass anglais/trèfle *Trifolium* sp. et de dactyle aggloméré, sous couvert de maïs qui ont augmenté le parasitisme des œufs de pyrale et des pucerons (Häni *et al.*, 1998) ; ou encore ceux de la phacélie intercalée dans du blé d'hiver et du maïs qui ont eux aussi permis l'augmentation des œufs et des larves de Syrphes ayant entraîné une baisse significative de la densité de pucerons (Hickman & Wratten, 1996).

Les associations culturales, telles les mélanges céréales-légumineuses graines (dits méteils), sont un moyen classique et efficace pour réduire également l'importance des attaques de ravageurs, souvent davantage par l'effet "*resource concentration*" de (Root, 1973) que par une activité accrue d'auxiliaires même si ceux-là prospectent effectivement plus fortement une parcelle en culture associée (surface hétérogène) qu'une autre en culture simple (surface trop homogène) (Andow, 1986).

Un niveau supérieur d'association culturale est celui associant l'arbre à la culture annuelle, c'est le domaine de l'agroforesterie. Les recherches sont encore balbutiantes en zone tempérée (elles sont bien plus avancées en zones tropicales) mais les premiers résultats sur l'influence d'arbres au milieu des cultures tendent à prouver un effet intéressant sur les populations d'auxiliaires, au moins en système céréalier (Sarhou, 2005).

N'ont été cités jusqu'ici que des exemples montrant un effet bénéfique de ces pratiques faisant appel à des espèces végétales particulières pour résoudre ou atténuer des problèmes de ravageurs sur la culture principale. Il est évident que des cas d'échec de gestion et aménagements existent aussi, cas qu'il est important de faire connaître au travers de publications scientifiques au même titre que ceux ayant réussi, de façon à progresser dans la connaissance de ces relations étroites entre espèces végétales et insectes.

Cependant, dans une revue bibliographique mondiale de 51 publications postérieures à 1990, Gurr *et al.* (2000) montrent que dans 86% des cas on observe une augmentation des populations d'auxiliaires, augmentation suivie dans 68% des cas par une diminution de celles des ravageurs.

7 QUELLES PERSPECTIVES POUR LA LUTTE CONTRE LES MELIGETHES DU COLZA EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE ?

Les méligèthes du colza (*Meligethes aeneus* et *M. viridescens*), dont les adultes, qui occasionnent bien plus de dégâts que les larves, se nourrissent des étamines des boutons floraux et fleurs d'espèces de familles diverses mais préférentiellement de crucifères et dont les femelles pondent dans ceux de ces dernières, occasionnent des dégâts d'ampleur croissante en intensité et en surface en France. En effet, la lutte chimique, essentiellement à base de pyrèthrinoides et plus récemment d'organophosphorés, montre de plus en plus ses limites ne serait-ce qu'avec la progression des cas de résistance dans l'Hexagone, notamment à la première famille de molécules citée. Ainsi, la culture de cet oléagineux de premier plan, qui a fortement augmenté ces dernières années, peut devenir difficile voire impossible en Agriculture Biologique dans certaines régions de France.

La lutte préventive, car il s'agit bien de favoriser cette approche non seulement en AB mais aussi en conventionnel si l'on ne veut pas provoquer une accentuation des problèmes de lutte phytosanitaire chimique évoqués ci-dessus, semble devoir s'orienter vers des éléments du système de culture mais surtout vers une gestion réfléchie de l'incidence du positionnement spatial des parcelles en colza dans un paysage agricole donné.

Ainsi, alors que d'une part la date/densité de semis et le travail du sol (Valantin-Morison *et al.*, 2006) et que d'autre part la variété (de par sa teneur en glucosinolates), ne semblent avoir que de faibles effets sur l'importance des dégâts occasionnés par les méligèthes, le niveau de fertilisation azotée mais aussi, à une autre échelle, la structure et la composition du paysage, tant en MSN qu'en parcelles ayant porté du colza à la précédente campagne, joueraient un rôle bien plus important.

Concernant ces facteurs paysagers, quelques travaux, notamment ceux de Thies & Tschamtké (1999), ont démontré l'importance favorable des MSN non seulement lorsqu'ils se trouvent à proximité directe des parcelles de colza mais aussi lorsque l'on considère leur présence dans un paysage de quelques hectomètres voire kilomètres de rayon : ils favoriseraient le parasitisme des larves de méligèthes situées à l'intérieur des boutons floraux de colza. Concernant la surface en colza présente autour de la parcelle cible, elle montre des effets opposés, i.e. tantôt positifs tantôt négatifs (Valantin-Morison *et al.*, 2006). En revanche, un autre facteur relatif à la sole en colza, qui manifeste un effet constant, est celui de la variation interannuelle de cette dernière : Schmidt *et al.* (2004b) constatent que dans les paysages où la surface de colza diminue par rapport à l'année précédente, les colzas ont davantage d'attaques de méligèthes mais aussi plus de parasitisme des larves de ces derniers, et dans ceux pour lesquels cette surface augmente d'une année à l'autre, la culture a moins d'attaques du ravageur et moins de parasitisme de ses larves de méligèthes. La prise en compte de la bio-écologie des méligèthes et de leurs ennemis naturels parasitoïdes (car les prédateurs n'ont qu'une action très limitée sur leurs larves même lorsqu'elles tombent au sol pour leur nymphose – Nilsson & Andreasson, 1987) permet d'apporter quelques éléments de réponse à une dynamique complexe et parfois déroutante. L'élément central est que les méligèthes adultes émergeant en juillet de leur nymphose réalisée sur le sol de la parcelle cultivée, quittent celle-ci pour aller se nourrir quelques jours sur des fleurs diverses, de préférence de crucifères. De là, ils volent vers leur site de future hibernation, et il est alors classique de citer les bois et sous-bois. Au cours des travaux menés par notre équipe l'hiver dernier et évoqués précédemment, nous avons très nettement constaté que les principales émergences de méligèthes au printemps ont lieu dans des endroits non pas boisés (les pièges en centres de forêt ont pour l'essentiel donné des effectifs très réduits voire souvent nuls) mais caractérisés par une couverture herbacée dense essentiellement à base de graminées, insérée dans un faciès sub-méditerranéen mésoxérophile de début d'embroussaillage, en exposition sud et sud-ouest et donc en situation de réchauffement rapide et de relativement faibles hygrométrie et humidité au sol. Ces conditions stationnelles plutôt sèches doivent limiter fortement l'occurrence et le développement des champignons entomopathogènes comme les entomophthorales. Nous avons pu ainsi observer l'émergence de près de 3900 individus sur une surface de 2,3 m²

seulement. Ces milieux ne sont toutefois et surtout pas à condamner car ils ont en même temps montré qu'ils hébergeaient des populations importantes d'abeilles sauvages et de bourdons (pollinisateurs essentiels des fleurs sauvages et cultivées) dont certaines espèces sont en fort déclin aux niveaux national et européen. Quant à la bio-écologie des parasitoïdes, elle nous apprend que les larves tombent au sol à la sortie de la dépouille larvaire de méligèthe, où elles restent jusqu'à leur nymphose au printemps suivant. Ainsi, il a été démontré que le labour et autres façons culturales d'automne, bouleversant la surface du sol pour la mise en culture suivante, éliminent en grande partie ces larves de parasitoïdes, et qu'il en est de même des applications insecticides sur cette nouvelle culture au printemps suivant (Nilsson & Andreasson, 1987). De ce fait, d'autres travaux ont montré qu'il est préférable de positionner un nouveau colza le plus près possible d'une parcelle en ayant porté lors de la précédente saison (Hokkanen, Husberg & Soderblom, 1988), parcelle qu'il faudrait idéalement et au moins partiellement ni travailler ni traiter jusqu'à l'envol des auxiliaires parasitoïdes au printemps suivant. Le moyen d'action biologique sur les adultes de méligèthes est lui aussi à considérer et passe par l'emploi de cultures pièges, autour ou à proximité de la parcelle en colza, comme du tournesol, du colza ou autres crucifères cultivées, toutes semées de telle sorte que leur floraison précède de quelques jours celle de la culture (Hokkanen, Husberg & Soderblom, 1988 ; Hokkanen, 1989). Ces mêmes cultures pièges peuvent être utilisées pour la capture en juillet-août du 2^{ème} vol, afin de réduire les populations juste avant qu'elles ne partent pour leur hibernation (Husberg, Granlund & Hokkanen, 1985). On peut tout à fait imaginer que ces cultures pièges soient également installées à proximité des zones d'hibernation aux caractéristiques évoquées précédemment, afin de compléter l'action des précédentes.

Nous pouvons donc retenir que les moyens d'action préventive contre les méligèthes du colza concernent certes les éléments du système de production, notamment la fertilisation azotée, mais s'inscrivent aussi et de façon privilégiée à l'échelle du paysage, tant pour défavoriser le ravageur que pour favoriser les auxiliaires.

CONCLUSION

La lutte biologique par conservation et gestion des habitats est la plus récente des trois formes de lutte biologique, puisque le réel démarrage des recherches au niveau mondial date du début des années 1980. Même si les phénomènes en jeu sont d'une complexité pour le moins importante, les connaissances progressent bien et il s'avère que les relations plantes/insectes et insectes/insectes, sur lesquelles repose le principe même de cette lutte biologique, sont beaucoup plus précises et constantes que ce que l'on imaginait au début. C'est non seulement l'amélioration de ces connaissances mais aussi la prise en compte de la dimension spatiale des phénomènes, en partie grâce aux concepts et outils de l'écologie du paysage (SIG notamment), qui permettront de progresser vers une gestion globale des agroécosystèmes (système de production, itinéraire technique, milieux semi-naturels) pour peut-être un jour cultiver du colza sans insecticide...

BIBLIOGRAPHIE

- ALTIERI M.A. & NICHOLLS C.I., 2002. The simplification of traditional vineyard based agroforests in northwestern Portugal: some ecological implications. *Agroforestry Systems*, 56: 185-191.
- ANDOW D.A., 1986. Plant diversification and insect population control in agroecosystems. In *Some aspects of Integrated Pest Management*, D. Pimentel, Ed. Cornell University Press, Ithaca, NY, 277-368.
- ANDOW D.A., 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology*, 36: 561-586.
- BENGTSSON J., ANGELSTAM P., ELMQVIST T., EMANUELSSON U., FOLKE C., IHSE M., MOBERG F. & NYSTRÖM M., 2003. Reserves, Resilience and Dynamic Landscapes. *Ambio*, 32(6), 389-396.

- BOMMARCO, 1998. Reproduction and energy reserves of a predatory carabid beetle relative to agroecosystem complexity. *Ecological Applications*, 8: 846-853.
- CHAMBON, J.-P., 1984. Structure d'une biocénose céréalière. In *Faune et flore auxiliaires en agriculture*, ACTA, pp. 19-27.
- COLLINS K.L., BOATMAN N.D., WILCOX A., HOLLAND J.M. & CHANEY K., 2002. Influence of beetle banks on cereal aphid predation in winter wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93: 337-350.
- GURR G. M., WRATTEN, S.D. & BARBOSA P., 2000. Success in Conservation Biological Control of arthropods. In *Biological Control: Measures of success*, Gurr G. M. & Wratten S.D. (Eds.), 2000, Kluwer Academic Pub., 105-132.
- HÄNI F. J., BOLLER E. F. & KELLER S., 1998. Natural regulation at the farm level. In *Enhancing Biological Control*, Univ. of California Press, Berkeley, 161-210.
- HICKMAN J.M. & WRATTEN S.D., 1996. Use of *Phacelia tanacetifolia* strips to enhance biological control of aphids by hover fly larvae in cereal fields. *J. Econ. Entomol.*, 89: 832-840.
- HOKKANEN H., 1989. Biological and agrotechnical control of the rape blossom beetle *Meligethes aeneus* (Coleoptera, Nitidulidae). *Acta Entomologica Fennica*, 53: 25-29.
- HOKKANEN H., HUSBERG G.B. & SODERBLOM M., 1988. Natural enemy conservation for the integrated control of the rape blossom beetle *Meligethes aeneus* F. *Annales Agriculturae Fenniae*, 27(4): 281-194.
- HUSBERG G. B., GRANLUND H. & HOKKANEN H., 1985. Control of rape beetles with the aid of trap crops. *Vaxtskyddsnotiser*, 49(5): 98-101.
- KELLER, S., & HÄNI, F., 2000. Ansprüche von Nützlingen und Schädlingen an den Lebensraum. in W. Nentwig (Ed.), *Streifenförmige ökologische Ausgleichsflächen in der Kulturlandschaft: Ackerkrautstreifen, Buntbrache, Feldränder*. Bern, Hannover: Verlag Agrarökologie.(S. 199-217).
- LOREAU M. & HECTOR A., 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412: 72-76.
- MÄDER P., FLIESSBACH A., DUBOIS D., GUNST L., FRIED P. & NIGGLI U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296: 1694-1697.
- MARINO, P. C. & LANDIS D. A., 1996. Effect of landscape structure on parasitoid diversity and parasitism in agroecosystems. *Ecological Applications*, 6: 276-284.
- NENTWIG W., 1988. Augmentation of beneficial arthropods by strip-management. 1. Succession of predacious arthropods and long-term change in the ratio of phytophagous and predacious arthropods in a meadow. *Oecologia*, 76(4): 597-606.
- NENTWIG W., 1998. Weedy plant species and their beneficial arthropods: potential for manipulation in field crops. In *Enhancing Biological Control*, Univ. of California Press, Berkeley, 49-71.
- NENTWIG W., FRANK T. & LETHMAYER C., 1998. Sown weed strips: artificial beneficial compensation areas as an important tool in conservation biological control. In *Conservation Biological Control*, Academic Press, London, 133-153.
- NILSSON C. & ANDREASSON B., 1987. Parasitoids and predators attacking pollen beetles (*Meligethes aeneus* F.) in spring and winter rape in southern Sweden. *Bulletin-SROP*, 10(4): 64-73.
- NYFFELER M. & SUNDERLAND K.D., 2003. Composition, abundance and pest control potential of spider communities in agroecosystems: a comparison of European and US studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95: 579-612.
- OSTMAN O., EKBOM B. & BENGTSSON J., 2001a. Landscape heterogeneity and farming practice influence biological control. *Basic Appl. Ecol.*, 2, 365-371.
- OSTMAN O., EKBOM B., BENGTSSON J. & WEIBULL A.C., 2001b. Landscape complexity and farming practice influence the condition of polyphagous carabid beetles. *Ecological Applications*, 11(2): 480-488.
- PIFFNER L. & WYSS E., 2004. Use of sown wildflower strips to enhance natural enemies of agricultural pests. In *Ecological Engineering for Pest Management*, CABI Publishing, Oxon, 165-186.

- PIMENTEL, D., 1961. Animal population regulation by the genetic feed-back mechanism. *Amer. Natur.*, 95: 65-79.
- PIMENTEL D., WILSON C., MCCULLUM C., HUANG R., DWEN P., FLACK J., TRAN Q., SALTMAN T. & CLIFF B., 1997. Economic and environmental benefits of biodiversity. *BioScience*, 47(11): 747-757.
- ROOT R.B., 1973. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs*, 43: 94-125.
- SARTHOU J.P., 2005. Le comportement des insectes. In "Agroforesterie : produire autrement", Chambres d'Agricultures, 945 : 25.
- SCHMIDT, M.H., THEWES U., THIES C. & TSCHARNTKE T., 2004. Aphid suppression by natural enemies in mulched cereals. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 113(2): 87-93.
- SCHMIDT M.H., THIES C. & TSCHARNTKE T., 2004. Landscape context of arthropod biological control. In *Ecological Engineering for Pest Management*, CABI Publishing, Oxon, 55-63.
- SHELTON M. D. & Edwards C. R., 1983. effects of weeds on the diversity and abundance of insects in soybeans. *Environ. Entomol.*, 12: 296-298.
- THIES C. & TSCHARNTKE T., 1999. Landscape structure and biological control in agroecosystems. *Science*, 285: 893-895.
- THOMAS M.B., WRATTEN S.D. & SOTHERTON N.W., 1992. Creation of "Island" habitats in farmland to manipulate populations of beneficial arthropods: predator densities and species composition. *J. Appl. Ecol.*, 29: 524-531.
- TILMAN D., REICH P.B., KNOPS J., WEDIN D., MIELKE T. & LEHMAN C. 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science* 294: 843-845.
- VALANTIN-MORISON M., MEYNARD, J.M. & DORE T. (sous presse). Effects of crop management and surrounding field environment on insect incidence in organic winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Crop Protection*.
- WOLFE M. S., 2000. Crop strength through diversity. *Nature*, 406: 681-682.
- WARDLE D.A., GILLER K.E. & BARKER G.M., 1999. The regulation and functional significance of soil biodiversity in agroecosystems. In *Agrobiodiversity: Characterization, utilization and Management*, Wood D. & Lenné J.M. (Eds.), CABI Publishing, New York, 490 pp.

Quand la biodiversité rend des services à l'agriculture, "biologique" devient le maître mot

Dossier par Jean-Pierre Sarthou (Agroécologue-entomologiste, ENSAT¹)

La biodiversité, au sens des interactions entre espèces bénéfiques à la production agricole, est le dernier révélé des facteurs de production mais aussi le plus complexe. Sa signification est aussi large et parfois floue qu'évidente quand elle est évoquée en termes simples. Il en est de même pour ses concepts. Les services qu'elle peut potentiellement rendre à l'agriculture sont essentiels et paradoxalement d'autant mieux perçus maintenant que certains d'entre eux s'amenuisent du fait de certains déséquilibres écologiques.

Biodiversité. Voilà un néologisme apparu en 1986², largement popularisé depuis et notamment suite au deuxième Sommet de la Terre tenu sous l'égide des Nations Unies à Rio de Janeiro en 1992. La Convention sur la diversité biologique y fut ratifiée par plus de 150 pays.

Les notions que ce terme recouvre trouvent un consensus assez général aujourd'hui. La définition la plus classique est celle-ci : la diversité de toutes les formes du vivant à diverses échelles allant du gène au paysage en passant par les espèces puis les écosystèmes. Les scientifiques ajouteront qu'il convient d'y adjoindre les notions de composition, de structure et de fonction. Pour simplifier, disons d'une part que la biodiversité est la manifestation de la vie sous toutes ses formes, et d'autre part qu'elle est le plus souvent appréhendée au travers du nombre d'espèces et de l'abondance de chacune dans divers milieux plus ou moins anthropisés et d'étendue variable. C'est d'ailleurs bien le nombre d'espèces et parfois d'individus qui est régulièrement donné pour évoquer la vertigineuse érosion de la biodiversité³ sur toute ou partie de notre planète.

La biodiversité fonctionnelle, en interaction directe avec l'agriculture

Et c'est encore le niveau spécifique (espèces) qui est le plus à même de rendre compte des innombrables interactions biotiques qui conditionnent directement ou indirectement une part des performances des systèmes de production agricole. On parle alors souvent du rôle bénéfique de la biodiversité fonctionnelle dans les agroécosystèmes. Une des composantes de la biodiversité fonctionnelle, directement utile à l'agriculture, comprend toutes les variétés végétales et races animales des espèces domestiquées par l'homme (voir schéma).

Mais il est une autre composante de la biodiversité fonctionnelle en agriculture à laquelle il est moins fréquemment fait allusion, et qui joue néanmoins un rôle primordial. C'est celle des espèces que l'on pourrait qualifier de "sauvages" dont la présence et la fonction sont utiles aux cultures. Ces espèces sont qualifiées d'auxiliaires, même si ce

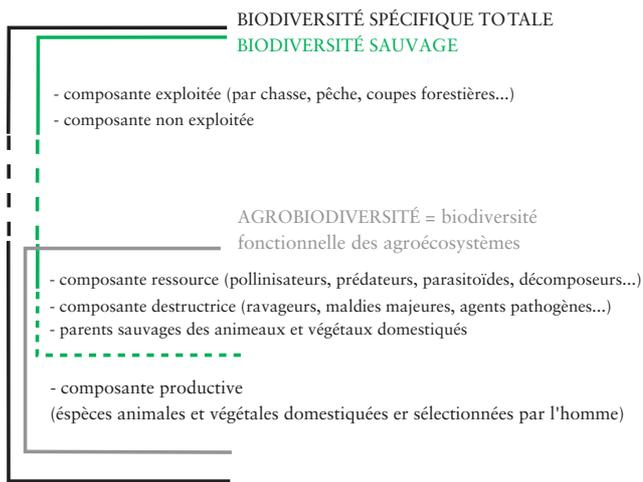
terme est surtout réservé aux pollinisateurs et aux prédateurs/parasitoïdes des ravageurs des cultures.

La liste des exemples de l'utilité pour l'agriculture de cette biodiversité dite fonctionnelle, dont on a du mal à réaliser l'importance tant elle est discrète, est à peine ébauchée dans ce dossier. C'est dire la complexité et la richesse des interactions entre espèces dans les agroécosystèmes. Certes certaines sont néfastes aux cultures et les effets des ravageurs, champignons pathogènes et adventices majeurs sur les cultures, sont pour la plupart très bien connus depuis longtemps. Mais on commence à réaliser qu'en apprenant à connaître les interactions bénéfiques majeures entre espèces, et en adoptant des pratiques et des aménagements les favorisant, on peut améliorer significativement et à moindre frais la qualité voire la quantité d'une production. Prenons par exemple des espèces (cultivées et élevées) associées et des mélanges variétaux. Les associations éprouvées, telles que pois-triticales, avoine-féverole voire blé-orge-avoine-pois-vesce etc., ou encore et plus large-

¹ Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, UMR DYNAFOR, BP 32607 F-31326 AUZEVILLE-TOLOSANE cedex

² Créé par un journaliste américain lors du 1^{er} forum américain sur la diversité biologique, à Washington, pour mieux populariser la notion de "crise de la diversité biologique" dénoncée par l'entomologiste Edward O. Wilson dans un article scientifique paru en 1985.

³ L'homme est pour la 1^{re} fois responsable d'une extinction de masse des espèces, la 6^{me} de toute l'histoire de la Terre, au rythme de 75 espèces par jour alors que les précédentes se sont faites au rythme de 15 espèces par siècle...



Dans chacun des trois compartiments de la biodiversité spécifique totale, des espèces sont qualifiées de patrimoniales quand elles sont devenues rares, et de banales dans le cas contraire

Les composantes de la biodiversité

ment toutes les possibilités en agrosylvo-pastoralisme et en agroforesterie, font directement intervenir la biodiversité productive. Mais la biodiversité associée (ou "sauvage") s'en trouve souvent augmentée de fait, et la part "auxiliaire" de cette dernière l'est aussi la plupart du temps.

Les intérêts, tant en terme de productivité que de stabilité, de telles associations et plus largement des pratiques de l'agriculture biologique fondée sur des préceptes de respect des équilibres naturels, sont de mieux en mieux expliqués par la recherche scientifique.

Les avancées apportées par la Seconde Révolution Agricole de l'après Seconde Guerre Mondiale ont été spectaculaires, même si cette forte industrialisation de l'agriculture n'a pas eu que des points positifs. Toutefois, ce sont les paysans qui ont depuis 10 000 ans perfectionné l'agriculture. Ils ont créé infiniment plus de variétés, de races et de systèmes de production (et même des sols !) que ne l'a fait la recherche agronomique scientifique qui, à cette échelle de temps, vient d'apparaître. Loin de vouloir nier les connaissances très utiles que celle-ci a apportées et qu'elle va continuer à apporter pour parvenir à une agriculture performante et respectueuse de l'environnement, il faut reconnaître qu'elle a surtout bénéficié jusqu'à maintenant, au travers de l'agriculture industrielle qu'elle a essentiellement soutenue, d'un facteur de production essentiel et pléthorique, qui était auparavant très fortement limitant : l'énergie, pour faire tourner les trac-

teurs et autres machines, pour apporter l'eau, les engrais et les produits phytosanitaires aux cultures.

"Energie culturelle biologique"

L'énergie, dont la forme fossile est la plus commode et efficace d'utilisation en agriculture, posera problème dans quelques décennies. Or, il est indispensable d'en injecter en permanence dans les agroécosystèmes (on parle "d'énergie culturelle") pour qu'ils ne dévient pas spontanément vers des systèmes "naturels" dont l'homme ne peut presque pas tirer profit pour son alimentation et qui sont d'ailleurs beaucoup moins productifs que les cultures :

0,1% en moyenne de l'énergie solaire reçue est transformée en biomasse totale dans les systèmes naturels, contre 0,5 à 4% pour les diverses cultures dont une grande part de la biomasse est de plus utilisable à des fins d'alimentation. Face au défi à venir, à savoir l'augmentation d'ici à 2050 de 50% de notre volume de production totale pour nourrir 9 milliards d'habitants contre 6,1 aujourd'hui (ce qui veut dire aussi qu'en 2050 l'humanité aura consommé en seulement 50 ans, autant de nourriture que ce qu'elle a consommé depuis l'apparition du premier Hominidé il y a quelque 6 millions d'années jusqu'en 2000), et ceci dans un contexte de raréfaction de l'énergie alors que nous avons augmenté nos volumes de production ces 50 dernières années essentiellement grâce à elle, il sera absolument nécessaire de trouver des sources d'énergie culturelle autres qu'industrielles. A ce titre, la biodiversité n'a pas fini de faire parler d'elle. Nous allons le voir dans les pages suivantes : elle est capable de fournir des services écologiques comme la prédation de ravageurs ou l'amélioration de la structure du sol, permettant d'économiser cette énergie culturelle industrielle ; on parle justement à son sujet "d'énergie culturelle biologique". En cela, la biodiversité doit être considérée comme un facteur de production à part entière. n

L'agriculture biologique, un laboratoire à ciel ouvert

Assurément, le leitmotiv d'apparence simpliste des agrobiologistes "respecter les équilibres naturels pour travailler avec la nature et non contre elle", que des millions de paysans, bien souvent contraints il faut le dire, se sont toujours évertués de suivre, et que d'une part un récent rapport de l'Inra et du Cemagref⁴ et d'autre part le Plan Agriculture de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité⁵ du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable mettent en exergue sous d'autres termes, a encore de beaux jours devant lui.

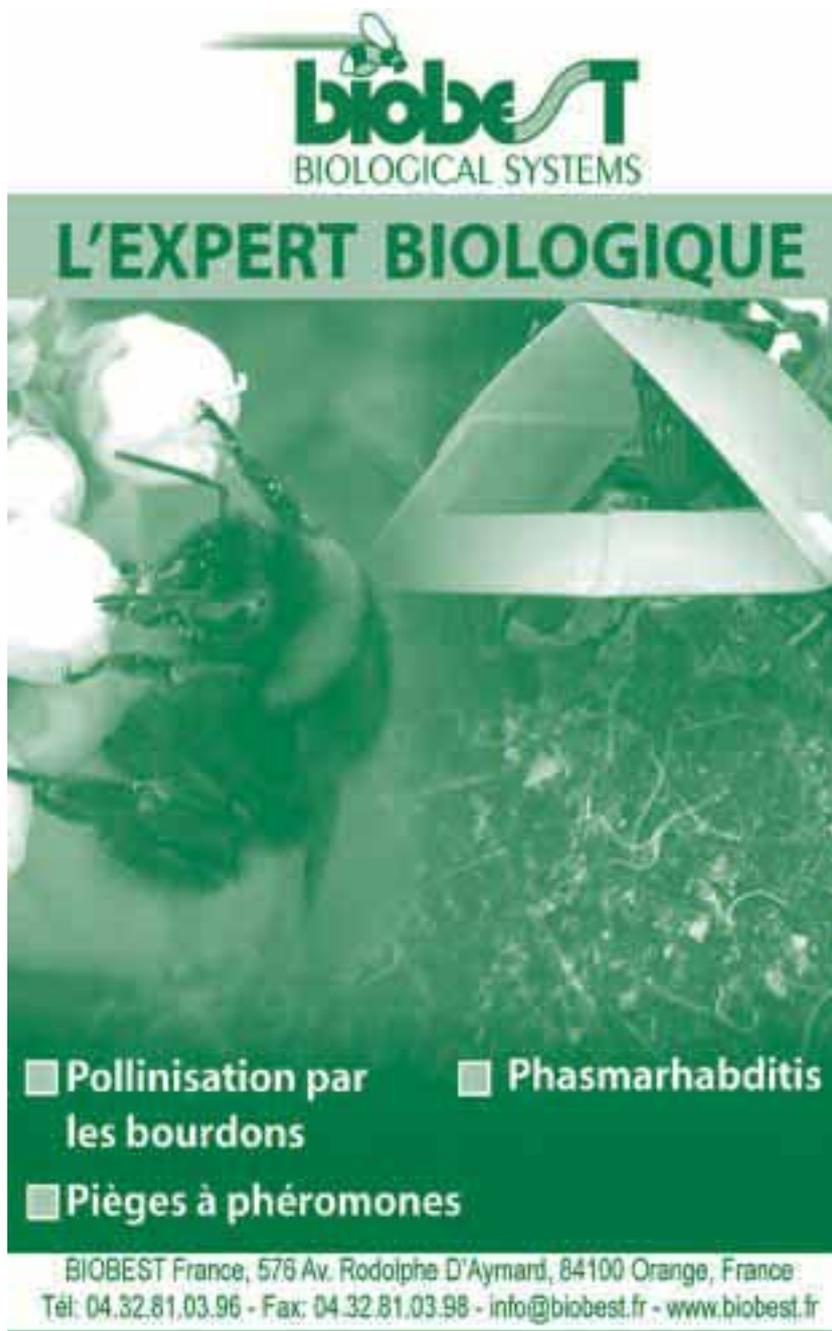
L'agriculture biologique a toujours eu cet intérêt inestimable d'être un formidable laboratoire à ciel ouvert pour produire en recourant le plus possible aux processus naturels de régulation et de recyclage. Elle a compris depuis longtemps que la biodiversité est ce facteur de production qui, moins facilement que les autres toutefois, doit être pris en compte et favorisé. Il est aujourd'hui démontré qu'au-delà de cette fraction de la biodiversité directement utile à l'acte de production, cette agriculture génère globalement (les exceptions existent) une biodiversité plus importante que les autres modes de production. Sans doute aucun, l'agriculture biologique a le potentiel de jouer encore longtemps ce rôle avant-gardiste et d'être, sur ce point au moins, de plus en plus inspiratrice des autres agricultures pour le bénéfice de toute la société.

⁴ "Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux". www.inra.fr ; www.cemagref.fr

⁵ http://www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=235

Les pollinisateurs : indispensables mais menacés

La pollinisation des cultures par les insectes est un des phénomènes les plus parlants de la biodiversité fonctionnelle. Malheureusement, le nombre et la diversité des pollinisateurs diminuent.



biobest
BIOLOGICAL SYSTEMS

L'EXPERT BIOLOGIQUE

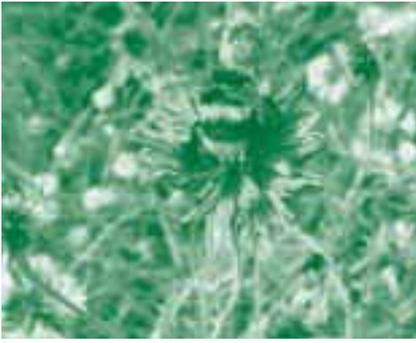
- Pollinisation par les bourdons
- Phasmarhabdites
- Pièges à phéromones

BIOBEST France, 576 Av. Rodolphe D'Aymard, 84100 Orange, France
Tél: 04.32.81.03.96 - Fax: 04.32.81.03.98 - info@biobest.fr - www.biobest.fr

Au niveau mondial, 80% des espèces végétales ont besoin des insectes pour la production de leurs graines et donc pour se reproduire, et 84% des espèces cultivées en Europe sont dans ce cas.

L'immense majorité des espèces végétales sont autotrophes et sont donc d'une importance vitale pour le fonctionnement des écosystèmes, dont l'homme dépend. Elles sont en effet à la base de toute chaîne alimentaire puisque seules capables de synthétiser de la matière organique (glucides, protéines, lipides) à partir de lumière et de sels minéraux. Les végétaux hétérotrophes en sont par contre incapables et vivent alors en parasites en puisant des molécules organiques dans d'autres plantes (cas du gui sur de nombreux arbres, mais surtout de la cuscute de la luzerne ou encore des orobanches comme celle du tournesol – dans ces deux derniers cas, la plante parasite "se connecte" à son hôte au niveau des racines).

Les principaux pollinisateurs sont les insectes, parmi lesquels les Hyménoptères et notamment les apoïdes (abeilles domestique et sauvages, et bourdons) sont de loin les plus importants, suivis par les Diptères Syrphidés puis par les Lépidoptères et Coléoptères. Le service écologique de pollinisation rendu par la seule abeille domestique est estimé entre 5 et 14 millions de dollars par an aux Etats-Unis, et celui rendu par les pollinisa-



Le bleuet a l'avantage d'intéresser non seulement les pollinisateurs, ici un bourdon (*Bombus lucorum*), mais aussi d'héberger un puceron spécifique (*Uroleucon jaceae*) qui servira de proie aux auxiliaires en cas d'absence de proies dans les cultures, sans menacer ces dernières. Bien des végétaux sauvages sont dans ce cas : sureau noir, noisetier, achillée millefeuille...

La protection des plantes, un grand rôle de la biodiversité fonctionnelle

teurs sauvages fait actuellement l'objet de recherches en Europe.

Malheureusement, les populations de pollinisateurs sont en mauvaise posture dans les pays industrialisés et aux États-Unis encore, leurs populations ont diminué de 25% depuis 1990. Les espèces sauvages ont régressé essentiellement à cause de la destruction et de la fragmentation des habitats naturels et semi-naturels, de l'intensification des pratiques agricoles, de la pollution environnementale en général et in fine de la compétition directe avec l'abeille domestique qu'elles sont devenues incapables de supporter ou simplement d'éviter.

Les conséquences écologiques de cet appauvrissement sont potentiellement très préoccupantes puisqu'il a été montré très récemment pour la première fois que l'appauvrissement de la diversité des pollinisateurs (du fait de la destruction de leurs sites de nidification par exemple) entraîne à court terme celui de la communauté de fleurs à pollinisation entomophile. Cela revient à dire que les différentes espèces de pollinisateurs ne peuvent pas totalement se remplacer les unes les autres pour assurer la fonction de pollinisation des fleurs, et ce sans parler d'association stricte entre une espèce de fleur et son agent pollinisateur (comme l'orchidée relativement commune *Serapias lingua* qui n'est pollinisée que par les mâles de *Ceratina cucurbitina*, petite abeille sauvage de la famille des Anthophoridés). n

Le domaine de la protection des cultures n'est pas avare non plus d'exemples remarquables de services très utiles rendus par des espèces auxiliaires. Et c'est celui qui subit le plus fort impact négatif de la diminution de la biodiversité dans les agroécosystèmes, en terme d'instabilité des cultures (attaques de ravageurs).

Ces dernières décennies, les cas d'efficacité insuffisante des auxiliaires en grandes cultures se multiplient. Cela à cause de la simplification structurale et biologique des agroécosystèmes industriels : agrandissement des parcelles, arasement des talus et arrachage des haies, appauvrissement de la flore sauvage, qui leur sont de plus en plus hostiles. Mais, si l'on compare la quantité de ravageurs des cultures à un iceberg, les populations de ravageurs non régulées par les auxiliaires ne sont que la petite partie visible. L'énorme partie submergée, elle, représente la quantité de ravageurs consom-

mée par les auxiliaires dans et hors des parcelles, presque à longueur d'année et sans que personne ne le remarque ! Même si le calcul exact ne peut pas être fait, il est probable en effet que chaque année les prédateurs et parasitoïdes tuent davantage de ravageurs que ne le font les insecticides !

Reconnaissance du rôle majeur des auxiliaires : la lutte biologique

Lutte biologique par augmentation

Si en milieu clos la lutte biologique par augmentation (qualifiée de "lutte biologique intégrée" par les serristes car ils la doublent souvent d'une lutte chimique raisonnée d'appoint) connaît aujourd'hui un succès et une diffusion croissante, son homologue en grandes cultures, qui nécessite aussi l'achat et l'introduction massive d'auxiliaires, n'a toujours qu'un seul exemple aujourd'hui bien développé, celui des trichogrammes (*Trichogramma brassicae*) contre les œufs de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*). Un second exemple, beaucoup plus récent et restreint aux cultures légumières et orne-



*Semis expérimental de sarrasin dans des inter-rangs de vigne pour favoriser des trichogrammes (micro-Hyménoptères), parasitoïdes spécifiques des œufs de la tordeuse de la grappe *Eupoecilia ambiguella* (Nouvelle-Zélande, résultats positifs)*

mentales concernant son homologation est celui du nématode *Phasmarhabditis hermaphrodita* parasite mortel des limaces. De rares autres exemples clôturent la liste des organismes animaux que l'on peut introduire en plein champ, souvent en cultures spécialisées (olivier, cultures fruitières, légumières et ornementales) : des micro-Hyménoptères, Névrotères, Hétéroptères et acariens ennemis de phytophages aériens, et des nématodes et autres acariens pour la plupart ennemis de stades endogés de phytophages aériens ou de ravageurs du sol. Même les champignons se prêtent maintenant à cette lutte biologique comme *Coniothyrium minitans* contre *Sclerotinia sclerotiorum* (autre champignon, pathogène polyphage sur tournesol, soja, colza, salade, carotte...) et *Beauveria bassiana* contre la pyrale du maïs. Le fait qu'aucun acarien Phyto-séide prédateur des classiques acariens phytophages de la vigne ne soit commercialisé n'est pas le fruit du hasard et nous en reparlerons.

Lutte biologique par importation

Elle concerne essentiellement la lutte contre les ravageurs (et parfois des adventices) introduits d'autres pays ou continents par des auxiliaires eux-mêmes importés. Elle fait l'objet de critiques de plus en plus fréquentes quant aux risques potentiels et parfois bien réels d'atteinte directe et indirecte d'organismes non cibles.

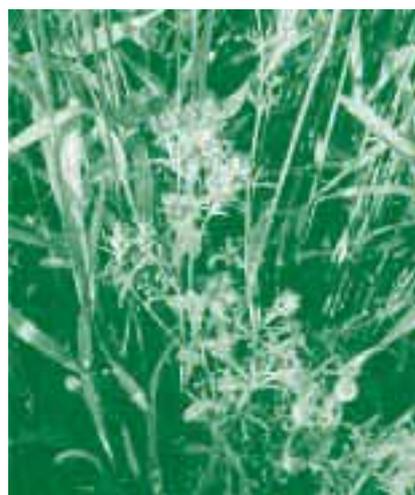
Lutte par conservation et gestion des habitats

C'est la forme de lutte biologique la plus récente : elle ne fait l'objet de recherches en grandes cultures et cultures pérennes que depuis une quinzaine d'années. Elle consiste à "donner un coup de pouce" aux auxiliaires naturellement présents dans les agroécosystèmes, en leur fournissant les ressources dont ils ont besoin : hôtes et proies de substitution lorsque les parcelles cultivées en sont dépourvues, pollen et hydrates de carbone (nectar, miellat), sites refuges lors des opérations culturales, et sites d'estivation et d'hivernation. Si l'on désire avoir ces auxiliaires dans les cultures, il faut bien réaliser qu'ils n'apparaissent nullement par génération spontanée, et qu'ils doivent trou-

ver tout au long de l'année, en temps et lieux opportuns, les ressources correspondant à chaque phase de leur cycle. Les aménagements destinés à fournir ces ressources sont divers mais font la plupart du temps intervenir l'implantation d'un couvert végétal herbacé ou ligneux, annuel, bisannuel ou pérenne, mono- ou plurispécifique. Il est surtout nécessaire dans les systèmes de cultures annuelles, puisque le couvert végétal cultivé est totalement déstructuré chaque année, contrairement aux cultures pérennes. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si les premiers exemples très probants de cette lutte biologique ont concerné les acariens en viticulture et arboriculture.

Là où les insecticides et acaricides à large spectre, utilisés dans l'euphorie de la révolution chimique de l'après Seconde Guerre Mondiale, avaient rompu les équilibres, la mise en place d'une lutte raisonnée a, dans la majorité des cas, permis la réinstallation progressive des auxiliaires et notamment des acariens acarophages, de façon spontanée ou par inoculation à partir de zones réservoirs. Ces zones : éléments non cultivés et parcelles en agriculture biologique de longue date, ont servi de "pieds de cuve" lors des nombreuses expérimentations dès le milieu des années 1980. On comprend alors pourquoi il n'est pas nécessaire de recourir à des élevages de type industriel pour ces acariens auxiliaires, l'environnement parcellaire étant potentiellement apte à assurer leur présence. Les Phyto-séides ont d'ailleurs une caractéristique essentielle facilitant leur maintien : si leurs proies (acariens Tétranychidés pour l'essentiel) sont absentes ou insuffisamment abondantes, ils se rabattent sur du pollen de fleurs diverses et peuvent même ainsi assurer leur reproduction. Le tout est que l'environnement de la parcelle voire la parcelle elle-même soit apte à fournir ce pollen, en quantité et qualité suffisantes. Plusieurs expérimentations, notamment en Suisse, ont montré que l'installation d'un couvert de graminées (les meilleures étant *Poa pratensis*, *Lolium multiflorum* et *Dactylis glomerata*), et de plantes à fleurs, broyées par rangées alternées tous les deux ans, permet de favoriser les Phyto-séides mais aussi des trichogrammes tel que *T. brassicae*, parasitoïdes des œufs de la tordeuse de la grappe *Eupoecilia ambiguella*.

De nombreuses expérimentations ont été et vont de plus en plus être menées pour favoriser les auxiliaires, notamment en systèmes de grandes cultures et cultures spécialisées. Par exemple l'installation de bandes de phacélie en bordure de parcelles de blé ou de choux pour favoriser les auxiliaires aphidiphages, tels que les Syrphidés. Ils se nourrissent de nectar et de pollen au stade adulte et vont ensuite pondre dans les colonies de pucerons dont se nourriront les larves. Ils iront donc préférentiellement sur les fleurs se trouvant à proximité des colonies de pucerons.



Certaines plantes messicoles comme ici le miroir de Vénus (*Legousia speculum-venereis*), peuvent améliorer l'activité et donc l'efficacité des auxiliaires dans les parcelles de céréales

Il a aussi été montré à de nombreuses reprises que des cultures hébergeant une proportion acceptable de plantes adventices reçoivent la visite d'un nombre plus important d'insectes auxiliaires qui souvent y exercent une action protectrice contre les ravageurs.

Les aménagements peuvent aussi plus simplement porter sur la mise à disposition des organismes utiles de sites d'hivernation ou encore de nidification. Divers abris pour les insectes, tels des chaumes pour les micro-Hyménoptères rubicoles¹ comme les Pemphrédoninés prédateurs de pucerons, ou encore des boîtes à claire voies pour les chrysopes, sont bien connus de certains jardiniers. Beaucoup moins connue des arboriculteurs conventionnels est la possibilité d'installer dans les vergers de pommiers ou de poiriers notamment, des nichoirs à mésanges. Plusieurs travaux de

¹ Rubicole : du latin *rubus* (ronce) et *colere* (habiter) : les insectes qui habitent dans la ronce. Mais cette expression a été étendue à tous les insectes nidifiant dans les tiges à moelle, faciles à creuser.

recherches ont montré que ces oiseaux auxiliaires, s'alimentant d'insectes non loin des nioirs en hiver (ces oiseaux sont obligatoirement cavicoles pour supporter les basses températures nocturnes), peuvent dans certains cas éliminer 80 à 90% des chenilles de carpocapse en diapause sous les écorces et à la base des troncs. Lors de l'élevage des jeunes, leur effet est également important et étendu à bien d'autres insectes, principalement des chenilles de Lépidoptères ravageurs.

Des champignons participent aussi à la lutte

A côté des arthropodes auxiliaires, des champignons agissent aussi, de façon spontanée mais non spécifique. Ils se répartissent en deux grands groupes écologiques :

- ceux qui occupent plutôt le compartiment aérien (plusieurs espèces d'entomophthorales, qui sont des champignons inférieurs) ;
- ceux que l'on rencontre dans le sol (plusieurs espèces de "muscardines", qui font partie des champignons imparfaits).

Les premiers sont des ennemis classiques et potentiellement très efficaces de nombreux ravageurs des parties aériennes des cultures : larves et adultes de tenthrèdes, de cécidomyies, de taupins, d'acariens, de pucerons, de thrips... Les individus contaminés par le champignon se dirigent, juste avant de mourir, vers les parties hautes des plantes et se positionnent la tête en bas, ce qui facilite la dissémination des spores et donc l'étendue de l'épidémie. Les traitements fongicides et l'élimination de la végétation spontanée et surtout des zones humides provoquent la raréfaction de ces champignons auxiliaires, capables de stopper une pullulation de pucerons en quelques jours lorsque le temps s'y prête (chaud et humide).

Les seconds, des genres *Beauveria*, *Metarhizium*, *Verticilium*, sont également favorisés par des itinéraires évitant tout traitement fongicide et herbicide racinaire. Ils contribuent à limiter les larves et adultes de hannetons, doryphores, taupins, et même les nématodes avec le genre *Arthrobotrys* qui les attrape au collet !



Sur des pavots de Californie, le syrphé très commun *Episyrphus balteatus* dont la très discrète larve est aussi efficace que la médiateur coccinelle à 7 points adulte et larve réunis

Tout un univers de relations d'interdépendances complexes à explorer

Le sujet est donc vaste et complexe, et de nombreuses inconnues subsistent encore sur un plan fonctionnel : quelles sont les relations trophiques à privilégier ? Y a-t-il des échelles spatiales plus pertinentes que d'autres selon les groupes d'auxiliaires, ou faut-il toutes les appréhender en même temps ? Cette complexité ne doit pas occulter le fait que le sujet est très prometteur. Les exemples de succès sont très nombreux, tant en grandes cultures qu'en cultures pérennes, et ils dominent les cas d'échec. Il apparaît clairement que tout est une question de relations très précises et relativement constantes dans leur nature, entre des végétaux (dont les cultures), des insectes phytophages et leurs ennemis. Cette constance des relations interspécifiques est orchestrée par des caractéristiques, elles mêmes constantes, morphologiques, phénologiques, biochimiques et physiologiques des végétaux d'une part et des insectes qui en dépendent ou qui dépendent de ces derniers d'autre part (il convient alors d'ajouter des caractéristiques éthologiques). Les caractéristiques de déplacement viennent s'ajouter en second lieu. Elles font l'objet de recherches très récentes relevant du domaine de l'écologie du paysage, et doivent, pour être pertinentes, intégrer ces relations trophiques. A terme, les connaissances permettront donc de mieux "piloter" les auxiliaires via des aménagements à base de végétaux, qui

pourraient favoriser concomitamment les pollinisateurs.

Un bémol doit toutefois être apporté concernant certains ravageurs contre lesquels il est difficile de lutter par cette approche. Il s'agit des ravageurs polyphages dont les ennemis naturels sont plus ou moins spécifiques. Ces ravageurs coriaces se développent dans presque tous les types de couverts végétaux alors que leurs ennemis arthropodes ont des exigences plus précises et donc plus difficiles à satisfaire. C'est le cas de nombreux ravageurs du sol comme les larves de taupins et de hannetons. Avec eux, il est très difficile d'adopter la double stratégie qui consiste à augmenter l'activité des auxiliaires (via des aménagements plus ou moins spécifiques) et parallèlement à limiter directement le développement des ravageurs par des végétaux répulsifs, des pièges ou la confusion sexuelle. La situation idéale étant lorsque le(s) même(s) végétaux permettent simultanément les deux.

Enfin des ravageurs pas réellement polyphages posent toutefois de plus en plus de problèmes, c'est le cas par exemple du méligèthe du colza (*Meligethes aeneus*). Les aménagements réalisés pour favoriser leur contrôle par des auxiliaires semblent peu efficaces. Il faudrait sans doute que ces aménagements (implantations de mélanges floraux), favorisant une grande variété d'auxiliaires, soient envisagés à un niveau régional, sur des surfaces assez importantes. En effet, il a été montré que le taux de parasitisme est naturellement plus important dans les parcelles de colza d'un paysage bocager que dans celles d'un paysage ouvert avec peu d'infrastructures écologiques. Dans tous les cas, il semble aussi nécessaire de raisonner l'assolement et les rotations au niveau de petites régions agricoles. n

Pour en savoir plus

Fiche technique ITAB : "Les auxiliaires communs en cultures légumières", bon de commande p.22

"Les auxiliaires entomophages", livre édité par l'ACTA (22,87€)

Le guide phytosanitaire de l'ACTA édité chaque année recense tous les organismes de lutte biologique et microbiologique commercialisés en France (www.acta.asso.fr).

Sous terre, la face cachée de la biodiversité fonctionnelle

Outre la protection des cultures et la pollinisation, un autre domaine est lui aussi très sensible à la diminution de la biodiversité dans les agroécosystèmes : le cycle des nutriments.

De lui, dépend étroitement la fertilité des sols...

Tout organisme vivant mobilise des éléments minéraux pour sa constitution et son fonctionnement. Il est tôt ou tard indispensable que la matière organique morte (nécromasse végétale et animale) et les déjections animales soient fragmentées pour que les molécules organiques simples (glucides, lipides, protéides) libèrent ensuite leurs éléments minéraux (carbone, azote, phosphore, magnésium...); cela permet à de nouvelles plantes de se développer, base de toute chaîne alimentaire.

Micro-organismes du sol : les parents pauvres des études sur la biodiversité

La microbiologie des sols est un domaine dont la complexité et l'importance sont proportionnelles au manque d'intérêt qui lui est accordé, sans doute du fait d'un déficit encore assez important de connaissances.

La microflore comprend des algues en surface, des champignons, des actinomycètes et bien sûr des bactéries.

- Les algues en surface sont peu abondantes, soit 100000/g de sol, mais fournissent néanmoins de la matière organique, certaines sont fixatrices d'azote.

- Les champignons (jusqu'à 1 à 2 t/ha en sols recevant peu ou pas de fongicides) participent à la stabilité structurale du sol de par leurs mycéliums. Ils sont quasiment les seuls organismes non animaux capables de dégrader la lignine et les hémicelluloses des résidus de cultures. Certaines espèces sont antagonistes de champignons pathogènes et de ravageurs du sol et enfin, rôle majeur, d'autres s'associent aux racines des plantes cultivées (à l'exception des Crucifères) pour les prolonger, augmenter ainsi le volume de sol prospecté et faciliter l'alimentation hydrique et l'assimilation de certains élé-

ments comme le phosphore en sols calcaires : les mycorhizes. Certaines espèces de mycorhizes aident même la plante à lutter contre des ravageurs ! Suite à une attaque au niveau des feuilles ou des racines, la colonisation des racines par ces mycorhizes est accélérée. Les racines synthétisent alors des alcaloïdes, qui à leur tour provoquent par la plante la synthèse de phytoalexines, intervenant dans son système immunitaire.

- Certaines espèces d'actinomycètes (environ 1t/ha) fixent l'azote de l'air. D'autres synthétisent des antibiotiques rendant alors les sols "suppressifs", c'est-à-dire naturellement capables d'éliminer certains pathogènes du sol. D'autres encore, thermophiles, sont responsables de la pasteurisation des déchets organiques lors du compostage.

- Le groupe des bactéries est le plus varié et le plus abondant (de 10 millions à 1 milliard/g de sol pour "une seule" tonne à l'ha). On y trouve surtout des espèces libres participant aux trois principales phases du recyclage : décomposition, humification et minéralisation, ou à la fixation de l'azote par les *Azotobacter*, mais aussi des espèces symbiotiques comme les *Rhizobium spp.* s'associant aux légumineuses.

Vers de terre « jardiniers de l'ombre » : un rôle central et fondamental

La microfaune, quant à elle, est essentiellement représentée par les amibes (de 100 à 300 kg/ha) dont la fonction essentielle est d'être de grandes prédatrices de bactéries. Quand un brin de paille tombe au sol, il est d'abord colonisé par les bactéries cellulolytiques dégradant la cellulose puis les amibes, en se nourrissant des bactéries, libèrent les fibres de lignine qui deviennent

alors accessibles aux champignons lignivores.

Il reste à parler de la mésofaune et notamment du rôle capital des vers de terre. Darwin, déjà, avait décrété qu'ils étaient les animaux les plus importants du monde de par leur biomasse égalant le poids de tous les autres animaux réunis, et de par leurs fonctions. Quelques chiffres les illustrent : les vers anéciques, ceux qui font "l'ascenseur" entre le sol profond et la surface, pèsent entre 1 et 4 t/ha, digèrent leur propre poids chaque jour soit 300 à 1000 t de terre/ha/an, ce qui représente une épaisseur de 3 à 10 cm. Ils trouent littéralement la terre de 400 à 500 mètres de galeries sous chaque m² de surface de prairie naturelle (ou d'une parcelle en semis direct sur sol toujours couvert et désherbé au rouleau), ce qui améliore son aération et donc son réchauffement au printemps ainsi que son activité biologique.

Pour terminer le tableau, on ajoutera :

- qu'ils rendent assimilables de nombreux minéraux (macro- et oligo-éléments). En Nouvelle-Zélande, un problème de carence en molybdène a été réglé par l'introduction d'espèces européennes capables de rendre assimilable une fraction du molybdène total ;

- que certaines espèces sécrètent par leur tégument des substances très proches de l'auxine, hormone naturelle de croissance des plantes, qui favorisent ainsi la croissance des racines ;

- que lorsque des vers de terre ingèrent des nématodes phytophages en même temps que la terre, ces nématodes entrent en contact, dans le tube digestif des vers, avec une bactérie qui produit de la tyrosine, un acide aminé essentiel qui détruit le système d'orientation des nématodes, ensuite incapables de se diriger vers les racines des plantes. n

Impact des pratiques culturales sur les populations d'arthropodes des sols de grandes cultures

Déterminer des espèces "bio-indicatrices"

Par Philippe Viaux et Virginie Rameil (ARVALIS-Institut du végétal*)

Pourquoi étudier les arthropodes dits du sol, c'est-à-dire qui vivent sur ou dans le sol, en grandes cultures ? Pourquoi se pencher sur les carabes, les staphylins ou les araignées ? D'abord parce que ces animaux sont utiles. Ensuite parce que l'importance globale de leur population, mais aussi leur diversité, sont des indicateurs de l'activité biologique du sol. Nous avons étudié différentes espèces d'arthropodes (carabes, araignées, staphylins, opilions et myriapodes) dans des systèmes de production plus ou moins intensifs (monoculture de blé, conventionnel, intégré, biologique...) et dans des jachères et haies. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des différences entre les systèmes. Ils permettent aussi de proposer des espèces "bio-indicatrices", c'est-à-dire dont il suffirait de compter les effectifs, au lieu de ceux de l'ensemble de la faune, pour évaluer le fonctionnement biologique et la biodiversité d'un sol. Ce sont les résultats de cinq années d'études qui sont présentés ici.

L'agriculture, par les liens particuliers qu'elle entretient avec la nature, joue un rôle fondamental sur la biodiversité. L'agriculture est à l'origine de la formation d'écosystèmes artificiellement simplifiés : les agro-écosystèmes. Ces agro-écosystèmes ont une durée de vie éphémère ponctuée par les interventions agricoles (récolte, travail du sol) et les applications de produits chimiques sont brutales vis-à-vis de la biodiversité.

Ces pratiques conduisent à une uniformisation de la végétation qui se résume alors à quelques espèces cultivées et une biodiversité sauvage restreinte. Ces écosystèmes sont fragiles et leur instabilité doit être maîtrisée pour que le meilleur équilibre adaptatif entre faune, flore et milieu puisse être atteint. L'enjeu de l'agriculture de demain est d'intégrer la dimension écologique dans ses pratiques tout en maintenant sa production.

À ce titre, les arthropodes (carabes, staphylins, araignées, opilions et myriapodes) sont particulièrement intéressants : l'étude de ces populations et la détermination d'indicateurs biolo-

giques doivent permettre de caractériser l'état des agro-écosystèmes et de mettre en évidence aussi précocement que possible des modifications naturelles ou liées aux activités humaines.

Ces arthropodes, de par leur vie au sol, sont directement exposés aux pratiques agricoles auxquelles ils sont sensibles ; de plus, ils occupent une place cruciale au sein de la chaîne alimentaire, prédateurs d'organismes phytophages (rôle d'auxiliaires), mais aussi proies de la faune avicole. Des études de comparaison des populations d'arthropodes dans différents systèmes culturaux doivent permettre de comprendre le rôle de ces auxiliaires dans les agro-écosystèmes et d'identifier les milieux et les pratiques agricoles les plus favorables (ou défavorables) à ces organismes.

Cinq années d'études ont ainsi été réalisées sur le dispositif expérimental des fermes de Boigneville (Essonne) qui comporte différents systèmes de production, ainsi que sur des parcelles d'agriculteurs à proximité de ce site. Le dispositif expérimental est exposé p.10.



ARVALIS-Institut du végétal

*L'araignée *Oedothorax apicatus* a été trouvée en abondance dans les parcelles de blé biologique.*

Ces cinq années ont permis d'étudier l'influence des cultures sur les arthropodes et de proposer des indicateurs agri-environnementaux.

Cinq années de résultats

Analyse qualitative

Nous pouvons constater que les zones de grandes cultures présentent une richesse spécifique relativement importante puisqu'il a été identifié 41 espèces

*Article paru dans *Phytoma* N° 570 avril 2004

Tableau 1 - Nombre d'espèces de carabes, d'araignées et de staphylinés récoltés sur les cinq années d'étude.

	1997	1998	2000	2001	2003	Total
Carabes	19	27	25	26	29	41
Araignées	ND	ND	18	18	26	31
Staphylinés	ND	ND	ND	13	12	14

ND = compté mais non déterminé à l'espèce

de carabes sur l'ensemble de l'étude, 31 espèces d'araignées sur les trois dernières années et 14 espèces de staphylinés les deux dernières années.

Le nombre d'espèces observées varie peu en général suivant l'année d'échantillonnage (tableau 1) mais les espèces présentes diffèrent d'une année sur l'autre, ce qui explique que le nombre total d'espèces observées est très supérieur au nombre de chaque année. Malgré tout, les espèces les plus abondantes (*Poecilus cupreus*, *Platysma vulgare*, *Anchomenus dorsalis*, *Ophonus rufipes*, *Harpalus affinis*... chez les carabes, et *Pardosa agrestis*, *Oedothorax apicatus*, *Erigone atra*... chez les araignées) se retrouvent tous les ans. Notons, de plus, que ces observations ont été réalisées en fin de printemps. Or nous avons constaté en 2003 lors d'observations effectuées à l'automne, que de nouvelles espèces étaient à ajouter à notre inventaire ; ces observations étant d'ailleurs en adéquation avec les données trouvées dans la bibliographie. Le tableau 2 présente la liste des espèces de carabes observées en 2003. On peut ainsi constater que les effectifs de certaines espèces sont élevés alors que pour d'autres espèces on n'a captu-

ré que quelques individus.

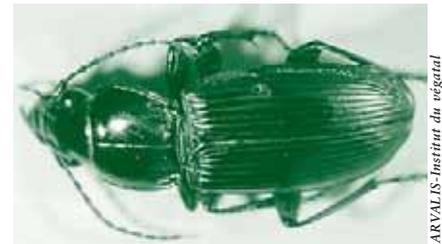
D'un côté, *Platysma vulgare* (37 % des carabes capturés) est l'espèce prédominante dans les parcelles en système intégré, conventionnel, dans la jachère de ray-grass et la haie. D'un autre côté, *Poecilus cupreus* (32 % des captures) prédomine dans les parcelles en système biologique et dans la jachère de sainfoin.

Pour les araignées (tableau 3), on constate que *Pardosa agrestis* domine le peuplement d'Arachnides avec 68 % des effectifs. Cette espèce est prédominante dans toutes les parcelles, sauf en blé biologique où *Oedothorax apicatus* représente 38 % des espèces capturées.

Analyse quantitative

Le nombre d'individus capturés est d'une manière générale extrêmement élevé. Par exemple plus de 3 000 individus ont été piégés en neuf semaines dans neuf pots pièges dans des parcelles "bio" en 2003, alors que, rappelons-le, les animaux tombent par hasard dans les pots.

Les différences entre années sont importantes. On observe par exemple environ deux fois plus de carabes en 1998 qu'en 1997, environ 5 fois plus d'araignées en 2001 qu'en 1997, ou



Platysma vulgare est parmi les carabes, l'espèce la plus souvent rencontrée sans cette étude.



Poecilus cupreus est une des espèces de carabes les plus souvent trouvées en 2003.

encore environ dix fois plus de staphylinés en 1998 qu'en 2001. Les différences constatées tant au niveau quantitatif que qualitatif sont sans doute, pour une part, dues aux conditions météorologiques de l'année. D'autre part, la variation des systèmes de production étudiés explique aussi cette variabilité inter-annuelle.

On constate en premier lieu que la biodiversité des arthropodes peut varier d'une année à l'autre dans un même agrosystème (tableau 4). Les différents systèmes de production ont une influence significative sur la densité des arthropodes capturés comme le montrent les résultats obtenus en 2003 (figure 1).

En effet, le système de production biologique est nettement favorable aux carabes, alors qu'ils sont moins présents dans le système intégré. La jachère implantée en ray-grass, et fauchée en bandes alternées, est favorable aux araignées ; elle l'est beaucoup moins pour les carabes qui sont gênés dans leur déplacement par la densité de la végétation. L'indice de Shannon est largement supérieur à 2 en système biologique alors qu'il atteint moins de 1,7 en système intégré.

En ce qui concerne l'équilibre biologique des différentes espèces d'arthropodes capturés, il est intéressant de souligner que le système de production biologique présente une meilleure équité des carabes (tendance vers une abondance équivalente des espèces, donc une meilleure diversité) que le système intégré.

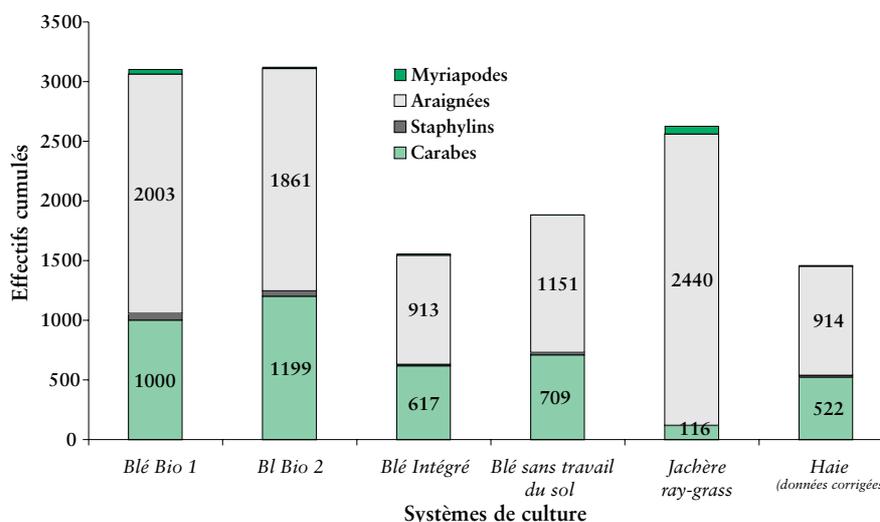


Figure 1 - Observations des effectifs cumulés par famille et par système pour l'année 2003 (9 pots pièges pendant 9 semaines).

La méthode employée sur le terrain pour arriver aux critères de densité des populations et de diversité des espèces

Sites expérimentaux

L'étude est menée dans l'Essonne (sud du Bassin Parisien), sur les communes de Maise et Boigneville. Le dispositif des fermes de Boigneville est installé depuis 1991 ; y sont étudiés des systèmes de production variant selon les pratiques culturales : conventionnel, intégré, sans travail du sol, biologique...

Dispositif

L'échantillonnage des arthropodes se fait par la technique des pots pièges (type Barber). Il s'agit d'un dispositif de piégeage passif, les captures résultent de l'activité des espèces et ne renseignent pas sur leurs abondances relatives. Cette méthode est utilisée pour la détermination des habitats préférentiels des espèces et l'étude de la diversité des peuplements.

Descriptif

Deux gobelets plastiques (diamètre 7 cm) sont enterrés au ras du sol ; un premier sert de moule, le deuxième, inséré dans le premier, contient la solution de piégeage. Celle-ci est un mélange non attractif à base d'eau, sel et mouillant qui permet de noyer les arthropodes piégés et de les conserver d'une semaine à l'autre. Les pots sont protégés de la pluie par une étiquette. Les points de prélèvement sont disposés de sorte qu'il n'y ait pas d'interaction entre pots. Le relevé des pots est hebdomadaire et continu sur une durée de huit à neuf semaines. Chaque semaine, le contenu de chaque pot piège est rincé puis transféré dans un pot en plastique contenant de l'alcool à 70°, assurant la conservation des arthropodes.

Comptage et détermination

On s'intéresse aux familles des Carabidés, Staphylinidés, Arachnides et Myriapodes : ces arthropodes sont comptés et déterminés au genre et à l'espèce à l'aide d'une loupe binoculaire.

Traitement des données

Les résultats obtenus font l'objet de diverses analyses statistiques réalisées avec le Service des études statistiques et méthodologiques d'ARVALIS Institut du végétal. Sont étudiés deux critères : la densité des populations (facteur quantitatif) et la diversité des espèces (facteur qualitatif).

La densité des populations

La densité des populations d'arthropodes est étudiée grâce à une analyse de variance. Cela permet de comparer les parcelles étudiées sur la base des populations d'arthropodes qui y sont rencontrées et ceci à différents niveaux taxonomiques : faible pour les familles d'individus telles que carabes ou araignées et plus élevé lorsque chaque espèce est étudiée en particulier.

Ainsi, l'analyse de variance nous informe sur les distributions des arthropodes, à savoir si celles-ci sont identiques entre les parcelles ou si au contraire elles révèlent des différences significatives. L'espace entre les pots étant suffisant pour qu'ils soient considérés indépendants, chacun représente une répétition de l'expérience. Les données sont traitées à l'aide des logiciels Statbox et SAS System.

La diversité des espèces

Des indices de diversité permettent d'étudier la diversité spécifique des parcelles. Sont ainsi calculés deux indices : l'un prenant en compte le nombre d'espèces rencontrées, l'autre mesurant leur répartition équitable. Ce sont l'indice de Shannon-Weaver et l'équitabilité.

Indice de Shannon-Weaver

La biodiversité de chaque parcelle est évaluée grâce à l'indice de Shannon-Weaver calculé ainsi :

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

Cet indice prend en compte la probabilité de rencontre d'un taxon sur une parcelle (p_i) et la richesse spécifique S (nombre d'espèces récoltées sur une parcelle).

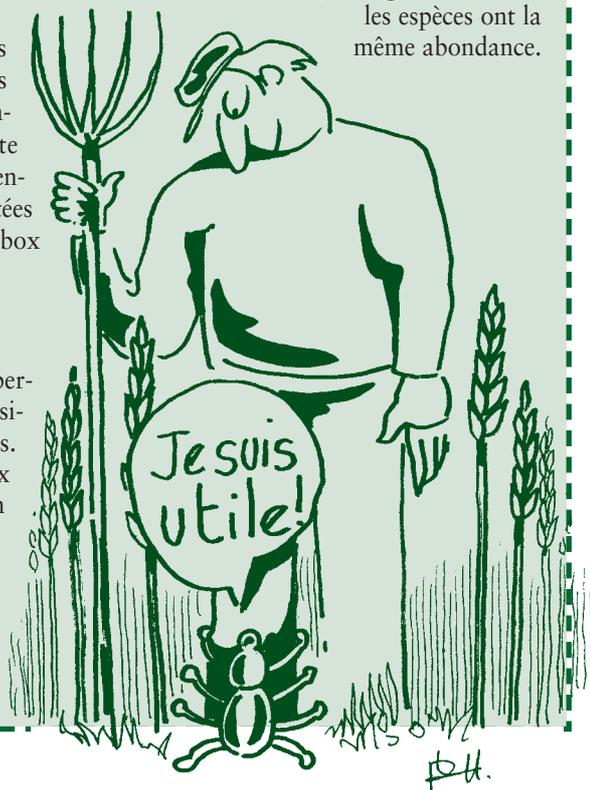
Note : la probabilité p_i est égale au nombre total d'individus de l'espèce i divisé par le nombre total d'individus de toutes les espèces récoltées sur la parcelle. L'indice de Shannon-Weaver est nul quand il n'y a qu'une seule espèce et sa valeur est maximale quand toutes les espèces ont la même abondance.

Équitabilité

L'équitabilité permet de comparer des peuplements comportant des nombres d'espèces différents avec comme objectif d'observer l'équilibre des populations présentes. Elle est égale au rapport entre la diversité réelle calculée et la diversité théorique maximum.

Soit : $E = H'/\log_2 S$

L'équitabilité tend vers 0 lorsqu'une espèce domine largement un peuplement ; elle égale 1 si toutes les espèces ont la même abondance.





ARVALIS-Institut du végétal

Pardosa agrestis : araignée prédominante dans toutes les parcelles sauf celles du blé biologique où *O. apicatus* est plus fréquente.

Des espèces bio-indicatrices ?

Compte tenu de la complexité de ces observations, il serait utile de disposer d'espèces repères (bio-indicatrices) permettant de caractériser un milieu sans faire une analyse exhaustive de la population d'arthropodes.

Dans cet esprit, deux familles d'araignées sont particulièrement intéressantes. Les Lycosidae, représentées essentiellement par deux espèces : *Pardosa agrestis* et *Alopecosa cuneata*, se révèlent comme bio-indicatrices des parcelles enherbées.

Les *Linyphiidae*, avec comme espèces *Oedothorax apicatus* et *Erigone atra*, sont indicatrices de pratiques favorables à la biodiversité (système biologique).

Nos observations réalisées ces dernières

années montrent que les araignées semblent être de meilleurs indicateurs que les carabes ou les staphylyns. On peut malheureusement constater dans la bibliographie que la majorité des observations d'arthropodes terrestres sont réalisées sur les carabes, les araignées étant plus difficiles à identifier à l'espèce.

Conclusion

L'importance des effectifs capturés et la diversité des espèces présentes nous confortent dans l'idée que le rôle des arthropodes terrestres des milieux cultivés est probablement important mais mal connu. Rappelons que la majorité des espèces rencontrées est carnivore et joue un rôle d'auxiliaire des cultures. Mais que consomment-elles exactement ? Quel rôle régulateur jouent-elles ? Ces questions restent à approfondir... Parallèlement, l'érosion de la biodiversité est un sujet de préoccupation majeur aujourd'hui (mise en place de Natura 2000, conditionnalité des aides PAC...). Il s'agit de préserver une ressource naturelle au même titre que les énergies non renouvelables. Alors quels moyens mettre en œuvre pour enrayer cette érosion ? Les solutions sont, là encore, mal connues, car peu étudiées jusqu'ici.

Nous avons mis en évidence une sensibilité des arthropodes au système de production, mais les différences entre systèmes sont subtiles et difficiles à expliquer. On peut conclure que le système biologique est favorable aux populations d'arthropodes, tant au niveau de leur biodiversité qu'au niveau de leurs effectifs. Néanmoins, il n'est pas possible, en l'état du travail réalisé, de préciser quels sont précisément les facteurs de production expliquant cette différence.

D'autres études des arthropodes dans les systèmes de production en grandes cultures doivent permettre d'avoir une vision globale de l'importance du maintien de la biodiversité au sein d'une agriculture durable. De nouveaux travaux seront nécessaires pour compléter les informations recueillies ces dernières années ; ils permettront notamment de confirmer les indicateurs identifiés. ■

En effet, sur les cinq années d'étude, l'équitabilité moyenne est de 0,60 pour le système biologique alors qu'elle n'est que de 0,44 pour le système intégré (tableau 4).

Tableau 2 - Espèces et effectifs de carabes observés en 2003 dans les différents systèmes.

ESPÈCES	PARCELLES						HAIE
	Bio1	Bio2	Intégré	Conv.	Ray-grass	Sainfoin	
<i>Anchomenus dorsalis</i>	40	85	22	9	3	17	14
<i>Amara aenea</i>	3	12	0	0	1	5	6
<i>Amara ovata</i>	0	5	0	0	1	3	5
<i>Argutor sternus</i>	0	0	0	0	1	0	0
<i>Asaphidion flavipes</i>	0	1	0	0	0	0	0
<i>Badister sodalis</i>	0	2	0	0	1	2	1
<i>Bembidion sp.</i>	2	5	2	0	2	1	3
<i>Brachinus crepitans</i>	0	0	0	0	0	2	0
<i>Brachinus sclopeta</i>	1	0	0	0	0	0	0
<i>Calathus fuscipes</i>	0	0	1	1	3	0	6
<i>Calathus melanocephalus</i>	2	0	1	0	0	0	0
<i>Callistus lunatus</i>	0	0	0	0	0	3	0
<i>Cyrtototus aulicus</i>	0	0	0	0	0	0	1
<i>Demetrias atricapillus</i>	1	7	2	0	0	0	0
<i>Dromius quadrillum</i>	20	10	1	0	1	1	0
<i>Harpalus affinis</i>	1	78	50	9	8	4	77
<i>Harpalus serripes</i>	1	2	10	0	2	0	16
<i>Loricera pilicornis</i>	0	6	0	0	0	0	0
<i>Metallina lampros</i>	6	15	5	0	9	18	5
<i>Nebria brevicollis</i>	63	49	3	3	0	3	2
<i>Notiophilus biguttatus</i>	1	1	4	4	1	1	5
<i>Ophonus azureus</i>	2	0	0	0	2	1	3
<i>Ophonus rufipes</i>	287	149	4	4	1	27	5
<i>Ophonus sp.</i>	0	0	0	0	0	1	0
<i>Platysma vulgare</i>	192	324	408	391	53	14	168
<i>Poecilus cupreus</i>	373	442	104	288	27	76	31
<i>Synuchus nivalis</i>	1	0	0	0	0	0	0
<i>Trechus quadristriatus</i>	3	6	0	0	0	0	0
<i>Zabrus tenebrioides</i>	1	0	0	0	0	0	0
Total	1000	1199	617	709	116	179	348

Tableau 4 - Biodiversité des carabes dans les différents systèmes de production sur les cinq années d'étude.

Système	Intégré					Biologique	
	1997	1998	2000	2001	2003	2001	2003
Indice de Shannon-Weaver	1,25	1,56	1,27	1,24	1,68	2,40	2,42
Équitabilité	0,49	0,52	0,40	0,36	0,44	0,63	0,58

LA CARIE DU BLE

INTRODUCTION – LA CARIE COMMUNE DU BLE : COMMENT Y FAIRE FACE ?

On semble noter une recrudescence de la carie du blé en France, particulièrement en agriculture biologique où le traitement des semences n'est pas possible. La contamination se fait soit par la semence, soit par le sol (lorsque le spore du champignon s'y est déposé), avec une vitesse de multiplication d'une année sur l'autre spectaculaire. Une vigilance particulière est recommandée aux agriculteurs pour limiter son expansion ; l'ITAB va diffuser une fiche technique formulant des préconisations. Aujourd'hui aucun moyen de lutte efficace n'étant connu en bio, la mise en œuvre d'un programme de recherche devient urgente.

COMMUNICATIONS ORALES

- **Potentialités de la lutte biologique par conservation et gestion des habitats en grandes cultures** (*Jean-Pierre Sarthou, ENSA Toulouse*)
- **Biologie des champignons *Tilletia caries* et *Tilletia foetida*** (*Daniel Caron, Arvalis Institut du végétal*)
- **Etat des lieux des connaissances : préconisations, pistes de recherche** (*Laurence Fontaine, ITAB*)

INFORMATIONS SUPPLEMENTAIRES

- Bernard Seguin, 2002. *La carie en production de semences de céréales bio : la lutte préventive s'impose*, Bulletin Semences.
- Bernard Seguin, 2003. *Agriculture biologique et production de blé tendre : une vigilance à l'égard de la carie*, Alter Agri n° , p.4-5
- Guy Raynal, 1997. *Les caries du blé : des maladies dont il faut toujours se méfier*, Phytoma LDV n°492, p.14-16.

Bibliographie étrangère : voir informations sur <http://orgprints.org/>

LA CARIE

Daniel CARON

ARVALIS – Institut du végétal, Génétique et Protection des Plantes – Laboratoire
6, chemin Côte Vieille - 31450 Baziège
d.caron@arvalisinstitutduvegetal.fr

8 PRESENTATION

Les agents responsables de la carie en France sont identifiés au nombre de 2, voire exceptionnellement 3 espèces de Basidiomycètes de la famille des Tillétiacées appartenant au genre *Tilletia*. Dans nos régions, les espèces de cette famille n'attaquent que des Graminées et la carie est connue depuis l'antiquité comme altération ou maladie du blé. Les autres cultures de céréales sont moins affectées mais il ne faudrait pas les négliger. Visuellement, selon l'aspect des plantes on distingue deux types de caries : la carie commune et la carie naine en fonction du degré de raccourcissement.

La carie commune est provoquée par deux espèces qui conduisent à des symptômes identiques :

- Fréquente : *Tilletia caries* (syn.⁽¹⁾ *Tilletia tritici*).
- Éparse : *Tilletia foetida* (syn.⁽¹⁾ *Tilletia laevis*).

La carie naine s'extériorisant par un nanisme plus prononcé est provoquée par :

- *Tilletia controversa* (syn.⁽³⁾ *Tilletia brevifaciens*), très rare.

Les régions de prédilection de ces 3 espèces sont fonction du climat et notamment de la température. En France on rencontre fréquemment sur l'ensemble du territoire *T. caries*, mais comme le pays est situé dans une zone tempérée soumise à des fluctuations annuelles ou périodiques, la répartition géographique des 3 parasites se superpose. *T. foetida* qui est un parasite des climats plus chauds se trouve surtout en zone méditerranéenne mais il est aussi observé jusque dans le Nord de la France avec une moindre fréquence. *T. controversa* parasite des pays froids s'observe très rarement et est localisé dans les zones d'altitude moyennes, régulièrement enneigées.

La carie commune due à *T. caries* se caractérise par un pouvoir d'extension très élevé de la maladie d'une génération à la suivante, par dissémination des spores sur les grains. Un semis de blé provenant de semences d'un champ comportant 1 % d'épis cariés (1 % de pertes de rendement) a développé plus de 60 % d'épis cariés (60 % de pertes, sans compter l'odeur et l'aspect des grains non atteints).

Il existe d'autres caries qui ne se trouvent pas en France mais dans des pays plus ou moins proches et qui peuvent inquiéter. Nous les citerons pour mémoire :

La carie de Karnal est due à *T. indica* (syn. *Neovossia indica*). Elle est déclarée parasite de quarantaine en France et dans beaucoup d'autres pays car le cycle du champignon, différent de celui de la carie commune, ne permet pas de lutter efficacement contre la maladie par traitement des semences. Cette dangereuse maladie est localisée du Nord du Moyen Orient à l'Inde ainsi que dans certains pays d'Amérique Centrale. Elle n'existe pas en France.

Une carie du seigle a été fréquemment observée en Europe centrale et en Europe de l'Est : *T. secalis* qui affecte aussi le triticales. L'agent pathogène est très proche de *T. caries* ou bien un pathotype de cette espèce.

³ Les synonymes correspondent à un nom abandonné en fonction de l'évolution de la classification, justifiée par des observations plus précises ou des expériences permettant de mieux définir les espèces. Le nom synonyme est souvent l'avant dernier nom qui se retrouve fréquemment dans la littérature scientifique et qui garde par conséquent une certaine utilité dans les recherches bibliographiques. Il existe en général plusieurs synonymes, mais on n'en cite souvent qu'un seul, par ordre de priorité.

Sur Orge, il existe aussi une carie en Europe Centrale : *T. panicii* très proche de *T. caries* ou bien un pathotype de cette espèce différencié par la coloration des spores et leur réticulation.

Une carie s'attaque au riz : *T. horrida* (proche de *T. indica*) en Extrême Orient, en Asie du Sud-Est et en Amérique (parfois trouvé comme contaminant de semences de blé).

Et enfin, quelques autres caries existent aussi sur les graminées sauvages comme *T. walkeri* sur ray-grass (parfois trouvé comme contaminant de semences de blé), *T. barclayana* sur poacées comme *Panicum* et *Paspalum*, *T. eragrostidis* sur *Eragrostis*, *T. inolens* sur *Lachnagrostis filiformis*, *T. rugispora* sur *Paspalum*, *T. boutelouae* sur *Bouteloua gracilis*, dont les spores pourraient être confondues avec *T. indica* (1961, 1998) et d'autres encore sur : *Hordeum*, *Lolium*, *Holcus*... mais elles ne sont pas censées attaquer le blé naturellement. Reste à savoir si elles sont présentes en France. Assurément, l'une d'elle *T. guyotiana* a été trouvée sur brome dans l'Aube en 1900...

9 SYMPTOMES

Les blés atteints de carie commune passent pratiquement inaperçus avant l'épiaison. Il faut observer attentivement la végétation pour détecter un léger raccourcissement des plantes accompagné par une augmentation du tallage avec des brins mous, des épis grêles ou stériles abaissant le nombre de tiges épiées par pied. Bien que souvent faible, le raccourcissement est fonction des races de *T. caries* et de la variété atteinte. Il peut parfois dépasser 30 % avec diminution du nombre d'entre-nœuds. *T. foetida* semble moins affecter les plantes.

Le nanisme de la carie naine (*T. controversa*) est beaucoup plus prononcé et accompagné d'un tallage excessif. La taille des plantes peut avoisiner 1/4 à 1/2 de la taille normale.

À l'épiaison les symptômes sont bien établis et selon les variétés une coloration bleu-verdâtre (glauque) peut marquer les feuilles et les gaines. Sur les épis cette coloration glauque est plus visible.

Les épis cariés épiant un peu avant les plantes saines mais gardent plus longtemps leur coloration vert glauque et semblent présenter un retard au moment de la maturation. Cette coloration est présente sur toutes les parties de l'épi et se manifeste plus particulièrement sur le rachis et la base des glumes.

Les épis cariés sont déformés par rapport aux épis sains. L'épi est différent en longueur des épis sains : il est souvent plus court mais selon les conditions, il peut aussi être plus long. Au début les glumes sont plaquées sur le rachis et l'épi semble aplati. Au fur et à mesure du développement du parasite, les glumes se redressent et s'écartent anormalement pour finir par donner à l'épi un aspect ébouriffé caractéristique qui laisse apercevoir les grains malades. Pratiquement tous les grains de l'épi sont atteints.

Le mycélium du champignon atteint les ovaires et les remplacent. Sous le péricarpe, le mycélium croît à la place des cellules du grain qui prend une teinte olivâtre. Les grains cariés sont plus courts et plus arrondis que les grains sains. Le mycélium qui remplit le grain se fragmente en spores rondes (teliospores) qui brunissent et foncent. À la récolte les grains cariés sont très légers, trapus à la base, bruns gris et ridés, leur sillon est à peine visible. Ils s'écrasent à la moindre pression en libérant une poussière de spores noires qui va contaminer les grains sains au battage. Si la contamination des grains sains dépasse 6000 à 8000 spores, les grains prennent une teinte noirâtre au niveau de la brosse et du sillon. Ce sont des grains boutés qui peuvent porter plusieurs centaines de milliers de spores. Les spores sont aussi disséminées dans l'air et vont contaminer le sol sur plusieurs centaines de mètres.

À noter que les grains cariés par *T. controversa* sont plus durs et plus difficiles à écraser. Ils ne donnent pas d'amas pulvérulents de spores.

Les grains cariés et les grains boutés par la carie commune ont une odeur caractéristique de poisson avarié due à la présence d'amines volatiles dont la triméthylamine. Cette odeur est plus ou moins importante selon les souches de carie et les lots.

10 IDENTIFICATION DU PARASITE

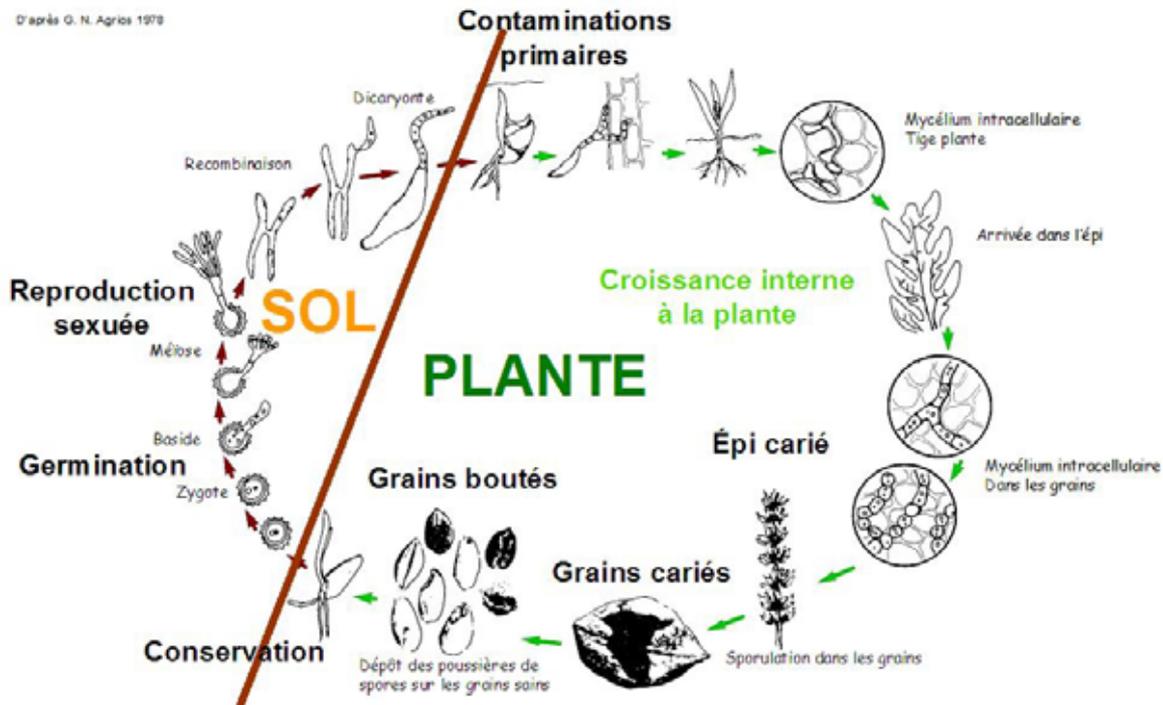
Bien que les symptômes de *T. caries* et de *T. foetida* soient identiques, les spores présentent des distinctions. La surface des spores de *T. caries* présente une ornementation réticulée alors que celle des spores de *T. foetida* est lisse. L'intensité de la réticulation est fonction des races physiologiques. Pour les 2 espèces, les spores sont sphériques à ovoïdes avec un diamètre de 15 à 23 µm pour *T. caries* et de 17 à 22 µm pour *T. foetida*. Des hybrides de *T. caries* et de *T. foetida* ont été réalisés et donnent des spores de type *foetida*.

T. controversa se distingue par le nanisme qu'elle provoque, sinon les spores sont pratiquement identiques à celles de *T. caries* quoiqu'un peu plus foncées.

Des analyses PCR (amplification génique) sont aussi possibles pour l'identification.

11 PROPAGATION ET EVOLUTION DE LA MALADIE

11.1 Le cycle du champignon



11.2 Implantation de la maladie à l'automne

11.2.1 Par les semences dans le sol

Les spores portées par les semences constituent la voie la plus directe, à l'origine des contaminations les plus massives. Cette pollution des semences localise les spores au contact de la plante mais n'évite pas le temps nécessaire à la reproduction sexuée du champignon avec méiose puis recombinaison sexuée de 2 sporidies haploïdes compatibles. Cette phase doit avoir obligatoirement lieu pour aboutir à un mycélium dicaryote prêt pour la contamination du coléoptile lors de son émergence à la surface du sol.

À signaler que *T. controversa* ne se transmet pas par la pollution des semences car les amas de spores ne sont pas pulvérulents et les spores ne germent pas à la mise en terre. Un certain temps de séjour dans le sol est nécessaire. Les contaminations n'auront lieu qu'au retour du blé suivant par le sol pollué l'année précédente avec les fragments de grains cariés tombés à terre.

11.2.2 Par le sol

Les spores en provenance des épis cariés dispersés lors de la récolte se répandent au sol. Ils peuvent s'y conserver au moins 5 ans pour *T. caries* en fonction de l'humidité et plus de 10 ans pour *T. controversa*.

Les sols tassés gênent la germination de *T. caries* car l'oxygène est nécessaire. Par contre *T. controversa* germe mieux en sols compacts ou roulés car ses exigences en oxygène sont très faibles.

Le processus de germination et de reproduction sexuée est nécessaire pour aboutir à la contamination des coleoptiles.

11.3 Stades de sensibilité de la plante

Après le stade 2 feuilles les plantes ne peuvent pratiquement plus être contaminées. L'infection ressemble donc à une course entre la plante et le parasite avec les températures pour en déterminer l'issue. Il faut au parasite accumuler une certaine somme de température pour germer et des températures fraîches sont plus favorables à la germination du parasite qu'à la croissance des plantes. Plus le temps qui sépare le semis du stade 2 feuilles sera long, plus le risque sera élevé. Les semis tardifs sont toujours plus contaminés que les semis précoces d'automne ou les semis de printemps.

11.4 Au printemps, évolution systémique de la maladie

Le mycélium suit la progression de l'épi à l'intérieur des plantes au cours de la croissance du blé. C'est une maladie systémique qui progresse dans le végétal sans symptôme. Après l'épiaison le mycélium pénètre dans les ovaires et produit ses spores à la place des grains. Elles seront dispersées à la récolte.

11.5 Conservation de l'inoculum après récolte

11.5.1 Sol

Les spores vont germer à la faveur d'épisodes climatiques humides et en fonction des températures respectives de chaque espèce. Le stock de spores va ainsi s'épuiser progressivement. Par conséquent les étés secs conservent un plus grand nombre de spores prêtes à provoquer des contaminations en automne. Des expériences récentes montrent que les spores se conservent au moins 5 ans dans le sol et d'autres plus anciennes montrent qu'au sec dans les greniers *T. caries* peut survivre 12 ans.

11.5.2 Semences

Les spores ne sont pas internes aux semences mais situées à la surface dans le sillon ou la brosse. Elles y survivront plus longtemps que la semence elle-même.

12 CONDITIONS DE DEVELOPPEMENT DES PARASITES

12.1 Les facteurs climatiques

Pour la carie commune, *T. caries* germe avec un optimum à 11°C entre 2° et 29°. L'optimum d'humidité des sols est comprise entre 40 et 50 % de leur pouvoir de rétention en eau. Un pH légèrement alcalin est favorable.

T. foetida germe avec un optimum de température compris entre 15 à 20°C.

Par contre la carie naine *T. controversa* a un optimum de germination de 2 à 6°C et d'infection de 2 à 8°C.

12.2 Les facteurs agronomiques

12.2.1 Les dates de semis précoces sont défavorables à la carie

12.2.2 Le travail du sol influence les contaminations

Le labour profond la première année de l'infection place l'inoculum en situation défavorable à la contamination des coléptiles. S'il est suivi d'un nouveau labour, les spores reviennent en surface où elles peuvent provoquer les contaminations. Par contre, s'il est suivi d'un travail superficiel, les spores restent au fond.

Les sols tassés ou roulés peu riches en oxygène sont défavorables aux contaminations de la carie commune (pas de la carie naine).

12.2.3 Les races physiologiques variétés, cultures et adventices hôtes

Des souches de *T. caries* ont montré des pouvoirs pathogènes différents (10 à 88 %). Il en est de même pour *T. foetida*.

Avant l'utilisation des fongicides en traitement de semences, les races physiologiques ont été étudiées pour la sélection des variétés résistantes. Cette pratique a été abandonnée et actuellement nous ne connaissons pas les races présentes sur le territoire français et leur importance.

Expérimentalement *T. caries* a pu être transmis au seigle ou à d'autres graminées mais avec un très faible succès qui n'en fait pas un problème économique.

ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES SUR LA CARIE COMMUNE : PRECONISATIONS, PISTES DE RECHERCHE

Laurence FONTAINE

ITAB, 9 rue André Brouard – BP 70510

49105 ANGERS CEDEX 02

laurence.fontaine@itab.asso.fr

INTRODUCTION

La carie commune du blé (*Tilletia caries* ou *Tilletia foetida*) était une maladie courante jusqu'aux années cinquante. La pratique de désinfection des semences par lutte chimique l'a réduite à un état de bruit de fond. Aujourd'hui la maladie semble en nette recrudescence, particulièrement en agriculture biologique, sans doute en lien avec l'obligation d'utilisation de semences biologiques donc non traitées chimiquement. Le pouvoir de propagation de la maladie est extrêmement important, ce qui en fait un risque majeur en agriculture biologique. Le blé tendre est concerné, mais également ses apparentés, à des degrés divers : épeautre, engrain, blé dur, triticale. La vigilance à l'égard de la culture des céréales biologiques s'impose.

L'objet de ce texte est de faire le point, en complément à la communication de Daniel Caron, sur les précautions à prendre pour éviter la propagation de la carie commune et sur les pistes de recherche actuellement explorées pour la maîtriser.

13 UN PEU D'HISTOIRE

Les Anciens avaient remarqué que certains organes végétaux pouvaient souffrir d'altérations profondes et putrides ; sous le nom de caries le naturaliste latin Pline l'Ancien (23-79) décrit à la fois les cavités qui se forment dans le tronc des arbres et la pourriture qui détruit les semences des céréales.

Vers le milieu du XVIIIe siècle, le naturaliste Tillet étudie la redoutable carie du blé en Picardie ; il préconise le «chaulage» des grains (passage à la chaux) pour lutter contre le mal. Au début du XIXe siècle, Bénédict Prévost conseille le «sulfatage» de la semence (immersion dans une solution diluée de sulfate de cuivre), pour protéger le blé de la carie. A l'époque, observer des parcelles cariées à 50% était, semble-t-il, courant et, jusqu'aux années cinquante, la carie était considérée comme la principale maladie du blé.

14 UN TRES GRAND POUVOIR DE CONTAMINATION

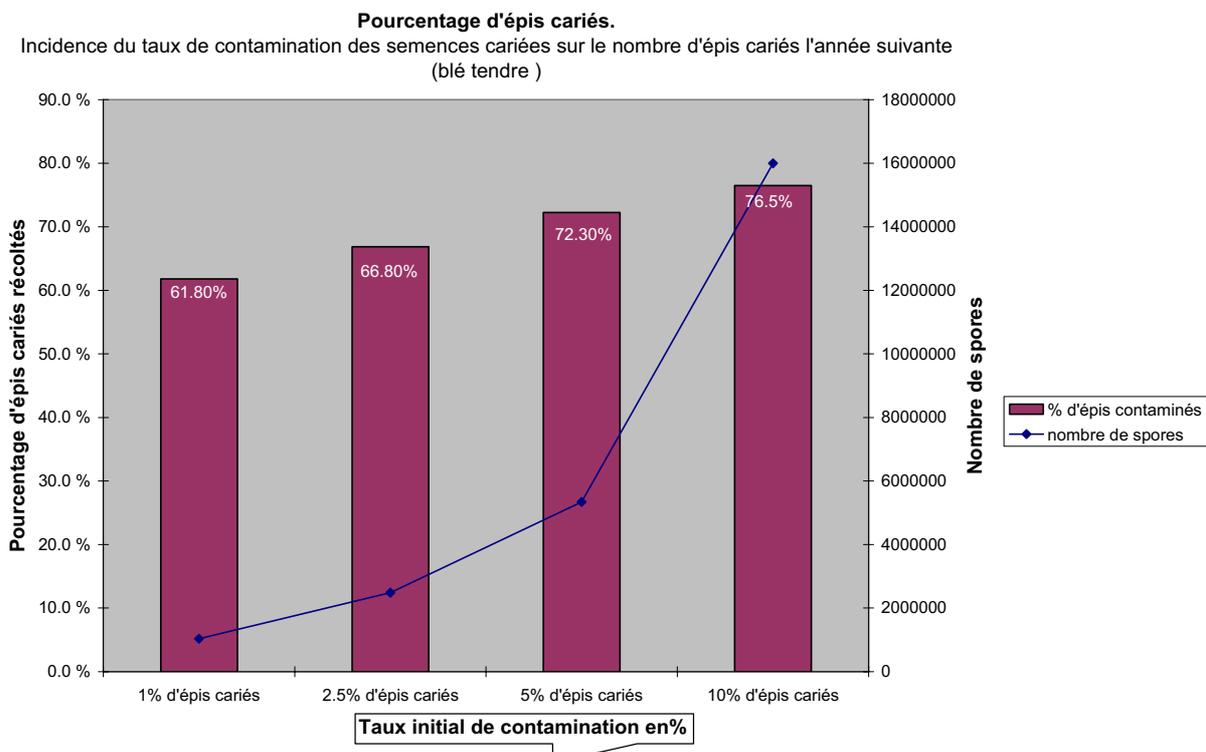
Un grain carié peut contenir jusqu'à 9 millions de spores. Au battage, les grains des épis cariés libèrent ces spores qui viennent contaminer les grains des épis sains et le sol qui a supporté cette récolte cariée.

Si la contamination des grains sains dépasse 6 000 à 8 000 spores, les grains prennent une teinte noirâtre au niveau de la brosse et du sillon. Ce sont les grains boutés, qui peuvent porter jusqu'à plusieurs centaines de milliers de spores.

Les spores peuvent être aussi disséminées par le vent sur plusieurs centaines de mètres, et être ainsi à l'origine de la pollution des parcelles voisines, au-delà du sol de la parcelle récoltée. Les moissonneuses-batteuses participent aussi à la dissémination des spores, ainsi que toute surface ayant été en contact avec des grains cariés (sacs, cellules de stockage, etc.).

La carie se caractérise par son très fort pouvoir de propagation ; c'est d'ailleurs ce qui la rend particulièrement inquiétante en agriculture biologique : son expansion peut être très large si aucune précaution n'est prise.

Une expérimentation réalisée par ARVALIS-Institut du végétal lors de campagne 2002/2003 a permis de mettre en évidence à partir du pourcentage d'épis cariés dans une parcelle l'année N, le risque couru par l'agriculteur, en l'absence de traitement de semence, l'année suivante N+1 (figure ci-dessous). Un très faible taux de contamination initial, par exemple 1% d'épis cariés, peut se traduire l'année suivante (après utilisation de la récolte comme semences) par un niveau d'attaque se situant à 61,8% d'épis ! L'expérimentation est à relativiser suivant les conditions de culture, mais elle exprime le fort potentiel de contamination de la carie.



15 LES CONSEQUENCES DE LA PRESENCE DE CARIE COMMUNE

La carie commune peut avoir de lourdes incidences sur la quantité et surtout la qualité de la récolte, sur l'état sanitaire des parcelles de l'exploitation et même sur leur environnement. Plus le taux de contamination sera élevé, plus les conséquences seront fortes.

D'un point de vue quantitatif, le rendement total d'une parcelle peut être plus ou moins pénalisé, en lien avec le taux de grains cariés (ils s'écrasent au battage).

En termes de qualité, très peu d'épis cariés (on parle de 0,1%) peuvent suffire à dégager une odeur de poisson pourri qui rend le grain impropre à la commercialisation (odeur due à la présence de triméthylamine). Les spores ne sont *a priori* pas toxiques, mais l'odeur se transmettant à la farine, il est clair que la meunerie refuse les lots. Côté alimentation animale, les lots malodorants sont refusés, outre des raisons sanitaires évidentes, par peur de baisse de l'appétence.

Attention, l'absence d'odeur ne signifie pas l'absence de spores ; si la présence de carie est avérée, les lots sont refusés pour raisons sanitaires et limiter la propagation de la maladie.

En production de semences, la présence de carie est évidemment rédhibitoire, quel que soit le taux de contamination, que l'odeur de poisson pourri soit perceptible ou non. A noter qu'aucune réglementation n'existe en la matière en France à ce jour, y compris pour les semences certifiées, mais des analyses d'échantillons systématiques sont préconisées étant donné les risques.

16 COMMENT DETECTER LA PRESENCE DE CARIE ?

16.1 Les signes de reconnaissance

Un œil avisé pourra détecter la présence des épis cariés dans un champ au moment du remplissage du grain par la couleur vert foncé des glumes et glumelles, ainsi que par l'aspect « ébouriffé » caractéristique des épis touchés (les épillets s'écartent du rachis).



Epi carié à gauche, plus petit et de couleur bleutée par rapport à un épi sain, à droite (© ARVALIS-Institut du végétal)



Epi carié à gauche avec aspect ébouriffé, les grains gonflés écartant les glumelles, et épi sain à droite (© ARVALIS-Institut du végétal)

Mais c'est le plus souvent au moment du battage que l'on détecte la carie : seul le contenu du grain est transformé en une masse poudreuse noirâtre et malodorante, les spores du champignon ; les grains cariés (de couleur différente, plus ronds, avec une ébauche de sillon sur leur face dorsale, appelés également balles sporifères) sont fragiles et éclatent facilement sous pression, notamment à la récolte. Un nuage noir au battage est caractéristique de blés fortement cariés.

Autre signe de reconnaissance à la récolte : l'odeur de poisson pourri dégagée par les spores. Attention cependant, les observations sur le terrain montre que celle-ci n'est pas systématique (liée à la variabilité des espèces et des races physiologiques de caries), notamment en cas de contamination modérée. Dans ce cas, malgré l'absence d'odeur, les risques de contamination pour les campagnes suivantes sont présents et très importants, soit par utilisation des grains en semence fermière, soit par le sol.

Au moindre doute, la recherche de grains cariés est donc préconisée. Une première approche peut être réalisée à la ferme par la « méthode du seau », mais seule une recherche de spores en laboratoire apportera des certitudes sur le niveau de contamination, et donc sur les mesures à prendre en conséquence.

« Méthode du seau »

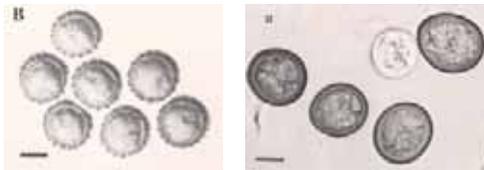
Mettre 5 kg de céréales dans un seau rempli d'eau. Brassier et récupérer les grains qui surnagent. Répéter ce brassage jusqu'à ce qu'aucun grain ne remonte à la surface. Observer ensuite un par un les grains surnageant récupérés et déterminer s'ils sont cariés ou non (grains bombés remplis de poussière noire).

Attention, cette technique permet de détecter des grains cariés, mais pas une contamination exogène (résidus de spores issus d'un silo mal nettoyé, de la moissonneuse batteuse, etc).

16.2 Méthode de détection de la carie en laboratoire

La détection de la carie sur céréales est effectuée soit par filtration et récupération des spores par lavage du filtre, soit par prélèvements de l'eau de lavage des semences ; l'analyse est réalisée sur 50 grammes de semences (environ 1000 grains). Dans les deux cas les semences sont agitées dans de l'eau additionnée d'un mouillant pour mettre les spores en suspension. L'observation au microscope permet ensuite d'identifier l'espèce de carie suivant la taille et la forme des spores et de compter le nombre de spores.

La méthode par prélèvements est celle utilisée par la Station Nationale d'Essais de Semences (SNES) : 10 prélèvements sont effectués et placés sur un hématimètre (quadrillage) pour déterminer au microscope la concentration en spores par millilitres de solution. La concentration moyenne des 10 prélèvements est alors convertie en nombre de spores par gramme de semences, puis en nombre de spores par grain. Avec cette méthode, le seuil de détection est de 5 spores par grain. Coût indicatif : de l'ordre de 50 à 75 € HT.



Spores de Tilletia caries (à gauche) et Tilletia foetida (à droite). Source : T. Matsumoto and T. Bell, Laboratory Guide To SMUT FUNGI.

Il est difficile de donner une correspondance entre pourcentage d'épis cariés et nombre de spores comptées par grain. Ce dernier est en effet très variable selon :

- le nombre de spores initialement produit par chaque grain carié (la taille du grain notamment peut jouer ; l'ordre de grandeur est de plusieurs millions),
- les conditions climatiques lors du battage (humidité, vent, ...),
- la variété, qui influence la taille du grain et la forme du sillon, et donc la réceptivité du grain.

A titre d'exemple, on peut citer une mesure faite par Arvalis-Institut du végétal lors de suivi d'essais en parcelle cariée : 730 spores/grains ont été mesurées pour une contamination à hauteur de 1,5% d'épis cariés. Or il faut rappeler que 1% d'épis cariés à la récolte suffisent pour obtenir une contamination de l'ordre de 60% d'épis cariés à la campagne suivante si la récolte est utilisée en semences (Source Arvalis-Institut du végétal).

A titre d'information, des recherches menées en Allemagne concluent que dès le seuil de 5 à 10 spores/grain, la maladie est transmissible par les semences pour les variétés les plus sensibles si aucune précaution n'est prise ; au-delà de 20 spores/grain, le risque de transmission par les semences est très élevé quelle que soit la variété ; des mesures doivent donc être prises dès 5 spores/grain (autrement dit au seuil de détection...).

17 LES MOYENS DE LUTTE

17.1 Les précautions à prendre à la récolte

- Récolter la parcelle cariée en dernier.
- A la récolte, faire tourner le cylindre (bateur) à basse vitesse et en ouvrant le contre-bateur, de manière à minimiser le nombre de balles sporifères qui éclatent pendant la récolte ; faire fonctionner les ventilateurs de nettoyage à haute vitesse afin de souffler autant de balles sporifères et de spores de carie vers l'arrière de la moissonneuse-batteuse.

- Stocker dans des installations offrant une grande capacité d'aération. Aérer les grains pour diminuer l'odeur. Les manipuler délicatement au moment de les retirer de la cellule de stockage pour éviter de provoquer l'éclatement des balles sporifères. Privilégier les transporteurs à courroie au détriment des vis de chargement ; on peut aussi manipuler les grains par aspiration, ce qui permet souvent de les débarrasser des balles sporifères restantes et de conserver les grains non cariés.
- Après la récolte et les manipulations, nettoyer soigneusement tout le matériel.

Les lots cariés, non commercialisables, doivent être détruits (incinération). Néanmoins, en cas de contamination modérée, il est toujours possible de nettoyer voire laver les lots contaminés, ce qui peut être coûteux et fastidieux, mais cela peut permettre de « récupérer » une récolte, surtout en cas de valorisation à la ferme en consommation animale (et non pour être semée).

Le grain carié, plus léger, part bien à l'aspiration avec un nettoyeur séparateur. Plusieurs passages peuvent être nécessaires. Le peu d'écart de taille entre les grains cariés et non cariés rend par contre très difficile un tri avec des grilles.

Le brossage des grains (par exemple avec une brosseuse à blé de moulin) permet de diminuer la quantité de spores présentes (bien laver la brosse ensuite).

Enfin le lavage des grains à l'eau est très efficace : on enlève les balles sporifères qui surnagent ; les spores accrochées au grain partent avec l'eau. Attention à ne pas vider n'importe où l'eau de lavage. La condition est de pouvoir faire sécher les grains correctement ; la démarche est donc *a priori* réservée à de petites quantités. On peut aussi les utiliser de suite (à noter alors qu'un blé trempé dans l'eau et égoutté immédiatement prend environ deux points d'humidité).

17.2 Les préconisations au moment du semis

- Ne jamais semer de grains contaminés par des spores de carie.
 - En cas de doute sur des semences de ferme, faire pratiquer un test de détection par un laboratoire compétent. Ne pas semer le lot dès lors que la carie est détectée, quelque soit le niveau de contamination.
 - Les semences certifiées font en principe l'objet d'analyses sanitaires, et offrent une sécurité vis-à-vis de la carie.
- Respecter un minimum de rotation des cultures.
- En cas de parcelle au sol potentiellement infecté :
 - on conseille d'attendre cinq ans avant de réimplanter une céréale (hors avoine).
 - Le labour profond la première année de l'infection place l'inoculum en situation défavorable à la contamination des coléptiles. S'il est suivi d'un nouveau labour, les spores reviennent en surface où elles peuvent provoquer les contaminations. Par contre, s'il est suivi d'un travail superficiel, les spores restent au fond.
 - Rechercher les conditions favorisant une levée rapide (la plantule est résistante au stade 2 feuilles), notamment en évitant des semis trop tardifs.
 - Etre d'autant plus vigilant que le sol est séchant, les années peu pluvieuses (été, automne) : le stock de spores s'épuise moins vite.
 - Traiter les semences en préventif (voir ci-dessous).
 - Préférer des variétés avec un certain niveau de résistance (voir ci-dessous).
 - Eliminer autant que possible les graminées sauvages, qui pourraient être des réservoirs de carie (ne pas laisser les grains arriver à maturité).

17.3 Le traitement de semences

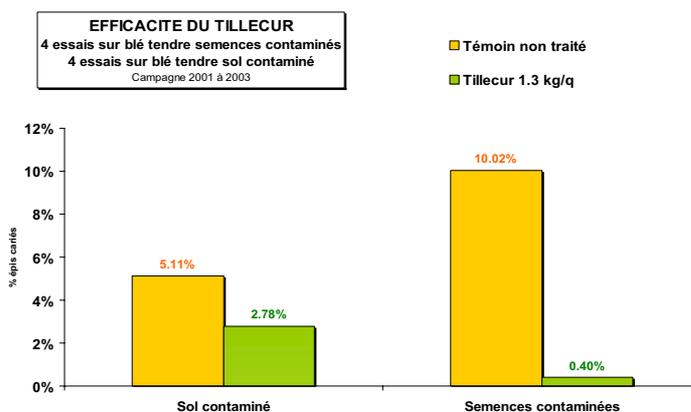
En agriculture biologique, un traitement à efficacité intéressante est le Tillecur. Il s'agit d'un produit autorisé en agriculture biologique comme fortifiant des plantes. A base de farine de plantes et de produits naturels d'enrobage, il agit de façon non systémique : par l'apport d'amidon, il servirait de nutriment au mycélium ; la plante aurait ainsi la possibilité d'atteindre le stade 3 feuilles pour y devenir résistante.

L'efficacité du Tillecur est cependant insuffisante pour espérer une désinfection totale (voir ci-dessous) : il permet de diminuer la pression de la carie, pas de l'éliminer. Etant donné le pouvoir de multiplication de la carie, l'utilisation de ce produit devrait se limiter à une application sur semences saines, en cas de doute sur la présence de carie dans un sol (par exemple lorsque le sol a été contaminé plusieurs années auparavant, et que l'on veut y réimplanter un blé).

Efficacité du Tillecur : résultats d'essais sur blé tendre Arvalis-Institut du végétal, campagnes 2001 à 2003.

Des essais ont été menés d'une part sur sols contaminés artificiellement (à raison de 1 g/m² de sol, dilué dans du sable), d'autre part sur semences contaminées artificiellement (à raison de 2 g de spores/kg de semences).

L'utilisation de Tillecur en enrobage de semence pour les parcelles contaminées a permis une diminution de la pression de la carie. Dans le cas des semences contaminées, l'efficacité est bonne (seulement 0,4% d'épis cariés contre 10% pour le témoin) ; elle est néanmoins insuffisante pour éradiquer en totalité la maladie étant donné son fort pouvoir de propagation.



D'autres techniques de traitement des semences ont été testées, notamment au Danemark (voir tableau). Il s'agit de travaux à l'échelle expérimentale qui, comme pour le Tillecur, n'aboutissent pas à une efficacité totale. Certaines donnent des résultats comparables à ceux du Tillecur.

Pour une mise en œuvre à la ferme, l'intérêt technico-économique de ces techniques reste cependant à démontrer (y compris pour le Tillecur, qui a un coût) ; pour certaines la question de l'homologation se pose par ailleurs.

Combinées avec des techniques mécaniques (brossage, ...) et un choix de variétés peu sensibles, certaines d'entre elles permettront peut-être, à l'avenir, d'éliminer tout risque de semer des grains contaminés. Un important travail de recherche reste à mener en ce domaine. A noter qu'une piste existe aussi du côté de la lutte biologique, avec la bactérie du sol *Pseudomonas chlororaphis*, utilisée en conventionnel dans le nord de l'Europe et en Italie contre plusieurs parasites dont la carie commune.

Présentation de techniques expérimentées en traitement de semences contre la carie commune du blé (source : Borgen A., Kristensen L., Nielsen B., <http://orgprints.org/>)

Technique expérimentale	Efficacité mesurée dans les conditions de l'expérimentation	Commentaires
Lavage des grains avec un laveur à brosse (400 mm de diamètre), précédé d'un pré-lavage.	99, 8 % des spores ont été éliminées du lot traité.	Intéressant pour éviter l'incinération d'un lot destiné à l'alimentation du bétail.
Nettoyeur-séparateur à courant d'air suivi d'un brossage.	Réduction de 99,8% de la carie, sans réduire la vigueur de germination. (de 230 000 spores /gramme à 1356-2067 spores).	L'air permet d'éliminer les grains cariés plus légers et les brosses enlèvent les spores qui se trouvent sur les grains.
Traitements par la chaleur (eau chaude ou bien air humide chaud).	Effet négatif sur la germination et technique très longue.	
Traitement à l'eau chaude.	La carie peut être réduite de 95 % par un traitement avec de l'eau chaude avec les combinaisons 50°C-3mn jusqu'à 65°C-3mn sans réduire la vigueur de germination.	Le problème est le coût du séchage des grains.
Stérilisation de la surface des grains : combinaison de vapeur et d'ultrason.	Avec cet équipement la carie commune est éliminée au bout de 4 secondes sur le blé et sur l'épeautre au bout de 8 secondes, sans affecter la germination (pas de précision sur le niveau d'élimination).	L'ultrason crée une fluctuation des molécules d'air dans la cuve contenant les grains et par conséquent favorise l'accès de la vapeur chaude à la surface de la graine.
Enrobage avec de la poudre de lait.	Contrôle en partie de la carie commune, mais les fortes doses qui sont efficaces affectent la germination.	La poudre de lait avant le semis sert de source de nutriment pour les microorganismes du sol ou de la surface de la graine qui sont des antagonistes du pathogène <i>Tilletia</i> .
Enrobage avec de la farine de moutarde jaune (<i>Brassica hirta</i> syn. <i>Sinapis alba</i>), 30g/kg de semences.	Témoin : 27,1% de plantes infectées ; traité : 0,4% de plantes infectées (après une contamination artificielle des semences à 5g de spores/kg de grains). Germination non affectée.	Ces recherches sont probablement en lien avec la formulation du Tillecur.
Enrobage avec de l'acide acétique, 20 ml/kg de semences.	Réduction de la fréquence de la maladie de 91,5 à 96,2%, sans affecter la germination.	

17.4 Sensibilité à la carie : des réponses variétales très diverses

Il existe des différences importantes de comportement des variétés et des espèces de céréales vis-à-vis de la carie commune. Le problème est que les variétés tolérantes ne correspondent pas toujours aux attentes du marché de l'agriculture biologique ou à ses conditions de mise en culture. Par exemple, Crousty, une variété de blé tendre qui montre un très bon niveau de résistance à la carie, est un blé biscuitier.

A noter que même une variété notée comme très résistante peut présenter des symptômes, comme l'indique les résultats présentés plus loin. De même, une espèce réputée tolérante comme le triticales peut parfois être infectée, bien qu'à des niveaux très faibles (voir ci-dessous le paragraphe sur le triticales). Ceci est certainement lié à la multiplicité des races physiologiques de carie et à leur capacité d'adaptation à de nouvelles variétés.

L'évaluation des variétés vis-à-vis de cette maladie n'est pas faite lors de l'inscription, car la carie commune est facilement maîtrisée en agriculture conventionnelle par les traitements de semences depuis plusieurs dizaines d'années. Elle est par contre stratégique pour l'agriculture biologique qui ne dispose pas de méthode de lutte totalement efficace.

L'évaluation des variétés est cependant difficile, car on constate une interaction entre le comportement des variétés et les essais (conditions de milieux : sol, climat et éventuellement types de carie). Ainsi les variétés se classent différemment selon les lieux (voir ci-dessous les résultats d'essais). Un réseau multi-local est mis en place en 2007 au niveau européen pour tester dans des conditions diverses un panel de variétés.

Des essais de variétés en situation de contamination artificielle sont menés depuis 2001 par Arvalis-institut du végétal (figure 1)

Depuis six ans ARVALIS réalise chaque année un essai pour étudier le comportement de quelques variétés vis-à-vis de la carie. Le type de contamination peut varier, par le sol ou la semence.

Le graphique ci-dessous présente les résultats des six essais pour les variétés présentes dans au moins trois essais, en pourcentage d'épis contaminés.

Crousty est régulièrement la variété la moins sensible (0,2% d'épis contaminés en moyenne sur les 6 essais).

Levis apparait comme peu sensible (confirmé par les essais suisses). Apache l'est un peu plus. Les différences sont faibles entre les autres variétés.

Figure 1 - Pourcentage d'épis contaminés.
Résultats de 6 essais conduits par Arvalis-institut du végétal en situation contaminée

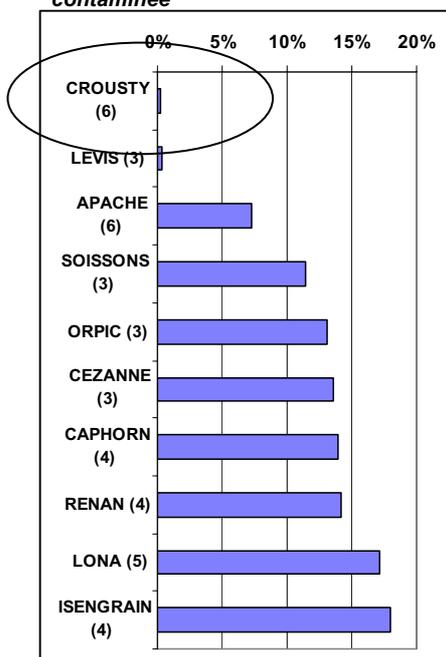
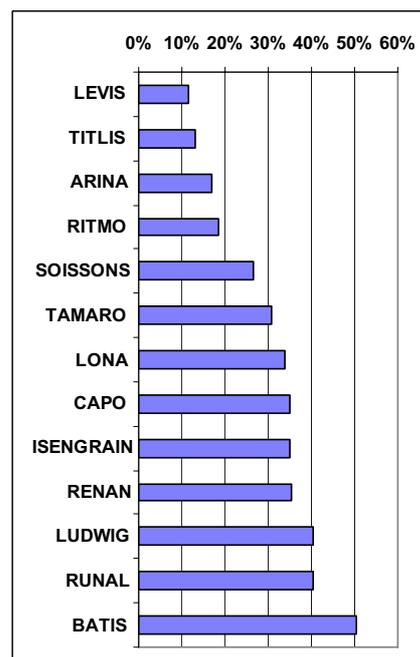


Figure 2 - Pourcentage d'épis contaminés.
Résultats pour une partie des variétés de 9 essais conduits en Suisse en situation contaminée (FAL et RAC)



Résultats de 9 essais conduits par les stations de recherche Suisse de Reckenholz (FAL) et Changins (RAC) (figure 2)

Pendant trois ans, sur trois lieux différents, une vingtaine de variétés ont été évaluées après contamination artificielle des semences.

Levis est la variété la moins touchée, mais le taux d'attaque est de 11,4 % d'épis cariés en moyenne.

Il convient de souligner qu'une grande variabilité entre les résultats d'essais a été constatée. Si Levis est toujours parmi les 4 variétés les moins sensibles et Batis la plus sensible, d'autres variétés sont beaucoup plus irrégulières. Ainsi Ritmo peut varier de la première place (variété la moins touchée) à l'avant dernière, Soissons de la deuxième à la quatorzième.

L'espèce triticale a un bon niveau de résistance à la carie.

Sur triticale, Arvalis-Institut du végétal a réalisé en 2005 un essai pour étudier la réponse variétale dans le cas d'une contamination par le sol. Sur les 24 variétés de triticale comparées dans le cadre de cet essai, une seule variété (Timbo) a présenté quelques épis cariés, à un taux très faible (0,06 % d'épis cariés), alors que la variété blé tendre sensible (témoin) conduisait à un taux de 25,9 % d'épis cariés. Des essais menés par l'INRA de Grignon en 1996 et le GEVES n'ont pas détecté de carie sur triticale.

Ces résultats confirment la plus grande résistance de cette espèce vis-à-vis de la carie, ce qui en fait une alternative intéressante pour le retour d'une céréale après quelques années sur une parcelle contaminée.

CONCLUSION

Au moindre soupçon de présence de carie sur une culture :

- multipliez les observations au champ avant la récolte,
- utilisez la « technique du seau d'eau »,
- en cas de doute, n'hésitez pas à faire réaliser une analyse en laboratoire au coût modéré : elle permet de détecter des contaminations mineures (peu détectables à la ferme) mais extrêmement préjudiciables pour les années suivantes,
- nettoyez soigneusement le matériel ayant été en contact avec le lot suspicieux (moissonneuse-batteuse, cellule de stockage, sacs, matériel de manutention, etc.)
- n'utilisez pas la récolte en semence de ferme,
- ne sous-estimez pas le risque, pensez à vos voisins !

En cas de doute sur les grains, la meilleure prévention est la non-utilisation en semence.

En cas de risque de présence de carie dans un sol (retour sur une parcelle contaminée quelques années auparavant, carie détectée chez un voisin/sur des parcelles voisines) :

- privilégier au maximum d'autres cultures que les céréales,
- en cas de semis de céréale, combiner les pratiques défavorables à la carie :
 - jouer sur les résistances variétales et par espèce (le triticale, bien que pouvant être atteint, est bien plus résistant que le blé),
 - traiter les semences au Tillecur.

La combinaison de plusieurs méthodes de contrôle, aucune n'étant efficace à 100%, reste la meilleure démarche pour enrayer la propagation de la carie. La recherche de la résistance variétale (ou d'une espèce plus tolérante) combinée au traitement des semences est alors préconisée.

La recherche se doit de poursuivre ses efforts pour fournir aux agriculteurs des éléments d'aide à la décision dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE (indicative)

ARDEAR Rhône-Alpes, 2005. La carie du blé, attention danger ! 4p.

BÄNZIGER Irene, 2003. Stinkbrandanfälligkeit in- und ausländischer Weizensorten [Résistances des variétés de blé à la carie ordinaire], *AgrarForschung* 10, 328-333.

BORGEN Anders, 2005. Removal of bunt spores from wheat seed lots by brush cleaning. *Seed Info, ICARDA*, 29.

CHAREYRON Bertrand, 2006. Carie du blé : une maladie encore trop souvent oubliée, *Bulletin bio CA* 26, 9-10.

COLLIN François, 2003. Les semences biologiques répondent bien aux normes, *Bulletin Semences*, 172, 27-28.

GLACHANT Charlotte, 2005. Carie du blé : vigilance, *Brev'Bio Grandes Cultures*, 7.

MAILLE Eric, 2002. La carie (*Tilletia caries*), *Bulletin bio Agrobio Poitou-Charentes*, 5p.

RAYNAL Guy, 1997. Les caries du blé, des maladies dont il faut toujours se méfier, *Phytoma-La défense des végétaux*, 492, 14-16.

SEGUIN Bernard, 2002. Production de semences biologiques : contre la carie, une lutte préventive s'impose, *Bulletin semences*, 2p.

SEGUIN Bernard, 2003. Agriculture biologique et production de blé tendre : une vigilance à l'égard de la carie, *Alter Agri* 63, p.4-5.

WALDOW F., 2005. Untersuchungen zur Regulierung von Steinbrand (*Tilletia caries*) unter besonderer Berücksichtigung von Befallstoleranzgrenzen und direkten Maßnahmen [Investigations in control of common bunt (*Tilletia caries*) of wheat with special reference to threshold levels and direct control methods], Paper presented at 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, 01.-04.03.2005, 4p.

Bibliographie étrangère : plus d'information sur <http://orgprints.org/>

LA CARIE EN PRODUCTION DE SEMENCES DE CEREALES BIO : UNE LUTTE PREVENTIVE S'IMPOSE

Bernard SEGUIN

Arvalis-Institut du végétal

Article paru en 2002 dans Bulletin Semences

Les caries sont des maladies provoquées par des champignons basidiomycètes du genre *Tilletia*. Au niveau mondial les quatre principales espèces rencontrées sont *Tilletia caries*, *Tilletia controversa*, *Tilletia faetidia* et *Tilletia indica*. De plus, il existe plusieurs races physiologiques à l'intérieur de chaque espèce de carie ; toutefois avec la pratique de la lutte chimique par la désinfection des semences, l'étude de ces races est devenue moins importante (Rapilly – Lemaire – Cassini 1973).

Depuis longtemps dans de nombreux pays, des gènes de résistance aux caries ont été sélectionnés, cette sélection se heurte malheureusement au grand potentiel adaptatif du genre *Tilletia* qui se manifeste par une sélection de races virulentes, ce qui ruine assez rapidement les résistances incorporées aux cultivars (Champion – Raynal 1993).

Au XIXème siècle, observer des parcelles cariées à 50% était, semble-t-il, courant et, jusqu'aux années 1950, la carie était considérée comme la principale maladie du blé. Il n'y a pas en France d'études systématiques sur la répartition de ce champignon, ce qui interdit toute vision quantifiée du parasite. Aujourd'hui la maladie existe à l'état de bruit de fond, cette conclusion étant basée par quelques observations de terrain et sur les appels des agriculteurs. Cette maladie est toujours prête à reprendre son extension si l'intérêt que l'on peut lui accorder se relâche.

En agriculture biologique, cette maladie est considérée comme un risque majeur. La lutte dans ce cas repose exclusivement sur la génétique. En post inscription des variétés inscrites au catalogue officiel, des études sont

faites sur les variétés de blé tendre d'hiver par le GEVES (Groupe d'Etudes et de Contrôle des Variétés et des Semences) sur la tolérance ou la résistance des blés tendres à cette maladie. L'ITCF a engagé en 2001, une étude sur le comportement variétal à cette maladie, en prenant en compte aussi des variétés cultivées en agriculture biologique.

Biologie du champignon

Ce champignon se conserve à la fois sur la semence ou dans le sol. Il possède un très fort pouvoir de pollution. Un grain carié peut contenir jusqu'à 9 millions de spores. Celles-ci sont disséminées au battage et les grains ainsi cariés libèrent les spores qui iront contaminer les grains sains ainsi que le sol ayant supporté cette récolte cariée. Les grains de blé provenant de champs atteints par la carie, peuvent porter des dizaines de millions de spores réparties sur leur surface et accumulées dans le sillon et dans la houppe de poils du sommet (Thiollère 1949). D'autres possibilités de contamination existent ; le vent peut aussi disperser les spores sur plusieurs centaines de mètres. Enfin, l'utilisation de sacs non désinfectés ayant contenu une récolte cariée peut être aussi à l'origine de la dissémination de la maladie. Des spores représentent donc la phase de conservation et de dissémination du champignon. Dans le sol, les spores peuvent vivre plusieurs années selon les conditions de température et d'humidité. En France en 1989, la réapparition de parcelles atteintes par la carie transmise par le sol a été identifiée (Maumené – Laroche 1991). Dans nos régions, les conditions de semis d'automne relatives à la température et à l'humidité du sol sont souvent réunies pour que les spores germent et pénètrent dans le coléoptile du blé avant la levée. Lorsque l'infection est réalisée, le cryptogame progresse à l'intérieur des tissus de la plante en direction de l'ébauche de l'épi où il

contaminera les différents tissus au cours de leur formation. Le mycélium de la carie ayant une prédilection pour un organe spécifique va contaminer les fleurs dès leur formation puis envahir l'ovaire où il s'y constituera en une masse de spores. Le rachis, l'enveloppe du grain ainsi que les glumes et les glumelles restent intactes. C'est à partir du stade 2 feuilles que le blé devient résistant, à ce stade, le mycélium ne peut plus pénétrer la plantule dont les parois sont trop épaisses.

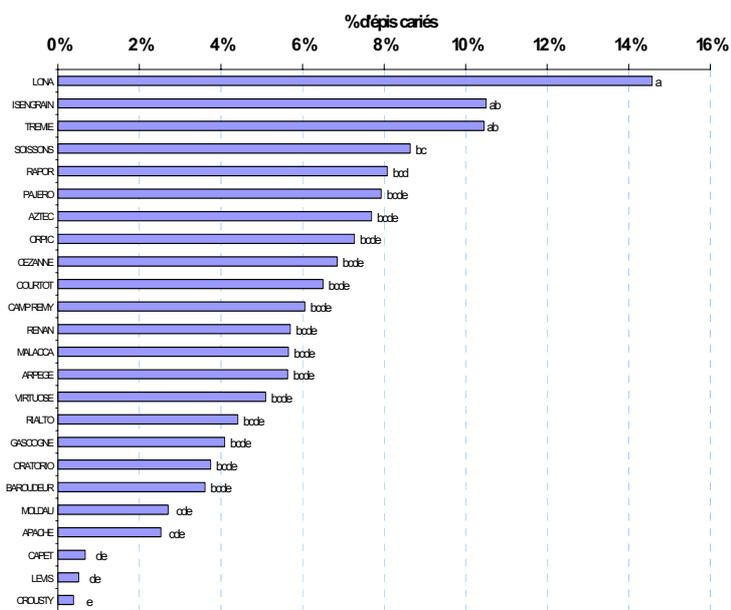
L'intensité d'une attaque de carie est en rapport avec l'importance du taux de contamination, des variétés de blé qui peuvent être plus ou moins résistantes et également les diverses races de carie dont la virulence est plus ou moins importante.

Symptômes

Les premiers symptômes apparaissent à la fin montaison. Les plantes infectées, d'une couleur bleutée, peuvent être plus courtes. La maladie se manifeste plus nettement après l'épiaison. Les tiges et les épis ont toujours une couleur vert bleuâtre et les glumes sur les épis s'écartent pour laisser apparaître des grains de forme arrondie et de couleur vert olive. A maturité, ces grains, de forme sphérique, brunissent et donnent à l'épi malade un aspect ébouriffé qui prend une couleur blanchâtre. Ce sont ces graines qui s'écrasent au battage, libérant les spores qui se placeront dans le sillon ou aux extrémités des graines saines qui deviennent brunâtres ; on dit alors que les grains sont boutés.

Réponse variétale à la carie à partir de semences contaminées

Figure 1 - Résistance et/ou tolérance variétale à la carie (*T. caries*) sur du blé tendre d'hiver pour des variétés utilisées principalement en agriculture biologique. Contamination par la semence (1 essai ITCF – 2001).



En 2001, 24 variétés de blé tendre d'hiver, pour une grande part, utilisées en agriculture biologique ont été choisies puis contaminées artificiellement.

La contamination des semences a été réalisée selon la technique décrite dans la méthode CEB N°42, et qui consiste à mélanger intimement 2 grammes de spores ayant la même origine par Kg de semence.

Le dispositif mis en place est un dispositif en blocs de Fischer avec 3 répétitions.

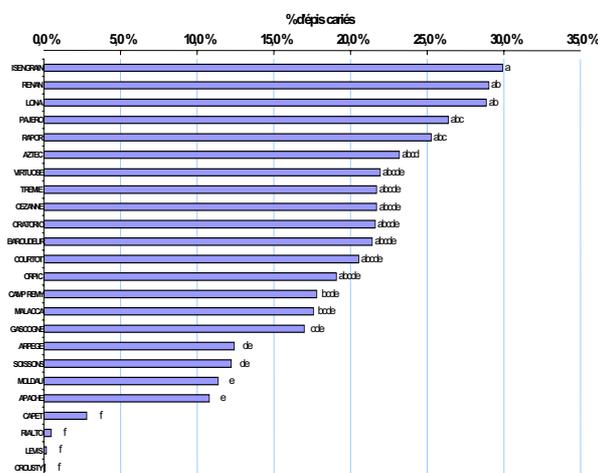
Cet essai, avec cette série de variétés, met en évidence le très bon comportement des variétés Crousty, puis Lévis et Capet. Les variétés Apache, Moldau, Baroudeur et Oratorio affichent des pourcentages d'épis cariés inférieurs à 4% et témoignent d'un classement très significatif à l'analyse de variance. (Test Newman et Keuls au seuil 5%)

Réponse variétal à la carie à partir d'un sol contaminé

Dans le cadre des moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux, les mêmes variétés que celles retenues pour l'essai « semences contaminées » ont été semées sur des micro parcelles de 1.50 m². La contamination du sol destinée à cet essai est réalisée à partir d'un mélange de 10 grammes de spores par kg de sable, sachant que 100 g de ce mélange (spores + sable) est épandu par m², permettant ainsi d'atteindre un niveau de contamination du sol, d'environ 500 millions (5X10⁸) de spores par m².

Ces niveaux de contamination du sol affichent des pourcentages d'épis cariés atteignant environ 30% pour certaines variétés.

Figure 2 - Résistance et/ou tolérance variétale à la carie (*T. caries*) sur blé tendre d'hiver pour des variétés utilisées en grande majorité en agriculture biologique. Contamination par le sol 1 essai ITCF 2001.



Comme peut en témoigner la réponse variétale du blé tendre d'hiver à la carie dans cet essai, différents niveaux de résistance ou de tolérance apparaissent. Il est cependant très intéressant de noter que les variétés Crousty, Lévis et Rialto présentent un même comportement en situation de sol contaminé ou de semence contaminée.

En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence que certaines variétés sont tolérantes et, parfois dans certaines situations (mode de contamination : semences et/ou sol témoignent des résistances). Le choix variétal peut être intégré au raisonnement de la lutte contre la carie du blé tendre *Tilletia caries*. La prise en compte par l'agriculteur de ce moyen alternatif de lutte par l'utilisation de variétés ciblées obtenue au vu des résultats ci-dessus présentés, peut permettre de répondre de façon préventive au risque potentiel de la présence de cette maladie sur son exploitation, en particulier en agriculture biologique. En raison de la grande disparité variétale observée, même si aujourd'hui les variétés Crousty, Rialto, ne sont pas particulièrement utilisées en agriculture biologique, malgré leur bon comportement vis à vis du cryptogame étudié, d'autres variétés intéressantes sont apparues comme Lévis et Capet.

Les gènes de comportement à la maladie de ces variétés peuvent être pris en compte par les sélectionneurs dans leurs futurs programmes d'obtention variétale.

Des résultats d'essais plus exhaustifs réalisés les campagnes précédentes, en collaboration avec l'INRA de Versailles (G. BERTHIER) sont présentés dans les annales de la 2ème conférence Internationale de Lille les 4,5,6 et 7 mars 2002 sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux.

Agriculture biologique et production de blé tendre : une vigilance à l'égard de la carie (*Tilletia caries*)

Par Bernard Seguin (Arvalis Institut du végétal)

*En agriculture biologique comme en agriculture conventionnelle, la production de blé tendre nécessite un contrôle total de la carie commune (*Tilletia caries*). En effet, cette maladie peut avoir de lourdes conséquences sur la qualité de la récolte, sur l'état sanitaire des parcelles de l'exploitation, et même sur leur environnement. Les récoltes cariées sont inutilisables pour la semence, et refusées par la meunerie en raison de l'odeur de poisson pourri que l'on peut retrouver dans les farines¹.*



©ARVALIS - Institut du végétal

La présence de cette maladie est difficilement quantifiable à l'échelon national, mais chaque année, des agriculteurs de régions différentes se manifestent pour faire part de cas isolés, et demander un appui technique pour lutter contre cette maladie. A titre d'exemple, un agriculteur biologique a perdu en 2002 toute sa production de petit épeautre en raison de la méconnaissance de ce risque.

La particularité de ce champignon est son fort pouvoir de contamination : un grain carié peut contenir jusqu'à 9 millions de spores. Au battage, les grains des épis cariés libèrent ces spores qui viennent contaminer les grains des épis sains et le sol qui a supporté cette récolte cariée. Les spores peuvent être aussi disséminées par le vent sur plusieurs centaines de mètres, et être aussi à l'origine de la pollution des parcelles voisines. Il est bon de souligner aussi que les moissonneuses batteuses, en passant d'une parcelle contaminée à une parcelle saine, peuvent être à l'origine de la contamination de certaines parcelles. Les spores ainsi présentes, soit sur le grain au niveau de la brosse et du sillon, soit dans le sol, viendront, après avoir germé dans le sol, contaminer le coléoptile² du blé avant la levée. Une fois l'infection réalisée, le champignon progresse à l'intérieur des tissus de la plante pour ensuite contaminer l'ébauche de l'épi et plus particulièrement les fleurs dès leur formation, puis envahir l'ovaire pour enfin produire une masse de spores. Les autres organes de l'épi tels que les glumes, les glumelles et le rachis ne sont pas atteints. Au stade 2 feuilles, le blé devient résis-

tant, le mycélium ne peut plus pénétrer la plantule dont les parois sont trop épaisses. La durée de vie des spores présentes dans le sol peut s'étaler sur plusieurs années, ce qui rend difficile en la lutte contre ce champignon particulièrement en agriculture biologique.

Les symptômes observés en culture

L'observation de la maladie se fait à l'épiaison. Une plante infectée est en général plus courte qu'une plante saine, les épis et les tiges sont de couleur glauque (bleuté). Sur les épis, les glumes et les glumelles s'écartent pour laisser apparaître des grains de forme ovoïde et de couleur verdâtre. Ces grains malades ont la particularité de présenter une ébauche de sillon sur leur face dorsale. Si l'on exerce une pression sur ces grains entre les doigts, il s'en dégage une masse noire pulvérulente constituée de spores. A maturité, les épis contaminés présentent un aspect "ébouffé". Ce sont ces graines de forme sphérique qui s'écrasent au battage libérant ainsi les spores

¹ R. Champion Geves - INRA

² Le coléoptile est un étui qui protège l'apex caulinaire et les jeunes feuilles.

qui contamineront les grains des épis sains, ainsi que le sol.

Une expérimentation réalisée par ARVALIS - Institut du végétal sur la campagne 2002/2003 a permis de mettre en évidence à partir du nombre d'épis cariés/m² dans une parcelle l'année N, le risque couru par l'agriculteur (en l'absence de traitement de semence) l'année suivante. La figure ci-contre fait apparaître qu'un très faible taux de contamination initial, par exemple 1% d'épis cariés/m², peut se traduire l'année suivante par un niveau d'attaque se situant à 61,8% d'épis cariés/m².

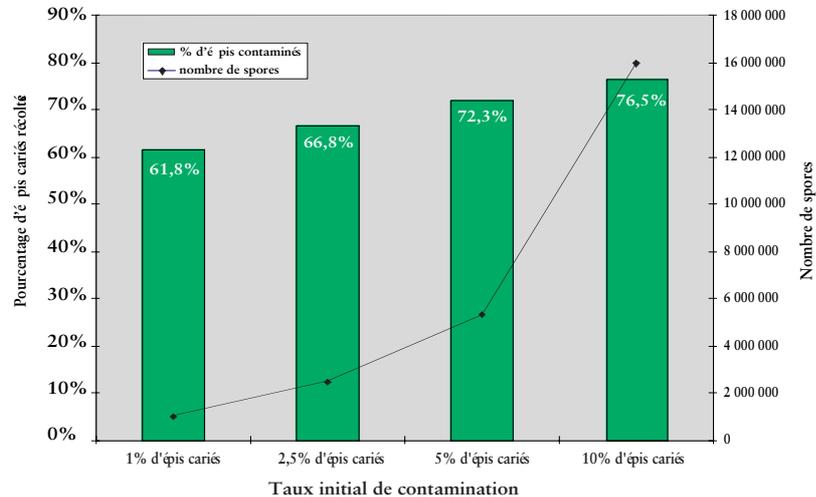
Une mesure du nombre de spores présentes par gramme de grains, initialement sains mais contaminés au battage par les grains malades, laisse apparaître un effectif de spores qui se situe entre environ 1 million et 16 millions de spores par gramme de grains...de quoi assurer la contamination de la culture suivante.



© ITAB

Pourcentage d'épis cariés

Incidence du taux de contamination des semences cariés sur le nombre d'épis cariés l'année suivante (blé tendre)



Les moyens de lutte contre la carie

Dans le cadre des moyens alternatifs de lutte contre la carie, plusieurs possibilités sont offertes à l'agriculteur biologique pour se prémunir contre ce risque : utiliser les résistances génétiques ou recourir au traitement de semences TILLECUR.

Blés tendres d'hiver SATURNUS :

barbu - riche en protéines

MOLDAU :

BPS - haut et rustique

Orges d'hiver

SILKE : 6 rangs - incassable

VIRAC : 2 rangs - rustique -

haute en paille

Triticale

ROTEGO : rustique et productif

N'oubliez pas de fortifier vos semences contre la carie avec le Tillecur.

Le Tillecur est également un répulsif corbeaux sur toutes semences.

BIO-SEMEST - 7, rue de l'Escout
51100 Reims

Tél. : +333 26 85 55 33

Fax : +333 26 85 48 25

www.semest.com • vdb@semest.com

Des études réalisées en 2001 par ARVALIS - Institut du végétal ont permis de mettre en évidence que certaines variétés de blé tendre sont tolérantes à la carie aussi bien en situation de sol contaminé que de semence contaminée. Parmi ces variétés, on peut citer les variétés CROUSTY, LEVIS, CAPET, RIALTO, (bulletin semences N°165 avril/mai 2002 ; reste le problème de l'adaptation de ces variétés à la conduite en agriculture biologique). En 2003, une autre liste variétale a fait l'objet d'essais réalisés en situation de sol contaminé naturellement (tableau 1), et artificiellement (tableau 2). Les résultats de ces essais nous autorisent à confirmer le très bon comportement de la variété CROUSTY. A l'inverse, les variétés APACHE, LONA, et ORACLE sont considérées comme sensibles.

Le traitement TILLECUR* utilisable

Tableau 1 : semence saine sur sol contaminé naturellement

Variété	% d'épis contaminés
CROUSTY	0
APACHE	0,92
LONA	1,95
ISENGRAIN	2,14
CAPHORN	2,61
ORACLE	3,53

Tableau 2 : semence saine sur sol contaminé artificiellement

Variété	% d'épis contaminés
CROUSTY	0,1
APACHE	11,1
LONA	14,4
CAPHORN	21,6
ISENGRAIN	27
ORACLE	32,8

*dose : 1,3 kg appliqué par quintal. Coût approximatif du TILLECUR : 16€ du quintal.

en traitement de semences a témoigné d'une efficacité de 96% vis-à-vis de la carie transmise par les semences (témoin 15% d'épis cariés). En situation de sol contaminé, l'efficacité de ce traitement est inférieure à 90%, et reste insuffisante pour permettre une éradication totale de la maladie.

Aujourd'hui, les options offertes à l'agriculteur biologique pour garantir la qualité de sa production sont :

- l'utilisation de semences saines, à condition que le sol soit non contaminé ;
- semer une variété tolérante, ce qui peut éviter le coût d'une analyse sanitaire ;
- en situation de sol contaminé, l'action conjuguée de l'utilisation d'une variété tolérante à la carie et de l'application du TILLECUR est actuellement le moyen de lutte le plus adapté pour l'agriculteur biologique qui souhaite se prémunir contre cette maladie. ■

LES CARIES DU BLÉ

Des maladies dont il faut toujours se méfier

Guy Raynal*

Les caries sont des maladies connues depuis que l'homme cultive les céréales et encore redoutées dans tous les pays producteurs. Les traitements fongicides des semences, les mesures de quarantaine, voire dans certains cas la résistance variétale, ont permis de limiter leurs méfaits.

En France, en particulier, la Carie commune a pratiquement disparu depuis plus de quarante ans. Mais elle est toujours prête à resurgir, comme l'ont montré quelques cas spectaculaires ces dernières années (voir Phytoma-LdV n° 450). La plupart des céréaliculteurs français n'ayant cependant jamais été confrontés à ces affections, il nous a semblé utile de faire à nouveau un point rapide sur les caries du blé, leurs dangers potentiels et de faire état de quelques observations.

Tableau 1 - Répartition des espèces de *Tilletia* sur les céréales.

Espèces de <i>Tilletia</i>	Blé	Orge	Seigle	Triticale	Riz
<i>T. barclayana</i>					+
<i>T. caries</i>	+	+	+	+	
<i>T. controversa</i>	+	+	+		
<i>T. foetida</i>	+	+	+	+	
<i>T. indica</i>	+		+	+	

Les caries sont des maladies largement répandues provoquées par des champignons basidiomycètes du genre *Tilletia*, dont les diverses espèces attaquent de nombreuses graminées sauvages ou cultivées. On en trouve par exemple sur les panics, sétaires, agrostis, chiendents, bromes, dactyle, fétuque, pâturins, ray-grass, ainsi que chez les céréales. Chez ces dernières, les espèces de *Tilletia* sont indiquées dans le tableau 1

L'encadré donne une idée de leur importance mondiale actuelle d'après les articles qui leur sont consacrés.

CARACTÉRISTIQUES DES CARIES DU BLÉ

On voit que le blé est susceptible d'être attaqué par quatre espèces qui provoquent des symptômes similaires par la transformation du contenu des grains en masses de spores brun foncé. Les épis contaminés montrent des enveloppes florales intactes. Pour toutes les espèces, sauf *T. indica*, la totalité des grains d'un même épi est généralement parasitée.

La Carie commune (*T. caries* = *T. tritici*), la plus répandue dans les régions tempérées, entraîne la formation de grains gonflés dans des épis « ébouriffés » dont les glumes et glumelles s'écartent anormalement. Les spores brunes, sphériques et sans enveloppe, sont ornées d'un réseau polygonal et mesurent de 14 à 23 µm de diamètre (moyenne 18,0 µm). À la récolte, les grains cariés éclatent et les spores polluent les grains sains et le sol (Photos p. 15 et 16).

La Carie lisse (*T. foetida* = *T. laevis*) se rencontre surtout dans les zones méditerranéennes ou chaudes.

Les spores ont la même dimension que celles de *T. caries*, mais leurs ornements sont très peu proéminents, voire absents. Ces spores, de même que celles de la carie commune, répandent une odeur désagréable de poisson pourri (triméthylamine).

PAYS OÙ LES CARIES SONT PRÉOCCUPANTES

En France, les données publiées sur les caries sont rares depuis une quarantaine d'années, du moins celles répertoriées dans les bases de données bibliographiques internationales. Cela est dû en particulier à la bonne maîtrise des caries dans notre pays. Dans beaucoup d'autres, en revanche, les caries sont encore très étudiées, ce qui traduit leur importance économique, comme on peut en juger par le nombre élevé d'articles répertoriés sur la période 1986-96 dans *Review of Plant Pathology* (C.A.B. Abstracts). D'après cette base internationale de données, on peut se rendre compte que les caries sont largement répandues chez les céréales. La liste suivante indique les pays où existent à des degrés divers les *Tilletia*, et où ont été effectuées dans les dix dernières années des recherches visant à les combattre ayant donné lieu à des publications dans des revues scientifiques.

T. caries (= *tritici*) : Australie, Azerbaïdjan, Canada, Grande Bretagne, Hongrie, Inde, Iran, Pologne, Russie, Slovaquie, Suède, Suisse, Syrie, Turquie.

T. foetida (= *laevis*) : Afrique du Sud, Australie, Azerbaïdjan, Canada, États-Unis, Inde, Iran, Irak, Liban, Maroc, Pakistan, Roumanie, Slovaquie, Suède, Syrie, Rép. Tchèque, Tunisie, Turquie.

T. controversa (= *brevifaciens*) : Autriche, États-Unis, Iran, Slovaquie, Suède.

T. indica (= *Neovossia indica*) : Brésil, Inde, Irak, Mexique, Népal, Pakistan.

La Carie naine (*T. controversa* = *T. brevifaciens*), en plus des grains cariés, entraîne un nanisme prononcé des plantes. Sur notre continent, on la rencontre surtout en Europe Centrale. Les grains cariés sont durs et ne laissent pas échapper de spores lors de la récolte, (ce qui évite aux autres grains récoltés d'être pollués) mais leurs débris contaminent durablement le sol. Ces spores sont relativement grosses (diamètre moyen 20 µm) et possèdent une ornementation en réseau proéminente. De plus, elles sont contenues dans une enveloppe transparente et sont mélangées à des cellules stériles, translucides, sphériques, un peu plus petites.

La Carie partielle, ou Carie du Karnal (*Tilletia* = *Neovossia indica*), est présente sur le continent indien et en Amérique Centrale et du Sud. Elle a été décrite pour la première fois en 1935 au Karnal, d'où son nom, région de plaines à cheval sur l'Inde (Penjab) et le Pakistan actuels. Contrairement aux autres espèces, il semble bien qu'elle n'attaque que le blé et éventuellement le seigle et la triticales. Normalement, seul un petit nombre de grains sont cariés dans un même épi, et il arrive souvent que ces grains ne soient pas entièrement contaminés. Cependant, partout où elle est présente, cette Carie entraîne des baisses importantes de rendement et de qualité des récoltes. Les spores brun très foncé à noir sont grandes (diamètre moyen : 35 µm) et ont une paroi épaisse et verruqueuse. Des cellules stériles, transparentes, sont visibles ; elles sont sphériques ou allongées et montrent une paroi épaisse.

Notons que des études récentes ont établi une possibilité d'hybridation entre *T. caries* et *T. controversa* et entre *T. caries* et *T. foetida*. De plus, des analyses de séquences de gènes et des comparaisons de plasmides présents dans le mycélium ont montré la grande parenté de ces trois espèces.

DÉGÂTS, TRANSMISSION ET INFECTION

Les dégâts dépendent directement du pourcentage de grains cariés, qui peut être très élevé : on a vu récemment en Europe des champs de blés presque totalement atteints par *T. caries*. Mais les pertes ne se limitent pas

* INA-PG. Pathologie Végétale. 78850 Thiverval-Grignon

là, car des récoltes même faiblement cariées (quelques pourcents) peuvent être déclarées impropres pour la meunerie, en raison de l'odeur et du goût désagréables communiqués aux farines et aux pains

Carie commune, Carie lisse et Carie du Karnal se transmettent toutes par les semences, polluées lors de la récolte. C'est également leur mode principal de conservation, bien que le sol puisse aussi les héberger. Les spores, après germination, donnent un mycélium qui attaque les plantules si les conditions de température et d'hygrométrie du sol sont satisfaisantes

T. caries et *T. foetida* germent à des températures modérées ou basses (optimum 15 à 17 °C), lorsque le sol est très humide. C'est pourquoi, dans nos régions à climat tempéré, elles n'attaquent que les blés d'hiver, dès leur levée, et d'autant plus que les semis sont tardifs. En revanche, au Canada, seuls les blés de printemps (semis avril-mai) sont atteints. *T. indica* demande quant à elle des températures plus élevées, ce qui limite en pratique la maladie aux zones chaudes, où elle investit les blés semés en février-mars

T. controversa (agent de la Carie naine), se conserve principalement dans le sol. Elle n'infecte les blés qu'après une longue période de températures basses (optimum 5 °C), alors que le sol est enneigé. Ainsi, seuls les blés d'hiver sont atteints, bien après le semis, dans les régions nordiques ou continentales

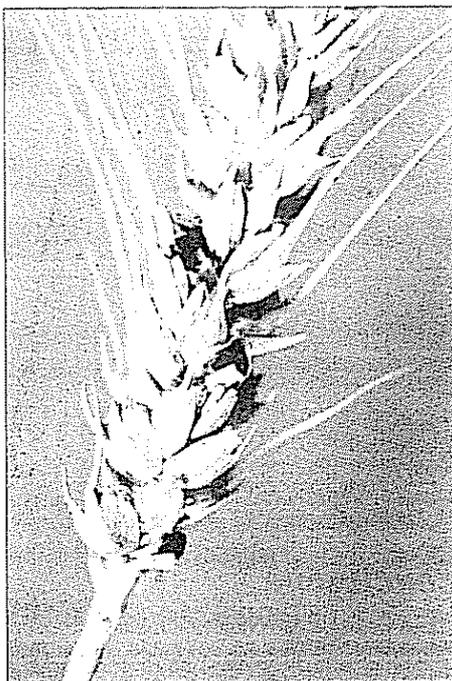
LUTTE PAR TRAITEMENT DES SEMENCES

Les *Tilletia* étant pour la plupart transmis par les semences, les traitements de ces organes permettent de les maîtriser dans la majorité des cas, si l'application des fongicides a été convenablement réalisée. Si tel n'est pas le cas, et si de plus on produit ses propres semences, on risque de voir progresser rapidement les taux de contamination d'une année sur l'autre. De nombreux fongicides sont actuellement disponibles : carboxine, mancozèbe, manèbe, oxyquinolée de cuivre, prochloraz, thirame, triacétate de guazatine, triticonazole (*Index phytosanitaire* ACTA, 1997). Employés seuls ou en association selon les matières actives, leur efficacité en traitement de semences est généralement satisfaisante

Ils peuvent par contre se montrer moins efficaces contre les contaminations provenant du sol, notamment vis-à-vis de *T. controversa*

RÉSISTANCES VARIÉTALES DES BLÉS ET DU TRITICALE

Le niveau de résistance varie considérablement selon les variétés et les espèces. Ainsi, des essais réalisés au Penjab de 1980 à 1988 ont montré que, sur quelque 7 300 variétés de blé tendre, 1 500 de blé dur et 900 de triticales respectivement 5, 50 et 40 % se révélèrent résistantes à *T. indica*. De même, des expérimentations récentes conduites par l'ICARDA (Syrie) indiquent que de nombreuses variétés de blé dur du Moyen Orient et du Sud de l'Europe résistent à *T. caries* et à *T. foetida*. La lutte



Épi de blé atteint par la Carie commune. Cette espèce réapparaît sporadiquement en France, souvent à la suite de négligences en matière de traitements de semences. (ph. Reynal)

génétique est donc possible et est conseillée en particulier pour s'opposer aux contaminations provenant du sol. Mais elle peut être rendue aléatoire, car les *Tilletia* sont susceptibles de varier, rendant ainsi les résistances moins efficaces

En France, la sélection pour la résistance à la Carie commune ne s'impose pas, les traitements de semences étant généralement suffi-

sants. L'évaluation de la résistance des variétés de blés tendres est cependant régulièrement réalisée par le GEVES, les résultats en étant publiés avec les caractéristiques agronomiques variétales dans le *Bulletin des Variétés*

Pour notre part, nous avons voulu nous rendre compte des sensibilités de quelques variétés de blés tendres et durs d'hiver, ainsi que de triticales. Pour ce faire, nous avons contaminé des semences non traitées fin octobre 1994 et 1995, en les plaçant à sec dans des flacons contenant de la poudre de spores de *T. caries* et en agitant quelques instants ces flacons. L'inoculum utilisé en 1994 provenait d'épis cariés conservés au laboratoire depuis une dizaine d'années, à la température ordinaire. L'inoculum de 1995, en revanche, fut obtenu à partir des épis cariés de l'essai précédent. Les semences polluées par les spores ont aussitôt été placées dans des pots contenant de la terre (25 semences par pot de 30 cm de diamètre, 1 pot par variété) et ont été soumises aux conditions climatiques naturelles

Le pourcentage d'épis cariés a été évalué à la maturité des céréales, soit vers la fin juillet de l'année suivante. Le tableau 2 résume les résultats que nous avons obtenus et les compare avec les notations du GEVES (A. Mazurier), obtenues sur blé tendre uniquement, après semis au champ de grains contaminés par un mélange de spores de plusieurs provenances, les observations étant réalisées sur environ 200 plantes par variété.

Nos résultats, établis avec un seul isolat de *T. caries*, ne sont que préliminaires. Ils établissent cependant, ainsi que nous l'avons mentionné d'après les données de la littérature, que le blé tendre est globalement bien plus sensible à la carie commune que le blé dur, le triticales, quant à lui, n'étant pas attaqué dans nos essais

Tableau 2 - Résistance variétale du blé d'hiver et du triticales à *Tilletia caries* : pourcentages d'épis cariés obtenus à Grignon en 1995 et 1996, et notes du GEVES (9 = 0 à 5 % de carie, 1 = 90 à 100 %).

Variétés	Blé tendre		Notes GEVES (Bulletin 1994)	Blé dur (Grignon, 1996)		Triticales (Grignon, 1996)	
	Essais Grignon : % carie			Variétés	Carie (%)	Variétés	Carie (%)
	1995	1996					
Admiral	14	36	6	Acalou	57	Alamo	0
Alliance	27	35	-	Ambrol	0	Aubrac	0
Arminda	12	96	-	Ardente	16	Formulin	0
Artaban	-	10	9	Ardor	18	Graal	0
Avital	40	91	6	Armet	6	Trick	0
Axial	-	61	9	Arsstar	0	Trimaran	0
Beauchamp	-	5	-	Brindur	0	Tropic	0
Boldor	-	51	-	Duriac	0		
Clément	60	85	-	Exeldur	0		
Courtôt	14	100	-	Ixos	0		
Festival	33	58	9	Prodigal	0		
Filou	25	8	-	Tetradur	0		
Furio	20	10	-	Villemur	100		
Hornet	60	58	-				
Pépital	30	-	-				
Qualital	11	64	1				
Scipion	12	34	9				
Virtue	-	68	-				



1 - Grains de blé sains et cariés
2 et 3 - Spores de *Tilletia caries*
Les tests rapportés ici montrent de fortes différences de sensibilité entre variétés de blés, mais aussi des différences avec les sensibilités mesurées dans d'autres expériences.
(photos Raynal)

Sur blé tendre, inoculé en 1994 et 1995, il est clair que la sévérité des attaques dépend de l'inoculum utilisé. Un inoculum âgé (résultats 1995) est globalement moins pathogène qu'un inoculum récent (résultats 1996), ce qui traduit la diminution de sa viabilité au cours du temps. Remarquons cependant qu'après une dizaine d'années de conservation sans précautions particulières, les spores de *T. caries* sont toujours capables d'induire des infections, parfois sévères.

Plus intéressante est la comparaison de nos résultats avec les notes du GEVES, car il existe pour certaines variétés des différences flagrantes : Axial, Festival et Scipion, par exemple, notées 9 (résistantes) dans les essais GEVES se sont avérées très sensibles dans nos conditions. Cela signifie vraisemblablement qu'il existe en France des races particulières du champignon, comme cela a été mentionné partout où l'on a testé des variétés. Cela met donc en question la validité des résultats obtenus avec un petit nombre d'isolats, et confirme que pour lutter contre la Carie il est impératif de pratiquer des traitements fongicides appropriés, plutôt que de faire confiance à une éventuelle résistance.

CONCLUSION

Les Caries, ces « vieilles » maladies qui ont longtemps dévasté les céréales, n'ont sans doute pas fini de faire parler d'elles. Il suffit de traitements omis ou mal appliqués pour qu'elles réapparaissent. On doit donc toujours s'en méfier et les combattre sans répit, tant par des mesures de quarantaine pour éviter la pénétration sur un territoire donné d'espèces potentiellement dangereuses, que par le traitement des semences avec des fongicides appropriés.

Enfin, l'étude des populations de *T. caries* ne serait peut-être pas inutile pour mieux évaluer la résistance variétale et expliquer en partie le retour constaté de ces maladies sur les variétés actuelles de blé.

Remerciements : Nous remercions M. A. Mazurier, GEVES La Minière, pour les renseignements communiqués sur les résistances variétales.

BIBLIOGRAPHIE

ANONYME. 1994 - Bulletin des variétés - Céréales Ed GEVES. 403 p.
AUJLA S. S., INDU SHARMA, GILL K. S.. 1990 — Sources of resistance in wheat to Karnal bunt. Indian *Phytopathology*, 43. 91-93
CHAMPION R., RAYNAL G., 1993 — La Carie commune du blé. une revenante ? *Phytoma-LaV*, 450, 16-20
MORQUE J. E. M., WALLER J. M. 1981 — *Tilletia caries*. CMI Descriptions of pathogenic fungi and bacteria Fiche n° 719
PECETTI L., MAMLUK O. F., DAMANIA A., SRIVASTAVA J. P., 1989 — Variability in a world collection of durum wheat for reaction to yellow rust and common bunt. *Rachis*. 8. 8-11
WALLER J. M., MORQUE J. E. M. 1983 — *Tilletia indica*. CMI Descriptions of pathogenic fungi and bacteria Fiche n° 748
WIESE M. V. 1987 — Compendium of wheat diseases APS Press. 106 p.

SUMMARY

WHEAT BUNTS : ONE MUST BE AWARE OF THESE DISEASES

After more than 40 years without appreciable damages in France, some recent cases of common bunt of wheat lead to recall what are cereals bunts and to describe the responsible *Tilletia* species. The results of a preliminary trial on varietal resistance estimated after artificial seed contamination, showed that numerous aestivum winter wheat varieties were susceptible. The percentage of bunted heads exceeded 30 % for most varieties and sometimes reached 90 to 100 %. On the other hand, most of durum wheat varieties were resistant or slightly susceptible and triticale was totally resistant. The necessity of seed treatments is emphasized.

Key words : wheat, aestivum winter wheat, durum wheat, triticale, bunts, *Tilletia* spp., sensibility, resistance

RÉSUMÉ

Après une très longue absence de dégâts notables, des cas récents de Carie commune du blé en France conduisent à rappeler ce que sont les caries des céréales et à décrire les espèces de *Tilletia* qui les provoquent.

Les résultats d'essais sur la résistance variétale, évaluée après contamination artificielle des semences, montrent que de nombreuses variétés de blé tendre d'hiver sont sensibles. Le pourcentage d'épis cariés dépasse en effet pour la plupart 30 % et peut atteindre 90 à 100 %. En revanche, la majorité des variétés de blé dur sont résistantes ou peu sensibles, et le triticale s'est montré totalement résistant à l'isolat utilisé.

Les traitements de semences sont plus que jamais indispensables.

Mots-clés : blé, blé tendre d'hiver, blé dur, triticale, caries, *Tilletia* spp., sensibilité, résistance.

KASCO

PHY Votre casque de protection autonome
DOUBLE VENTILATION
Débit d'air Filtré :
minimum 300 l/minute
2 CARTOUCHES FILTRANTES
Stock pièces détachées

SYSTEME UNIQUE ET EXCLUSIF

cartouches filtrantes spéciales
PRODUITS PHYTO

ETS JEAN CHESNEAU S.A. - 45130 Epreux en Beauce Tél. 02 38 74 28 38 - Fax 02 38 74 28 07

Mr Profession
Adresse Tél

Souhaitez recevoir gratuitement 1 documentation et votre casque



Institut Technique de l'Agriculture Biologique

149, rue de Bercy

75595 Paris Cedex 12

Tél. : 01 40 04 50 64 - Fax : 01 40 50 66

Secretariat.itab@itab.asso.fr

www.itab.asso.fr

Journée réalisée avec le soutien financier de l'ONIGC

