



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de
l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques

Mémoire Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protection des végétaux

Thème

**La biofumigation une opportunité dans la gestion des maladies
telluriques : Analyse bibliographique.**

Présenté par : Belouar Lamis
Slimani Rayane

Soutenu le :30/09/2020 .

Devant le jury :

Président : M^f Khoudour A. MAA

Encadrant: M^{me} Ziouche S. MCB

Examineur : M^f Moutassem D. MCB

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices, nos remerciements vont d'abord au Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Notre gratitude s'adresse à Mme Ziouche Siham pour son encadrement, son orientation, ses conseils et la disponibilité qu'elle nous a témoignée pour nous permettre de mener à bien ce travail .

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Mr A. Khoudour qui a accepté de présider le jury de soutenance, pour tout ce qu'il a pu nous apprendre ; qu'il trouve ici l'expression de notre profonde et sincère reconnaissance.

Mr M.Dahoo pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

Dédicace



Je dédie mon travail

*A mes très chers parents, source de vie d'amour
et d'affection*

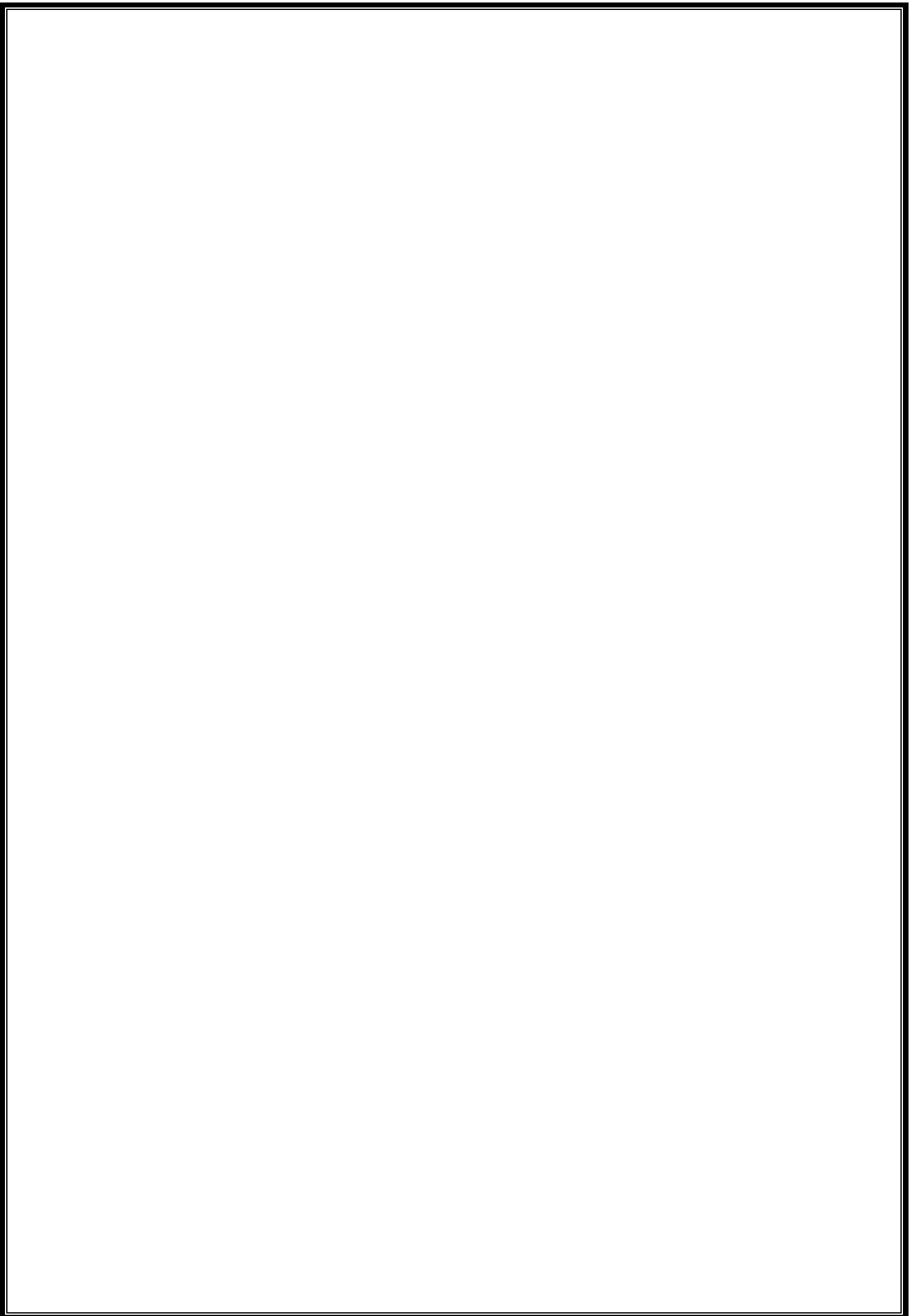
A mes chers frères et ma sœur et leurs enfants

*A mon mari et mes beaux parents, ma deuxième
famille*

A tous mes amis particulièrement Laarem

A Rayane, chère amie d'avant d'être binôme





Dédicace



Je dédie mon travail

*A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source
d'amour Ma mère*

*A mon support dans la vie, qui m'a supporté et ma dirigé vers
la gloire Mon père*

*A mes chers frères et sœurs et leurs enfants, source de joie et
de bonheur*

A toutes mes collègues

A l'âme de mes grands parents qui nous a quittées

A Lamis, chère amie d'avant d'être binôme

A mes meilleures amies : Laarem, Imane, Sonia, Chouaib



La biofumigation une opportunité dans la gestion des ravageurs et maladies telluriques : Analyse bibliographique.

Résumé

La gestion des ravageurs et des maladies du sol dans les systèmes de culture est souvent très difficile. L'élimination progressive du bromure de méthyle met cela en évidence. Des alternatives diversifiées sont nécessaires pour remplir différents rôles dans le spectre de la lutte contre les ravageurs et les maladies transmises par le sol, mais la flexibilité est limitée, car les aspects pratiques exigent qu'elles s'intègrent dans une méthodologie prophylactique. Les cultures intermédiaires de crucifères présentent un fort potentiel de gestion des bioagresseurs (champignons, bactéries, nématodes, adventices, ...) via la production de métabolites secondaires à effet biocide, les glucosinolates. Ces effets allélopathiques peuvent avoir lieu lors de la période de culture mais ils sont accentués lors de la destruction des couverts lorsqu'une grande quantité de glucosinolates est dégradée dans le sol (principe de biofumigation). Ces dernières années, la biofumigation est devenue une alternative non chimique efficace pour lutter contre les ravageurs. Tel que défini à l'origine, le terme «biofumigation» démontre les effets suppressifs de la famille des plantes Brassicaceae sur les pathogènes nocifs du sol et est spécifiquement attribué à la libération d'isothiocyanates biocides (ITC) due à l'hydrolyse des glucosinolates (GSL, thioglucosides) présents dans les résidus de culture, catalysée par les isoenzymes myrosinase (MYR, β -thioglucoside glucohydrolase), ces isothiocyanates chimiquement sont similaires à l'isothiocyanate de méthyle, l'agent actif du fumigant synthétique métam sodium, qui est utilisé comme substitut du bromure de méthyle dans certains systèmes.

Mots-clés: Bioagresseurs, Biocontrôle, Biofumigation, Glucosinolates, Brassicacées, Pathogènes.

Biofumigation, an opportunity in the management of land-based pests and diseases: Literature review.

Abstract

Managing soil pests and diseases in cropping systems is often very difficult. The phasing out of methyl bromide demonstrates this. Diversified alternatives are needed to fulfill different roles in the spectrum of soil-borne pest and disease control, but flexibility is limited, as the practicalities demand that they fit into a prophylactic methodology. Intermediate cruciferous crops have a strong potential for managing pests (fungi, bacteria, nematodes, weeds, etc.) via the production of secondary metabolites with a biocidal effect, glucosinolates. These allelopathic effects can occur during the cultivation period but they are accentuated during the destruction of the covers when a large quantity of glucosinolates is degraded in the soil (principle of biofumigation). In recent years, biofumigation has become an effective non-chemical alternative for pest control. As originally defined, the term 'biofumigation' demonstrates the suppressive effects of the Brassicaceae plant family on harmful soil pathogens and is specifically attributed to the release of biocidal isothiocyanates (ITCs) due to the hydrolysis of glucosinolates. (GSL, thioglucosides) present in crop residues, catalyzed by the isoenzymes myrosinase (MYR, β -thioglucoside glucohydrolase), these isothiocyanates chemically are similar to methyl isothiocyanate, the active agent of the synthetic fumigant metam sodium, which is used as a substitute for methyl bromide in some systems.

Keywords : Pests and diseases, Biocontrol, Biofumigation, Glucosinolates, Brassicaceae, Pathogens.

التبخير البيولوجي ، فرصة في إدارة الآفات والأمراض التي تنتقل عبر التربة: مراجعة أدبية .

ملخص

غالبًا ما تكون إدارة آفات التربة وأمراضها في أنظمة المحاصيل صعبة للغاية. يوضح التلخص التدريجي من بروميد الميثيل ذلك. هناك حاجة إلى بدائل متنوعة للقيام بأدوار مختلفة في مجموعة مكافحة الآفات والأمراض التي تنتقل عن طريق التربة ، لكن المرونة محدودة ، حيث تتطلب الإجراءات العملية أن تتوافق مع منهجية وقائية. تتمتع محاصيل صليبيات الأعلاف الوسيطة بإمكانية قوية لإدارة الآفات (الفطريات والبكتيريا والديدان الخيطية والأعشاب الضارة ، الخ) عن طريق إنتاج المستقلبات الثانوية مع تأثير مبيد حيوي ، الجلوكوزينات. يمكن أن تحدث تأثيرات فعالة خلال فترة الزراعة ولكنها تتفاقم أثناء تدمير الأغذية عندما تتحلل كمية كبيرة من الجلوكوزينات في التربة (مبدأ التبخير الحيوي). في السنوات الأخيرة، أصبح التبخير الحيوي بديلاً فعالاً غير كيميائي لمكافحة الآفات. كما تم تعريفه في الأصل ، يوضح مصطلح "التبخير الحيوي" التأثيرات القمعية لعائلة براسيكا على مسببات الأمراض الضارة بالتربة ويُنسب تحديداً إلى إطلاق إيزوثيوسيانات مبيد حيوي (ITC) بسبب التحلل المائي للجلوكوزينات (GSL ، ثيوجلوكونيدات) الموجودة في بقايا المحاصيل ، المحفزة بواسطة إنزيمات ميروزيناز (مير ، بيتا ثيوجلوكونازيد وجليكوهيدرولاز) ، هذه الإيزوثيوسيانات مماثلة كيميائياً للميثيل ، العامل النشط في التبخير الاصطناعي ميتام الصوديوم ، والذي يستخدم كبديل لبروميد الميثيل في بعض الأنظمة.

الكلمات المفتاحية: الآفات والأمراض ، مكافحة الحويمة ، التلوث الحيوي ، الجلوكوزينات ، براسيكا، مسببات الأمراض.

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Introduction **Erreur ! Signet non défini.**

1. Les maladies d'origine tellurique **Erreur ! Signet non défini.**

1.1. Epidémiologie et particularités des maladies d'origine tellurique **Erreur ! Signet non défini.**

1.1.1. Caractéristiques des maladies d'origine tellurique **Erreur ! Signet non défini.**

1.1.2. Difficultés d'étude et de gestion des maladies d'origine tellurique

2. La protection intégrée pour limiter les agents pathogènes telluriques des cultures.....

2.1. La protection des cultures..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.2. Les différentes méthodes de lutte en protection des cultures **Erreur ! Signet non défini.**

2.2.1. La lutte chimique..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.2.2. La lutte culturale..... **Erreur ! Signet non défini.**

La lutte biologique..... **Erreur ! Signet non défini.**

3. La biofumigation entant que moyen de lutte **Erreur ! Signet non défini.**

3.1. Développement du concept de biofumigation **Erreur ! Signet non défini.**

3.2. Principe de la biofumigation **Erreur ! Signet non défini.**

3.2.1. Mode d'action des crucifères..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3. Conditions de réussite de biofumigation **Erreur ! Signet non défini.**

3.3. Impact de la biofumigation sur les bioagresseurs des cultures..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.1. Impact sur les adventices..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.2. Impact sur les microorganismes **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.2.1. Effet sur les champignons telluriques..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.2.2. Effet sur les bactéries telluriques..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.3. Impact sur les nématodes..... **Erreur ! Signet non défini.**

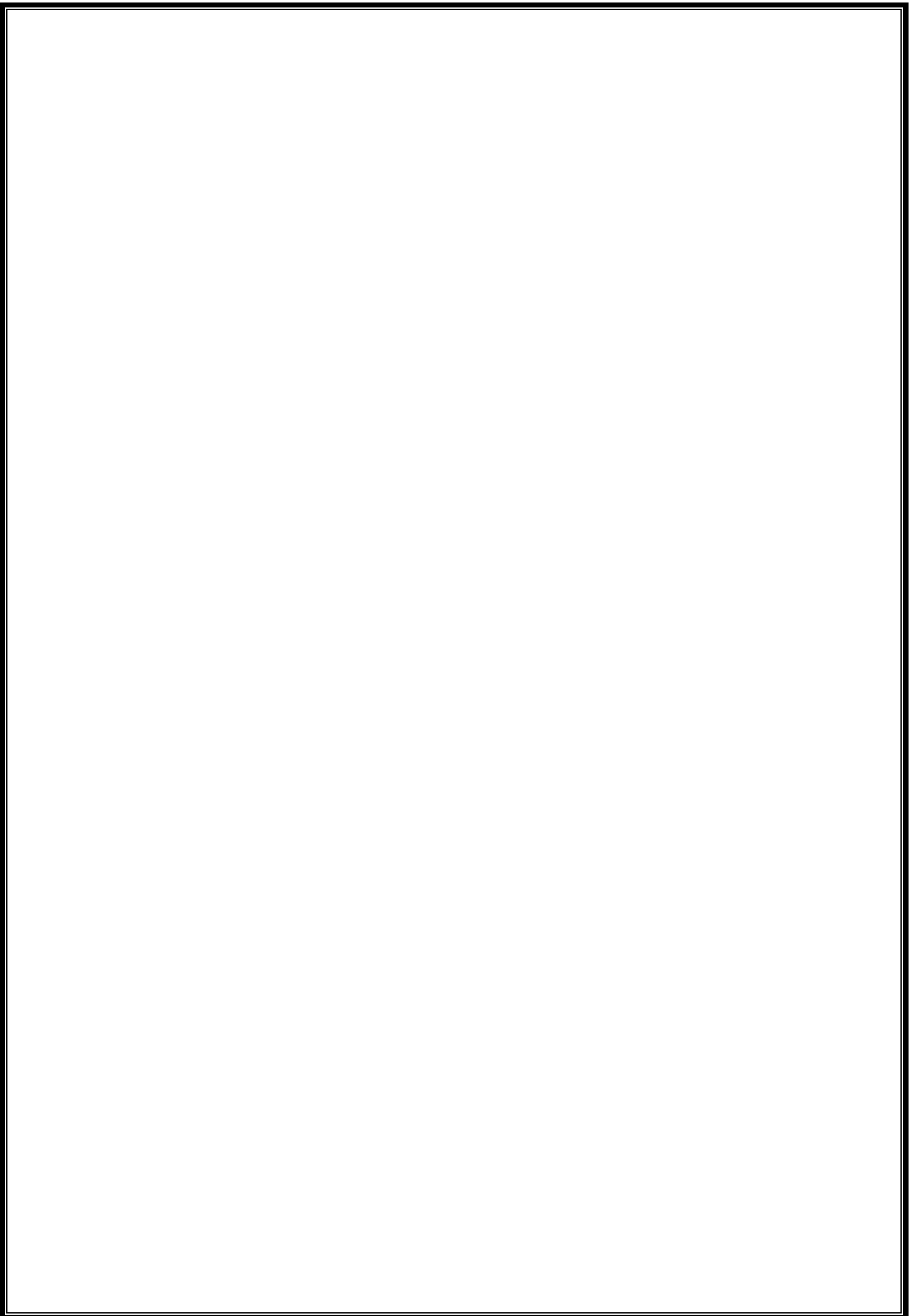
3.3.3.1. Effet sur les nématodes phyto-parasitaires **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.3.2. Effet sur les nématodes antagonistes **Erreur ! Signet non défini.**

Conclusion

..... **Erreur ! Signet non défini.**

Références bibliographique



Liste des figures

Figure 1 Schéma général de la chaîne de transmission de la maladie pour les champignons pathogènes tellurique (d'après Gilligan, 1985)..... **Erreur ! Signet non défini.**

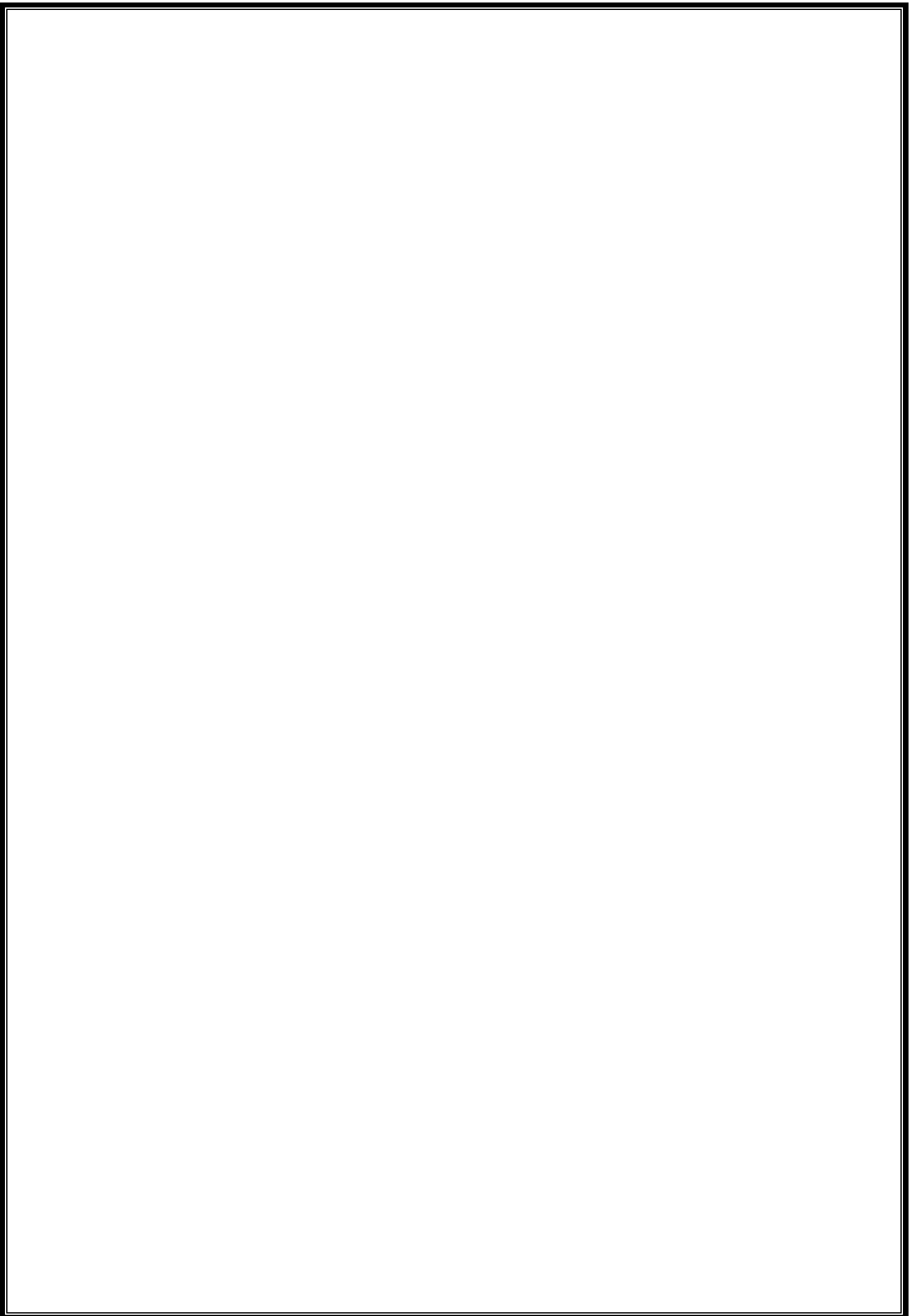
Figure 2 Exemples de mise en place de stratégies diverses dans le cadre de la protection intégrée des cultures (lucas, 2007) **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 3 : Représentation schématique de la réaction au niveau de la cellule végétale, qui résulte dans la formation des gaz nécessaires pour la biofumigation..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 4 Hydrolyse et principaux produits de dégradation des glucosinolates. .. **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des abréviations

- C° : degré Celsius.
- Cm : Centimètre.
- CMA : champignons mycorhiziens à arbuscule.
- FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GSL : glucosinolates.
- ITC : isothiocyanates.
- J2 : deuxième stade.
- méthyl ITC : le méthyl isothiocyanate.
- mm : Millimètre.
- NKP : populations de nématodes à kystes.
- OGM : organisme génétiquement modifié.



Introduction

Au sortir de la seconde Guerre Mondiale, l'intensification de l'agriculture a permis d'augmenter les rendements des cultures tout en diminuant les coûts de production, assurant ainsi la sécurité alimentaire des pays développés et amorçant la révolution verte dans les pays en développement. Toutefois, les pratiques de l'agriculture intensive, par l'utilisation parfois excessive d'intrants chimiques (engrais et produits phytosanitaires) ont été également accusées d'être à l'origine de nombreux problèmes comme la pollution des eaux des nappes et de surface (IFEN, 2007), l'érosion de la biodiversité dans les champs et leurs abords (Krebs et *al.*, 1999) et l'amplification de l'effet de serre par émission de gaz comme le dioxyde de

carbone et le protoxyde d'azote l'agriculture (Secten, 2007). A cet effet, le XXIème siècle s'est caractérisé par la recherche d'alternatives aux pratiques intensives, et différents concepts sont nés ou ont été revisités dans le but de définir une agriculture durable qui permettrait de produire autant mais à faible coût environnemental (Motisi, 2009).

Le contrôle ou la réduction des maladies d'origine tellurique constituent un problème particulier pour les agriculteurs et les scientifiques en raison de la difficulté à cibler l'ensemble de la niche écologique dans laquelle l'agent pathogène se trouve. Les méthodes de lutte actuelles reposent essentiellement sur des méthodes de désinfection des sols avec l'utilisation de fumigants, souvent très coûteux d'un point de vue économique et environnemental, ou de solarisation des sols qui ont l'inconvénient d'être des méthodes de lutte non ciblées et à large spectre (Stromberger et *al.*, 2005, Scopa et Dumont, 2007).

Un moyen de protection efficace contre les pathogènes telluriques est la diversification des cultures dans la rotation, fondée sur la succession de cultures hôtes et non hôtes de l'agent pathogène (Motisi, 2009). L'effet biocide peut avoir lieu lors de la période de culture par la libération en continue des métabolites ou être accentué lors de la destruction des couverts par libération et dégradation d'une grande quantité de composés biocides, c'est le principe de biofumigation (Matthiessen et Kirkegaard, 2006).

L'objectif de ce mémoire est de proposer une synthèse bibliographique des principaux effets allélopathiques liés à la biofumigation par des couverts de crucifères sur les bioagresseurs des cultures. La première partie abordera le cas particulier de la production de GSL par les crucifères. Une seconde partie abordera les effets des couverts de crucifères respectivement sur les communautés fongiques, bactériennes, sur les nématodes et sur les adventices.

1. Les maladies d'origine tellurique

1.1. Epidémiologie et particularités des maladies d'origine tellurique

1.1.1. Caractéristiques des maladies d'origine tellurique

Contrairement aux maladies aériennes dont les agents pathogènes ont généralement un fort pouvoir de dispersion et dont la gestion doit se réfléchir à l'échelle de l'exploitation, les maladies d'origine tellurique sont inféodées à la parcelle car l'inoculum primaire ne peut généralement pas se disperser sur de grandes distances. Pour ces maladies, la transmission se fait par croissance du pathogène d'une source à la plante hôte sur de courtes distances (quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres). Le réservoir d'inoculum dans le sol est donc une composante très importante de l'épidémie (Figure 1), cet inoculum pouvant se conserver en l'absence de plante sensible, sous forme saprophytique, c'est-à-dire sur les résidus de culture de la plante hôte (Doré et al, 2009).

L'inoculum initial ou primaire est à l'origine des premières infections racinaires (infections primaires) produisant des tissus infectieux desquels la transmission peut se poursuivre via les infections secondaires d'un site infecté d'une racine à un autre site sur la même racine (auto-infections), ou à partir d'une racine infectée jusqu'aux racines voisines (allo-infections) (Figure 1) (Gilligan, 1985 ; Jeger et *al.*, 1987). Ceci correspond à une dynamique polycyclique. Du fait de la dispersion restreinte du pathogène dans l'espace, cela se traduit généralement par l'apparition de foyers de plantes malades. Ainsi, pour les maladies telluriques, le développement épidémique à l'intérieur d'un cycle cultural donné va être en grande partie dépendant de la quantité d'inoculum primaire et donc du développement épidémique de l'année précédente. Cette dynamique épidémique est décrite comme polyétique (Zadoks, 1999), c'est-à-dire à récurrence pluriannuelle ou pluri-saisons lorsque plusieurs cultures se succèdent une même année.

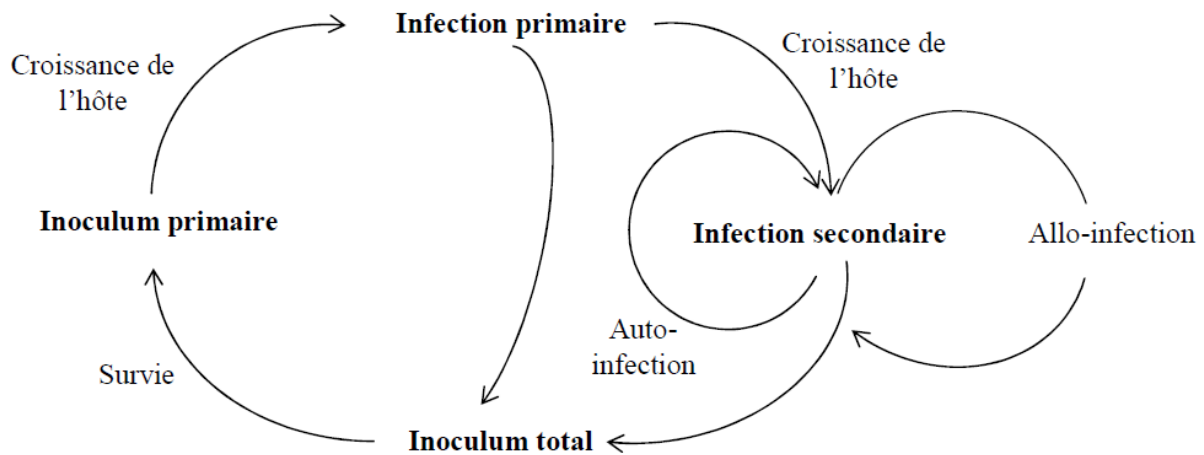


Figure 1. Schéma général de la chaîne de transmission de la maladie pour les champignons pathogènes telluriques (Gilligan, 1985).

1.1.2. Difficultés d'étude et de gestion des maladies d'origine tellurique

Le compartiment sol, souvent qualifié de « boîte noire », est un environnement opaque et complexe qui contraint l'étude et la gestion des maladies d'origine tellurique (Lucas, 2006).

D'un point de vue expérimental, il est très difficile d'observer les agents pathogènes dans leurs habitats naturels sans entraîner de perturbations de leur environnement (Lucas, 2006). L'étude de ces bio-agresseurs du sol se heurte en effet à différents niveaux de difficultés. Tout d'abord les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol, qui conditionnent le développement des agents pathogènes et leur expression sur la plante hôte sont l'objet d'interactions complexes. Ensuite, l'identification, l'observation et la quantification des processus épidémiques qui sont le plus souvent souterrains (phase de survie, phase de dissémination et de croissance de l'inoculum, phase infectieuse), constituent une difficulté expérimentale majeure. Ainsi, l'observation des symptômes impose le plus souvent un échantillonnage destructif qui rend problématique le suivi des épidémies au cours du temps : des prélèvements destructifs perturbent inévitablement la dynamique de la maladie et du fait de l'hétérogénéité spatiale de ces maladies (développement en foyer), les mesures réalisées présentent généralement une forte variabilité. De plus, le recueil de données de progression de maladie étant coûteux en temps (car l'observation des symptômes nécessite généralement des arrachages et le nettoyage des plantes), les données quantitatives sont généralement moins abondantes que lors d'études de maladies aériennes, ce qui implique que

la qualité statistique et biologique des données devient critique pour l'analyse et la modélisation des courbes de maladies (Gilligan, 1990b).

D'un point de vue pratique, la gestion des pathogènes telluriques est également délicate car il est très difficile de cibler les niches écologiques dans lesquelles l'agent pathogène se trouve (Lucas, 2006). Ces microorganismes (principalement les champignons) sont le plus souvent sous forme de vie ralentie dans des structures de conservation plus résistantes que les formes de vie active (mycélium). Le passage de l'état de vie ralentie à l'état de croissance active est sous le contrôle complexe des conditions environnementales qui rendent difficilement prévisible l'intensité de l'épidémie. De plus, il est impossible d'intervenir au moment où les symptômes apparaissent, par défaut de fongicides à systémier descendante utilisables en végétation. (Doré et al ,2009).

La pratique la plus répandue est la désinfection des sols avant culture, mais reste une pratique spécialisée et n'est ni économiquement rentable en grandes cultures, ni écologiquement satisfaisante. En effet, par son caractère non spécifique conduisant à la destruction d'une grande partie des microorganismes, la désinfection des sols entraîne des changements importants au sein des communautés microbiennes (Deguine et al, 2008). Enfin, comme les résistances variétales sont rares dans le cas des maladies d'origine tellurique, afin de pouvoir proposer aux agriculteurs des méthodes durables de gestion des maladies d'origine tellurique, il devient important de raisonner la gestion des agents pathogènes en terme de protection intégrée des cultures en intégrant les connaissances sur les systèmes agronomiques ainsi que sur la biologie et l'épidémiologie des bio-agresseurs ciblés dans la lutte.(Doré et al, 2009)

2. La protection intégrée pour limiter les agents pathogènes telluriques des cultures

2.1. La protection des cultures

L'absence de méthodes curatives efficaces pour limiter les populations de bioagresseurs a longtemps conduit les systèmes de culture à s'orienter vers un compromis entre augmentation du potentiel de production et minimisation des risques phytosanitaires par l'adoption de méthodes agronomiques préventives (jachère, rotation des cultures etc.) (Lucas, 2007). Avec le développement de l'industrie chimique, les systèmes de culture se sont ensuite construits autour d'un possible recours aux pesticides, et la possibilité de maîtriser les bioagresseurs au moment où les symptômes apparaissent. Mais grâce à l'acquisition de connaissances sur les pathogènes visés, les méthodes de lutte sont passées rapidement de la lutte systématique (selon des calendriers de traitements), à la lutte chimique raisonnée où l'utilisation de seuils de tolérance économique permettait de définir des niveaux acceptables de dégâts ou de pertes des cultures (seuils de nuisibilité). Alors que la Parmi ces composés, les ITC ont un effet biocide général plus important que les nitriles ou que les thiocyanates (Van Dam et al, 2009). FAO, en 1967, recommandait déjà la recherche et la mise en œuvre d'alternatives à l'utilisation des pesticides avec le concept de lutte intégrée qui visait soit à limiter l'utilisation des pesticides soit à retarder au dernier moment leur utilisation, la prise de conscience sur l'intérêt de rechercher des alternatives est assez récente (Ferron et Deguine, 2004).

Le concept de lutte intégrée a ensuite évolué vers celui de protection intégrée des cultures qui mettait l'accent sur l'idée de protéger la culture plutôt que sur celle de lutter contre des bioagresseurs. Le but n'est plus alors de chercher les meilleurs ajustements permettant de limiter l'utilisation de pesticides mais d'adapter les pratiques en prenant en compte les conditions dans lesquelles la culture est implantée, le cortège de bioagresseurs dans son ensemble, et de rassembler les connaissances sur la biologie des bioagresseurs pour ajuster les interventions sur les différentes étapes du cycle de développement des bioagresseurs (Lucas, 2007).

La Figure 2 présente un exemple. Ce concept a été élargi à celui de production intégrée, apparu en 1977, dans le bulletin de l'OILB/SROP « Vers la production agricole intégrée, par la lutte intégrée », concept plus ambitieux qui prend en compte l'ensemble de l'exploitation et l'environnement du champ cultivé (bordures, haies...) en intégrant l'ensemble

des effets des systèmes de culture sur l'agro écosystème. La priorité est donnée à la qualité des productions et des produits en minimisant l'utilisation des produits agrochimiques et leurs effets secondaires indésirables sur l'environnement et la santé humaine tout en conciliant avec un revenu durable pour les agriculteurs.

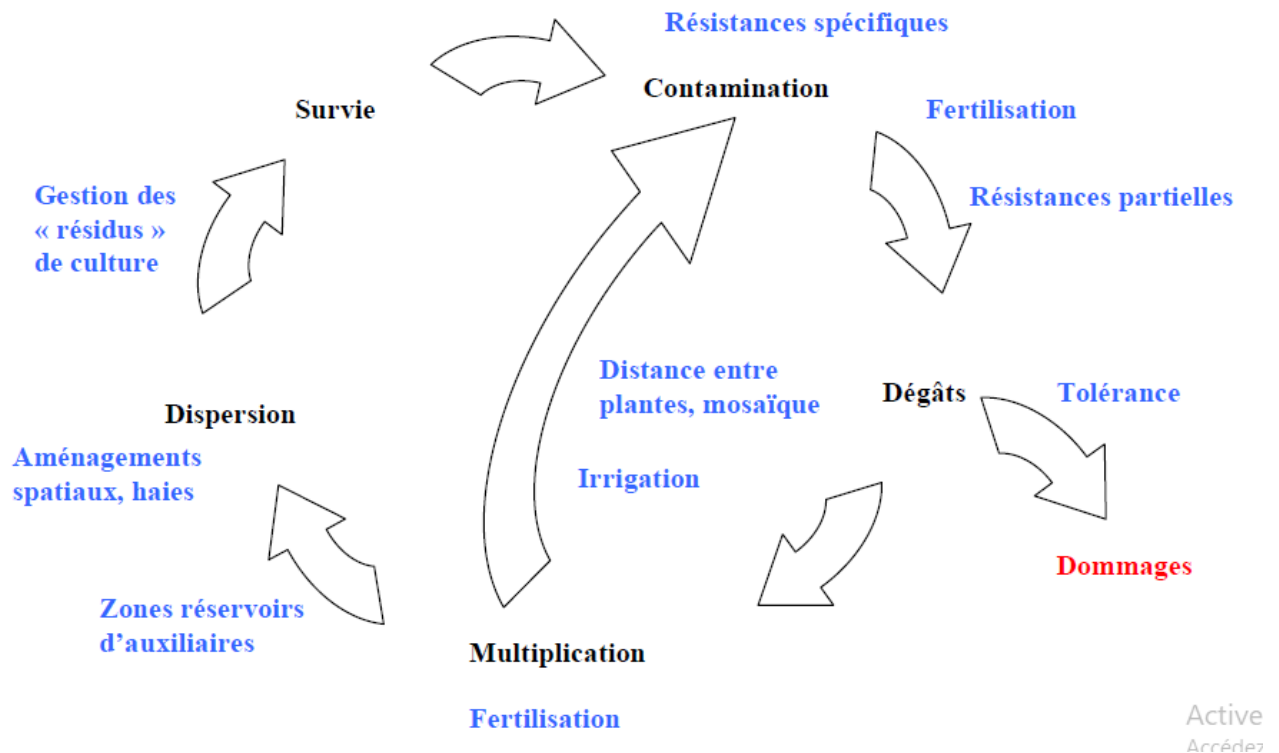


Figure 2. Exemple de mise en place de stratégies diverses dans le cadre de la protection intégrée des cultures (Lucas, 2007).

Les concepts de protection et de production intégrée se fondent de manière explicite sur l'utilisation délibérée des éléments naturels ou des processus de régulation naturelle permettant de se prémunir de l'environnement préjudiciable à la culture et sur la recherche de méthodes alternatives ou innovantes pour y parvenir. La suite de cette synthèse traite de la mise en place d'une technique innovante de gestion des pathogènes telluriques pendant la période d'interculture (Doré et al, 2009).

La méthode de lutte classiquement préconisée contre les organismes nuisibles aux cultures repose sur des traitements chimiques curatifs, dont les effets indirects sont souvent nocifs pour l'homme et la biosphère (Ferron, 2000). Cependant, ses effets secondaires sur l'environnement et la santé ne s'avèrent pas compatibles avec une exploitation durable des agro-écosystèmes (Deguine et Ferron, 2004). C'est pourquoi il est aujourd'hui proposé

d'adopter une stratégie globale de protection intégrée des cultures, donnant la priorité à une méthode préventive et aux solutions biologiques d'intervention (Ferron, 2000).

2.2. Les différentes méthodes de lutte en protection des cultures

2.2.1. La lutte chimique

Il existe une variété de produits chimiques qui ont été conçus pour lutter contre les maladies des plantes en inhibant la croissance ou en tuant les agents pathogènes. Les produits chimiques utilisés pour lutter contre les insectes (insecticides), les champignons (fongicides) et les nématodes (nématocides) peuvent être appliqués sur les graines, le feuillage, les fleurs, les fruits ou le sol. (Rocher, F. 2004).

Ils préviennent ou réduisent les infections en utilisant divers principes de contrôle des maladies. Les éradiants sont conçus pour tuer un agent pathogène qui peut être présent dans le sol, sur les graines ou sur les organes de multiplication végétative, tels que les bulbes et les tubercules. Les agents de protection placent une barrière chimique entre la plante et l'agent pathogène. Des produits chimiques thérapeutiques sont appliqués pour lutter contre une infection en cours (Shurtleff et Averre, 1997).

La lutte raisonnée (entendue comme lutte chimique raisonnée) fait ensuite intervenir la notion de seuils de tolérance (ou de nuisibilité), en deçà duquel la nuisibilité du bioagresseurs ne justifie pas la réalisation d'un traitement au plan économique. (Lucas, 2007).

C'est l'application de pesticides sans effets secondaires négatifs, assurant ainsi la sauvegarde des organismes auxiliaires, si le seuil de tolérance économique pour la culture considérée est effectivement dépassé (Lucas, 2007).

2.2.2. La lutte culturale

En agriculture, la lutte culturale est une méthode de lutte contre les déprédateurs et maladies des plantes cultivées et contre les mauvaises herbes qui fait appel à des techniques culturales ou des méthodes de culture adaptées. Ces techniques visent à défavoriser le développement des parasites et des adventices en modifiant leur environnement naturel et en perturbant leur cycle biologique. Elles peuvent inclure, par exemple, la pratique de rotations culturales adaptées, la modification du pH du sol, le niveau de fertilisation, les techniques d'irrigation, le paillis, l'élimination des résidus de récolte, etc. ... (Anonyme, 2014).

Parmi les méthodes culturales utilisées en protection des plantes nous avons :

- ✓ **Travail du sol :** le labour avant l'hiver à une certaine profondeur peut perturber le cycle de vie de certains bioagresseurs (Hillock et Bolin, 2004).
- ✓ **Le binage mécanique :** est une technique de désherbage efficace dans les cultures sarclées (Hillock et Bolin, 2004).
- ✓ **Rotation des cultures :** La rotation des cultures consiste à semer ou planter en alternance, à un endroit donné, des espèces végétales non apparentées afin de limiter les risques de colonisation du sol par les organismes pathogènes ou des ravageurs spécifiques à une culture donnée. Cette pratique a pour objet d'entretenir la fertilité du sol, mais elle permet aussi de rompre le cycle biologique de divers ennemis des cultures, qu'il s'agisse de ravageurs, d'agents pathogènes, de mauvaises herbes ou de plantes parasites (MAAA ,2016).
- ✓ **Cultures pièges (Faux semis) :** les cultures pièges permettent de détourner les insectes des plants qu'on souhaite protéger. Pour ce faire, près de la culture principale, on fait pousser une espèce que le ravageur préfère. des plantes capables d'attirer les ravageurs, généralement des insectes, pour les éloigner de la culture principale et ainsi éviter ou limiter les traitements insecticides. (MAAA ,2016).
- ✓ **Fertilisation :** La fertilisation est essentielle au maintien des plantes dans un état de santé assez bon pour leur permettre de résister aux ravageurs. (MAAA ,2016).
- ✓ **Moyens mécaniques :** Le contrôle mécanique c'est l'utilisation de techniques pratiques ainsi que d'équipements simples, d'appareils et d'ingrédients naturels qui fournissent une barrière protectrice entre les plantes et les bioagresseurs. La lutte mécanique promeut une position écologiquement rationnelle sur l'utilisation des pesticides et des engrais, la qualité de l'eau, la conservation des ressources et la gestion des déchets solides (Hillock et Bolin, 2004).

2.2.3. La lutte biologique

La découverte de résistance chez les ravageurs visés par les pesticides et des effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes porte à réflexion sur ce qui semblait être une solution miracle. Existe-t-il des méthodes alternatives de luttés, plus écologiques? (Louchahi, 2015).

La lutte biologique présente naturellement dans la plupart des écosystèmes, elle peut être résumée par le contrôle d'un organisme problématique par un de ses ennemis naturels. La

lutte biologique est ainsi définie: l'utilisation d'organismes vivants pour contrôler ou combattre un ravageur (Lambert, 2010).

Tout d'abord, les organismes vivants utilisés sont restreints à quelques groupes taxonomiques. On retrouve entre autres certains arthropodes (insectes et arachnides), nématodes, protozoaires, bactéries et champignons. Ces organismes, ennemis naturels des ravageurs visés, sont aussi nommés auxiliaires de lutte (Lambert, 2010).

❖ Si l'organisme antagoniste est un microorganisme, on parle de lutte microbiologique. L'agent pathogène auxiliaire peut être un Champignon, une Bactérie, un Virus, un Protozoaire. Il infecte l'hôte en général par ingestion et possède une forme de résistance lui permettant de passer - et de demeurer - dans le milieu (sol, feuillage litière). L'agent pathogène se multiplie dans l'hôte et cause sa mort par destruction de tissus, par septicémie, parfois par l'émission d'une substance toxique (cas de Bactéries). Les cadavres de l'hôte libèrent les agents pathogènes dans le milieu (Jourdheuil et al, 1991).

❖ Si l'organisme antagoniste peut, à la suite de son apport par l'Homme au contact de l'insecte cible, se développer et se maintenir aux dépens de cet Insecte sans nécessiter une nouvelle intervention, on est dans le cas de la lutte biologique par acclimatation. Ainsi en est-il lorsqu'on fait appel à un entomophage ou à un agent pathogène exotique contre un ravageur précédemment introduit ou parvenu naturellement d'une autre région du globe. En cas d'acclimatation réussie et d'efficacité suffisante, la lutte biologique « s'effectue toute seule » l'auxiliaire devenant un agent efficace et permanent (sur de nombreuses années au moins) de la répression du ravageur. L'effort initial est particulièrement bien valorisé (Jourdheuil et al, 1991).

3. La biofumigation entant que moyen de lutte

3.1. Développement du concept de biofumigation

Le bromure de méthyle, longtemps utilisé comme principal fumigant en agriculture, a connu un grand succès à travers le monde car ses performances étaient reproductibles partout sans modifications des systèmes de culture en place (Matthiessen et Kirkegaard, 2006). Cependant, les effets délétères qu'il provoque sur la couche d'ozone ont entraîné l'interdiction de son utilisation en 2005 dans les pays développés et en 2015 dans les pays en voie de développement (Protocole de Montréal, UNEP, 1987).

Le métham sodium est depuis longtemps utilisé comme substitut au bromure de méthyle pour la gestion de nombreux bioagresseurs telluriques en production de pomme de terre et dans les systèmes modérément intensifs. Il produit, en conditions humides, le méthyl isothiocyanate (méthyl ITC) qui a une activité biocide à large spectre contre les nématodes, les champignons pathogènes, insectes et adventices (Richardson et Thorn, 1969) et qui se décompose rapidement en un composé non toxique pour la santé humaine et ne présente pas les dangers que présentent certains autres pesticides de synthèse (Lloyd, 1961). En fait le méthyl ITC est un composé qui existe dans la nature ; il fait partie de la famille des isothiocyanates, composés qui se caractérisent par une structure chimique commune mais qui varient les uns des autres par leur groupe fonctionnel R.

Le terme biofumigation, a pour la première fois été utilisé par Kirkegaard et al. 1993 pour désigner l'effet toxique des Brassicacées sur les bioagresseurs du sol, effet issu principalement de la libération des isothiocyanates (ITC) après hydrolyse des glucosinolates (GSL). Ce terme permettait de distinguer le phénomène particulier de suppression de l'activité de certains microorganismes du phénomène général de l'allélopathie (cf. glossaire) qui a longtemps été observé chez les Brassicacées et qui leur valu leur réputation de « poor companion plants » (qui serait traduit en français par « mauvaise culture associée ») (Matthiessen et Kirkegaard, 2006).

La technique de biofumigation comme elle l'a été définie au départ, repose sur l'implantation pendant la phase d'interculture, d'une culture ayant des propriétés assainissantes, c'est-à-dire capable de libérer des composés toxiques vis-à-vis des bioagresseurs ciblés (Matthiessen et Kirkegaard, 2006). Ces composés toxiques (les ITC dans le cas des Brassicacées) sont principalement libérés après broyage des résidus. Dans le cas de l'utilisation d'une culture de Brassicacées, le potentiel toxique maximal est atteint au moment de la floraison de la culture (moment où le taux de GSL dans les tissus est maximum), c'est à ce moment que le couvert est détruit par broyage et les résidus enfouis dans le sol (généralement dans les dix premiers centimètres). La période pendant laquelle les résidus après avoir libéré leurs composés toxiques vont se décomposer dans le sol va être de longueur variable suivant le délai de retour de la culture commerciale (Denis et al, 2010 ; Hansen, 2011).

3.2. Principe de la biofumigation

Sous le terme biofumigation on comprend l'utilisation de gaz toxiques d'origine biologique qui peuvent éradiquer des pathogènes, ravageurs ou mauvaises herbes. Contrairement au bromure de méthyle, qui a un effet très large, les gaz de biofumigation sont sélectifs, c'est à dire ils n'ont d'effet que contre certains organismes nuisibles. Plusieurs espèces végétales, mais aussi certaines espèces fongiques, se prêtent à la biofumigation, car elles dégagent des gaz toxiques lors de leur dégradation. Actuellement, ce sont surtout des crucifères, qui sont utilisées pour la biofumigation. Les cellules de ces plantes contiennent des glucosinolates qui sont transformés en isothio- et thiocyanates lors de dégradation de la plante (Michel, 2008).

Selon l'espèce de plante, voire même la variété, est la composition de glucosinolates, qui est un groupe constitué de plusieurs molécules, différente. La composition de glucosinolates détermine quels isothio- et thiocyanates sont formés. Certains glucosinolates ne forment aucun isothio- et thiocyanate. Les isothio- et thiocyanates englobent un groupe de molécules qui sont d'une part volatiles et d'autre part toxiques. C'est la composition des molécules formées qui détermine l'efficacité du gaz libéré, car la toxicité varie selon la molécule. Outre la toxicité potentielle du gaz c'est la sensibilité de l'organisme visé (champignon, bactérie, insecte, nématode, mauvaises herbes) qui détermine l'efficacité de la biofumigation. Un isothiocyante qui se trouve dans les racines de colza est par exemple vingt fois plus toxique pour les champignons du genre *Sclerotinia* que pour ceux du genre *Alternaria*. (Michel, V. 2008).

Les cultures de couverture spécifiques de brassicacées sont de plus en plus populaires pour leur utilisation potentielle comme les biofumigants qui peuvent être utilisés pour réduire les maladies transmises par le sol. Les cultures de couverture brassicacées peuvent améliorer en outre la santé du sol, l'efficacité de l'utilisation des nutriments et la gestion des mauvaises herbes. La capacité de brassicacées pour produire des composés qui contrôlent les agents pathogènes a été bien documentée. Toutefois, la biofumigation a une variabilité inhérente; à savoir que: 1) les composés produits par différents brassicacées et leur efficacité relative sur différents agents pathogènes est variable; et 2) la capacité de amener ce potentiel sur le terrain a également été variable à ce jour. Biofumigation réussie d'où nécessite une compréhension avancée de la culture de plantes de couverture de brassicacées pour la biofumigation et les pratiques de biofumigation. (Reau et al, 2005)

Les chercheurs ont travaillé pour mesurer l'efficacité de la biofumigation sur le terrain, et également les pratiques de gestion qui maximisent le potentiel des cultures de couverture de brassicacées biofumigation, afin d'en faire un outil IPM efficace. Recommandations actuelles pour les producteurs souligner que les cultures de couverture de brassicacées doivent être traitées comme des cultures de rapport pour avoir une biofumigation potentiel. Les cultures de couverture ont besoin d'une fertilité suffisante et d'un contrôle des mauvaises herbes pour produire une masse critique de composés nécessaires à la biofumigation. Les producteurs sont également encouragés à mettre fin à la couverture de brassicacées cultures avec des pratiques qui maximisent le contact entre les composés de biofumigation et le sol agents pathogènes. (Reau, et al 2005).

3.2.1. Mode d'action des crucifères

Les *Brassicaceae* ou *Cruciferae* (crucifères) sont des plantes à fleurs dicotylédones appartenant à l'ordre des brassicales. Annuelle, bisannuelles ou vivaces, le plus souvent herbacées, mais parfois arbustives, les Brassicacées sont importantes pour l'homme : elles sont productrices d'huiles, de plantes potagères ou condimentaires, de fourragères, de plantes ornementales, médicinales ou encore en tant qu'adventices des cultures, plantes de laboratoire, OGM... Les Brassicacées sont une famille ancienne, mais évoluée, homogène et diversifiée, adaptée à de nombreux milieux de vie. La famille des Brassicacées est cosmopolite : elle se retrouve à travers le monde entier. (Au jardin info ,2020).

Les Brassicacées contiennent des glucosinolates (GSL) dont la décomposition est capable de réduire la croissance des populations de champignons, bactéries ou nématodes du sol. Ces effets biocides sur les microorganismes sont représentés par le phénomène d'allélopathie. Les propriétés allélopathiques dépendent de la composition GLS des Brassicacées: la moutarde indienne et dans une moindre mesure le colza pourrait avoir l'action la plus puissante, la moutarde blanche aurait une action plus faible. Ces propriétés dépendent également des résidus de culture: un engrais vert à décomposition rapide entraînerait une action plus élevée que les résidus de culture après la récolte des céréales (Reau et al, 2005).

Les principaux mécanismes sont connus. *In vitro*, les isothiocyanates issus de la décomposition du GSL inhibent toutes les phases du cycle d'*Aphanomyces eutiches*, le champignon responsable de la pourriture des racines des pois. La croissance mycélienne de

Gaeumannomyces graminis tritici, le champignon responsable du blé, est inhibée par certains isothiocyanates à faible concentration (Reau et al, 2005).

Les isothiocyanates (ITCs) : produits de dégradation des glucosinolates, sont des molécules présentes dans diverses familles végétales dont les Brassicacées (Wilson, 2011).

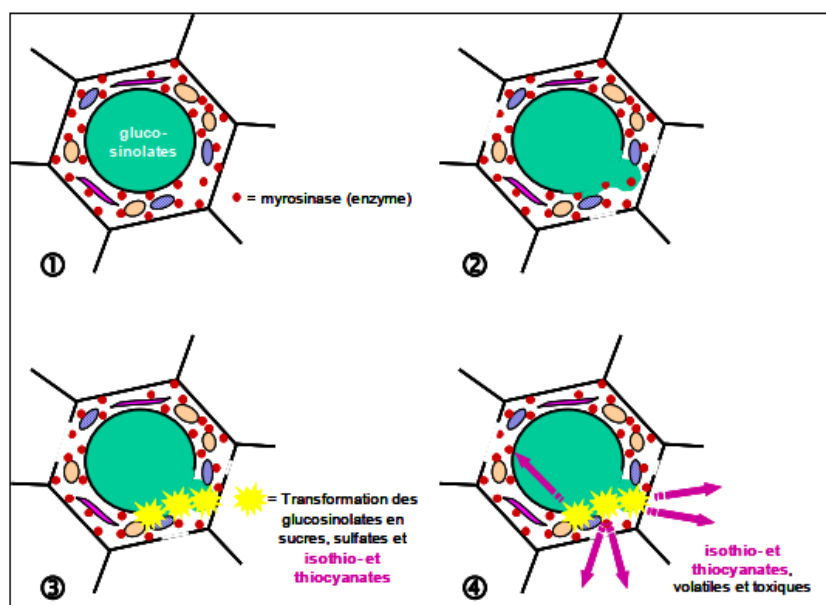


Figure 3. Représentation schématique de la réaction au niveau de la cellule végétale, qui résulte dans la formation des gaz nécessaires pour la biofumigation.

En contact avec la myrosinase, les glucosinolates sont transformés en glucose, sulfate et isothio- et thiocyanates. Les isothio- et thiocyanates, molécules toxiques et volatiles, quittent la cellule par des fissures dans la paroi cellulaire (Michel, 2008).

L'efficacité de la biofumigation est déterminée à la fois par la sensibilité de l'organisme visé et la toxicité potentielle du gaz libérée. La toxicité varie selon les molécules isothio- et thiocyanates formées lors de la décomposition des glucosinolates (Michel, 2008). Deuxièmement, la réaction se passe en présence d'eau, un sol humide est donc indispensable au bon déroulement de la biofumigation. Par ailleurs, des températures relativement basses (moins de 10°C) au moment de l'incorporation, ralentissent la transformation des glucosinolates et ne permettent pas d'atteindre les concentrations nécessaires en gaz toxique (Denis et al, 2010).

Pour la sélection des plantes biofumigants à utiliser, les critères à retenir seraient la teneur en glucosinolates, le type de molécule principal libéré et la capacité de la culture à produire une bonne biomasse. Les caractéristiques recherchées dans les variétés de crucifères à l'essai comportent donc à la fois une teneur élevée en glycosinolates et un potentiel saisonnier élevé de production de biomasse sèche. (Denis et al, 2010).

3.3. Conditions de réussite de biofumigation

La matière végétale utilisée dans la biofumigation doit être incorporée dans le sol immédiatement après le broyage. Il existe deux possibilités dont la première est l'enfouissement mécanique à l'aide d'une fraise ou d'une bêcheuse qui permet un enfouissement plus profond. La deuxième possibilité est une irrigation abondante qui entraîne les substances contenues dans les cellules depuis la surface dans des couches plus profondes du sol. Cette méthode est au moins aussi efficace pour une profondeur de 5 – 15 cm qu'un enfouissement mécanique, à condition que le broyage des plantes soit suffisamment fin et que la quantité d'eau appliquée soit assez élevée (40 mm ou plus). Une irrigation ne permet pas seulement un enfouissement des substances actives mais améliore aussi les conditions de transformation des glucosinolates en iso-thio- et thiocyanates. Cette réaction biochimique nécessite de l'eau. Pour cette raison une certaine humidité du sol est une condition indispensable pour le bon déroulement de la biofumigation. Surtout dans des conditions de sol séchardes, une irrigation est alors incontournable (Michel, 2008).

A part l'humidité du sol c'est la température du sol qui influence la vitesse de transformation des glucosinolates en isothio- et thiocyanates. Lors d'un semis au printemps ou tôt en été, l'incorporation se fait à un moment où le sol est bien réchauffé. En revanche, un semis tard en été peut conduire à des températures relativement basses (moins que 10°C) lors de l'incorporation, avec comme conséquence une transformation ralentie des glucosinolates qui ne permet pas d'atteindre les concentrations nécessaires de gaz toxiques. Un autre risque d'un semis tardif est un gel précoce avant l'incorporation, qui entraîne l'éclatement des cellules des plantes et provoque ainsi une réaction de biofumigation avant l'enfouissement des plantes dans le sol (Michel, 2008).

3.3. Impact de la biofumigation sur les bioagresseurs des cultures

Le terme biofumigation, a pour la première fois été utilisé par Kirkegaard et al.,(1993), pour désigner l'effet toxique des Brassicacées sur les bioagresseurs du sol, effet

issu principalement de la libération des isothiocyanates (ITC) après hydrolyse des glucosinolates (GSL). Ce terme permettait de distinguer le phénomène particulier de suppression de l'activité de certains microorganismes du phénomène général de l'allélopathie (Couëdel, et al. (2017).

Le principe de biofumigation a lui été introduit par Kirkegaard en 1993 et correspond à la suppression des pathogènes du sol par des composés biocides produits par les plantes principalement sous forme de métabolites secondaires. Les isothiocyanates (ITC) font partie des composés les plus biocides, ils sont fortement volatils et proviennent de la biodégradation de couverts végétaux contenant des glucosinolates (GSL). Les GSL sont des métabolites secondaires glucidiques soufrés principalement produits par les plantes de l'ordre des Capparales dont font partie les crucifères (Brassicaceae). A ce jour 132 glucosinolates provenant de 8 acides aminés ont été identifiés (Agerbirk et Olsen, 2012), ils diffèrent par la nature de leur chaîne latérale R. Celle-ci peut être linéaire, cyclique ou hétérocyclique formant ainsi respectivement des GSL de types aliphatiques, aromatiques ou indoles.

Lors du processus de biofumigation les GSL présents dans les vacuoles des cellules végétales rentrent en contact avec l'enzyme myrosinase pour former des composés biocides (Figure 07). Parmi ces composés, les ITC ont un effet biocide général plus important que les nitriles ou que les thiocyanates (Van Dam et al, 2009). En fonction de la classe de GSL dont proviennent les produits de dégradation, leur degré de toxicité général sera différent. Les ITC aliphatiques sont les plus volatils et sont peu adsorbables par la matière organique du sol, leur potentiel biocide sur les organismes vivants du sol est élevé. Les ITC aromatiques ont une toxicité de contact plus élevée que les ITC aliphatiques mais du fait de leurs structures ils sont, moins volatils. Les ITC indoles sont instables et se décomposent rapidement formant des ions thiocyanates toxiques (Couëdel et al, 2017).

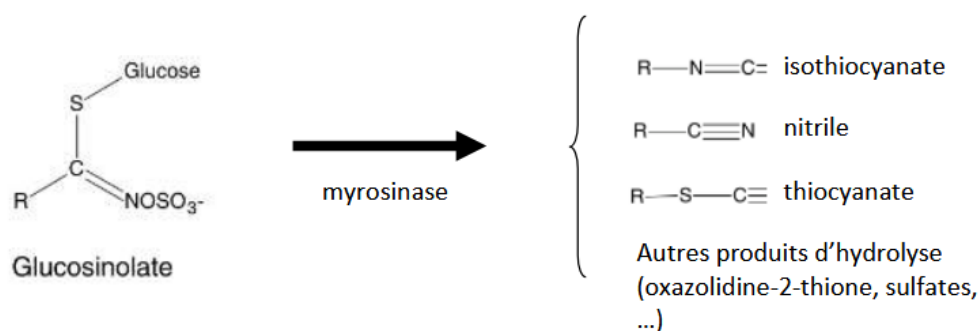


Figure 4 : Hydrolyse et principaux produits de dégradation des glucosinolates.

La technique de biofumigation comme elle l'a été définie au départ, repose sur l'implantation pendant la phase d'interculture, d'une culture ayant des propriétés assainissantes, c'est-à-dire capable de libérer des composés toxiques vis-à-vis des bioagresseurs ciblés. Ces composés toxiques (les ITC dans le cas des Brassicacées) sont principalement libérés après broyage des résidus. Dans le cas de l'utilisation d'une culture de Brassicacées, le potentiel toxique maximal est atteint au moment de la floraison de la culture (moment où le taux de GSL dans les tissus est maximum), c'est à ce moment que le couvert est détruit par broyage et les résidus enfouis dans le sol (généralement dans les dix premiers centimètres). La période pendant laquelle les résidus après avoir libéré leurs composés toxiques vont se décomposer dans le sol va être de longueur variable suivant le délai de retour de la culture commerciale.

3.3.1. Impact sur les adventices

Le contrôle des adventices par les couverts est dû aux compétitions pour l'acquisition des ressources abiotiques (lumière, eau, nutriments) ainsi qu'aux phénomènes d'allélopathie dû à la production de composés biocides par les cultures intermédiaires (Haramoto et Gallandt, 2004). Cependant, ces deux effets de compétition et d'allélopathie se déroulent en même temps et il est donc compliqué d'isoler leur contribution relative dans le contrôle des adventices (Falquet et al., 2014). Les résultats présentés ci-dessous ne permettent pas de séparer les effets mais démontrent une efficacité élevée de l'utilisation de crucifères pour le contrôle des adventices. Résultats obtenus d'un article (Couëdel et al, 2017).

Dans des systèmes de culture de tomate, (Bangarwa et al, 2011) ont montré que du colza détruit à l'automne réduit la biomasse et la densité d'adventices de 85 à 96% comparé au sol nu, ces chercheurs ont observé jusqu'à 79 % de réduction de *Digitaria sanguinalis* et 48% de *Amaranthus palmeri*, 3 semaines après l'incorporation de résidus de crucifères. La germination de *Sesbania herbacea* a été réduite de plus de 95% par le broyage de tissus de 5 espèces de crucifères différentes. Avant cultures de soja, Krishnan et al. (1998) ont montré une réduction de 49% de la biomasse totale d'adventices 6 semaines après émergence de 3 couverts de crucifères (moutarde brune, moutarde blanche et colza). Cependant, la sensibilité des espèces d'adventices était différente en fonction des crucifères indiquant un effet biocide probablement lié aux ITC différents selon les adventices. L'émergence de *Kochia scoparia*, *Capsella bursa-pastoris* et *Setaria viridis* a été réduite par les couverts de toutes les crucifères alors que l'émergence de *Amaranthus retroflexus* a été affectée par la moutarde blanche et par

le colza, celle d'*Abutilon theophrasti* par la moutarde blanche uniquement. Quelques études reportent une efficacité totale du contrôle des adventices par les couverts lorsque la moitié de la dose d'herbicides utilisés habituellement est ajoutée avant le semis de la culture de rente. En effet Malik et al. 2008 reportent que l'incorporation de couverts de radis sauvages (*Raphanus raphanistrum*) couplée à l'application de la demi-dose d'herbicides (atrazine + S-metolachlor) permettent de contrôler aussi efficacement les espèces de *Digitaria sanguinalis* dans des systèmes de maïs (*Zea mays*) que lors de l'application d'une pleine dose d'herbicides. (Couëdel et al, 2017).

3.3.2. Impact sur les microorganismes

3.3.2.1. Effet sur les champignons telluriques

Contrairement aux maladies fongiques aériennes dont les agents pathogènes ont généralement un fort pouvoir de dispersion et dont la gestion doit se réfléchir à l'échelle du paysage, les maladies fongiques d'origine tellurique sont en général inféodées à la parcelle (sauf cas de dissémination par les engins et outils agricoles); l'inoculum primaire ne pouvant pas se disperser sur de grandes distances. Le réservoir d'inoculum dans le sol est donc une composante majeure de l'épidémie. Celui-ci peut se conserver sous forme saprophytique sur les résidus de culture de la plante hôte ou sous formes d'organes de conservation tels que les (micros) sclérotés, les chlamydo-spores ou les oospores. Les méthodes de lutte actuelles sont limitées et reposent principalement sur (i) l'utilisation de fumigants appliqués au sol, très coûteux d'un point de vue économique et environnemental et non spécifiques, (ii) des traitements de semences et (iii) des résistances variétales, qui restent rares dans le cas des maladies d'origine tellurique. La diversification des cultures dans la rotation, fondée sur la succession de cultures hôtes et non hôtes de l'agent pathogène, est un moyen de lutte efficace contre les pathogènes telluriques. Cependant, les prix des productions agricoles conditionnent fortement le choix des cultures, et les rotations courtes ne laissent que peu de place à des questions de gestion de l'état sanitaire des sols. Une façon d'exploiter les avantages procurés par une diversification des cultures au sein de la succession, dans le but d'améliorer l'état sanitaire des cultures, est de valoriser l'interculture en insérant des cultures intermédiaires qui, par la technique de biofumigation peuvent avoir des effets biocides via la libération d'isothiocyanates dans le sol (Couëdel et al, 2017).

- **Effets sur les champignons pathogènes**

L'introduction, depuis une dizaine d'années aux Etats-Unis, de Brassicacées en culture intermédiaire s'est avérée efficace pour lutter contre la verticilliose de la pomme de terre occasionnée par *Verticillium dahliae* (Larkin et al, 2011).

Sur chou-fleur, l'utilisation du brocoli (en allélopathie ou biofumigation) réduit de manière très significative la quantité de microsclérotés dans le sol (moins 94%), l'incidence et la sévérité de la maladie (moins 50%), et l'abondance des microsclérotés dans les racines de chou-fleur (note qualitative divisée par 2-3) sur des expérimentations conduites au champ (Xiao et al., 1998). Dans le cadre de la verticilliose du tournesol, le retour trop rapide de la culture dans la succession blé dur-tournesol a pour conséquence d'augmenter le stock de microsclérotés de *V. dahliae* dans le sol, occasionnant une recrudescence des dégâts et des dommages sur la culture (Debaeke et al, 2017). Au champ, de récents travaux ont montré que l'introduction d'un couvert de Brassicacées de moutarde brune, navette ou radis tend à réduire significativement (moins 60%) l'intensité des attaques sur le tournesol en comparaison d'un sol nu avant l'implantation de la culture (Debaeke et al, 2017).

Les crucifères ont également des effets dépressifs sur le piétin échaudage (*Gaeumanonnyces graminis var. tritici*) (Couëdel et al.2017). Des études australiennes, suisses et anglaises montrent que les attaques de piétin échaudage sont moins élevées lorsqu'un blé est précédé d'un colza d'hiver plutôt que d'une pâture, d'un autre blé ou d'une autre culture non-hôte comme la féverole. Cet effet dépressif du colza serait dû au caractère non-hôte des crucifères mais aussi à l'action biocide des ITC. Des effets dépressifs sur la sévérité de la maladie sur blé sont similaires pour la moutarde brune et le colza (-70% en moyenne). Dans une autre expérimentation la moutarde brune a permis un rendement en blé plus important que le colza. (Couëdel et al, 2017).

Les cultures intermédiaires de moutardes brunes ont été identifiées comme efficaces dans la lutte contre *Rhizoctonia solani* sur betterave en réduisant de 45% l'incidence et de 7% la sévérité de la maladie permettant une augmentation de rendement de 13% comparé au témoin sans moutarde (Couëdel et al, 2017). L'incorporation des résidus a eu un effet plus important sur la maladie que l'unique effet d'allélopathie durant la période de culture. L'incidence et la sévérité de *Rhizoctonia solani* sur des cultures de pomme de terre ont été respectivement réduites de 65% et 70% suite à la destruction d'un couvert de colza, de 45% et 47% par un couvert de moutarde blanche alors qu'elles ont été augmentées de 35% et 17%

par un couvert la moutarde brune. Les effets du colza ont été confirmés par avec une réduction de 49% de la sévérité de la maladie et une augmentation de rendement en pomme de terre de 27%. (Couëdel et al, 2017).

Dans une revue de la littérature sur la lutte contre la pourriture racinaire du pois (*Aphanomyces euteiches*), Hossain et al. (2012) montrent un effet dépressif de l'utilisation de crucifères sur l'inoculum primaire de l'oomycète. Ces effets sont plus forts après l'implantation de chou plutôt que de moutarde blanche du fait de la libération de composés plus volatils. L'effet de biofumigation dû à la libération d'ITC serait couplé à l'effet de décompactations du sol par les crucifères améliorant ainsi sa structure et engendrant un environnement moins propice au pathogène (Couëdel et al.2017).

Les crucifères sont hôtes des champignons de la famille de *Fusarium*, elles sont donc peu efficaces pour lutter contre ce pathogène. Une augmentation de l'incidence de *Fusarium oxysporum* (+34%) sur tomate a été observée suite à la destruction d'un mélange de moutarde brune et blanche ainsi que suite à une moutarde brune sur l'incidence de la maladie sur la pastèque (+11%). Lorsque la biomasse des couverts est non incorporée au sol (exportée) les effets sur l'incidence de la maladie sont encore plus importants sur les fraises (+294% suite à une moutarde brune et +388% suite à un chou). Aucun effet n'a été montré sur l'incidence des *Pythium* de la vigne. Des effets négatifs sur le développement du champignon ont tout de même été montrés; l'incidence de la fusariose de la pastèque par *F. oxysporum* a été réduite de 27% après incorporation d'une culture de colza, alors que la sévérité de la fusariose du blé par *F. graminearum* a été réduite de 45% et 30% respectivement suite à des cultures de colza et moutarde brune (sans enfouissement des résidus) (Couëdel et al, 2017).

- **Effet sur les champignons auxiliaires**

Les champignons mycorhiziens à arbuscule(CMA) sont des symbiotes de la plupart des espèces cultivées, sauf des crucifères. En culture de maïs, une diminution plus forte du potentiel de mycorhization du sol a été démontrée après un couvert de moutarde brune (-57%) en comparaison à d'autres espèces non-crucifères (-40%) (Une vesce et un mélange de 7 espèces non-crucifères). En Argentine, un effet négatif du colza sur la colonisation de CMA sur le soja suivant a été démontré (-30%) (Valetti et al, 2016). D'autres études n'ont pas montré d'impacts négatifs de résidus de colza (Pellerin et al, 2007) ou de radis (White et Weil, 2010) sur la colonisation de CMA sur les racines de maïs. Les champignons du genre *Trichoderma* peuvent réaliser des associations mutualistes avec les cultures et ainsi réduire

l'attaque de champignons pathogènes. Les crucifères ont un impact positif sur les populations des espèces de *Trichoderma* comme démontré par Kirkegaard et Matthiess en (2004) lors de l'implantation de cultures de colza (+180%) et de moutarde brune (+168%) sans incorporation des résidus. Les espèces de *Trichoderma* sont en effet sélectionnées dans la rhizosphère des crucifères de par leur faible sensibilité aux ITC contrairement à de nombreux champignons bioagresseurs (Couëdel et al, 2017).

3.3.2.2. Effet sur les bactéries telluriques

En général, les bactéries ont une sensibilité plus faible aux isothiocyanates que les champignons. Le contrôle de bactéries pathogènes est également plus complexe dû au fait qu'elles peuvent survivre de manière endophyte mais aussi dans le sol, dans les couches profondes, elles peuvent se déplacer via les transferts d'eau ou être en relation avec des adventices. Elles ont aussi été moins étudiées dans la littérature en condition d'expérimentations au champ (Couëdel et al, 2017).

- **Effet sur les bactéries pathogènes**

La bactérie *Ralstonia solanacearum* responsable de la pourriture brune de la pomme de terre, de la maladie de Granville du Tabac ou de Moko du bananier a été classée deuxième bactérie ayant le plus fort potentiel pathogène pour les plantes cultivées (Mansfield et al., 2012). Une diminution de 62% de la bactérie lors de biofumigation avec de la moutarde brune a été observée, sur des plants de tomates, culture hôte de *R. solanacearum*, des couverts de moutarde et de colza ont engendré une réduction de l'incidence de la maladie de 59 et 28% respectivement (Couëdel et al.2017) . Les niveaux similaires de contrôle de la bactérie ont été observés sur des plants de tabac sensibles. Olivier et al. (1999) ont également démontré une diminution de population de *R. solanacearum* de 98% sur des plants de tomate suite à la culture de navette, sans que cet effet soit attribué à la production de GSL. (Couëdel et al, 2017).

- **Effet sur les bactéries impliquées dans le cycle de l'azote**

Une étude en serre a mis en évidence l'absence d'effet dépressif d'une culture de colza sur la colonisation des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote atmosphérique du soja (Valetti et al., 2016). Cependant Couëdel et al. (2017) ont montré une diminution du nombre de nodules de pois lorsque des résidus de colza étaient incorporés au sol avant le semis, une plus faible formation de nodules sur les racines de pois après un couvert de moutarde blanche

ou brune sans que les résidus aient été incorporés. Cet effet a été attribué aux propriétés allélopathiques des crucifères mais aussi à leur effet engrais vert pour l'azote qui engendre, en comparaison au sol nu, une plus forte disponibilité en azote minéral pour la légumineuse et donc une moins forte formation de nodules par les racines du pois. Aucun effet négatif des moutardes sur la quantité de bactéries fixatrices du sol n'a été décelé (Couëdel et al, 2017).

3.3.3. Impact sur les nématodes

3.3.3.1. Effet sur les nématodes phyto-parasitaires

La biofumigation fait référence à la suppression des organismes nuisibles et pathogènes du sol par des composés biocides libérés lorsque les résidus de brassicacées sont écrasés et incorporés dans le sol. L'effet suppressif est attribué à une gamme de produits biologiquement actifs, y compris les isothiocyanates toxiques et hautement volatils (ITC), ainsi que des cyanures organiques, des oxazolidinéthiones, des nitriles et du thiocyanate ionique moins toxiques libérés lors de l'hydrolyse enzymatique par la myrosinase. L'utilisation de plantes brassicacées comme engrais vert devient une pratique courante. Les études sur l'effet biocide des cultures de brassicacées sur les nématodes parasites des plantes remontent à 1925, date à laquelle une réduction des populations de nématodes à kystes a été constatée sur les racines de plants de pommes de terre cultivés à proximité de moutardes. Il y a eu une série des études portant sur l'utilisation potentielle de ces cultures pour lutter contre les NKP et autres organismes nuisibles. Toxicité pour les juvéniles de deuxième stade (J2) de *G. rostochiensis* par la libération d'isothiocyanate de 2-propényle a été signalé avec l'ajout d'enzyme myrosinase active à des glucosinolates de 2-propényle. La biofumigation doit cibler non seulement les juvéniles éclos, mais surtout les œufs enkystés. En effet, les derniers résidus brassicacés ont pu être incorporés au moment de la plantation de pommes de terre, et les NPC sont connus pour commencer l'éclosion et l'invasion des racines uniquement après stimulation par l'exsudat de racine de pomme de terre. Cela se produit plusieurs semaines après le début de la croissance de la plante de pomme de terre, et les CTI ont une demi-vie d'environ 48 h en moyenne (Ngala et al, 2015).

De nombreuses études relatent l'effet dépressif des couverts de crucifères sur les communautés de nématodes phyto-parasitaires. Le radis fourrager et la moutarde brune se sont avérés plus efficaces que la roquette en tant que culture biofumigante pour contrôler le nématode à kyste de la pomme de terre (*Globodera pallida*) (Ngala et al, 2015). Le nématode à kyste *Heterodera schachtii* peut être contrôlé par le radis oléifère sur betterave ou sur

courgette. Des couverts de moutardes blanches et brunes se sont avérés efficaces dans la lutte contre les nématodes à galles (*Meloidogyne spp.*). Le navet et la roquette semble cependant à proscrire dans la lutte contre les espèces de nématodes à galles car ils sont l'hôte respectivement de 2 et 3 d'entre elles (Couëdel et al, 2017).

3.3.3.2. Effet sur les nématodes antagonistes

Les couverts de crucifères ont un impact positif sur les populations de nématodes antagonistes (Treonis et al, 2010). Cet effet s'explique notamment par l'apport de matière organique lors de l'incorporation des couverts qui favorise les communautés de nématodes antagonistes au détriment des communautés pathogènes (Couëdel et al, 2017).

Schudel P., 2008 : Ecologie et protection des plantes guide pour l'utilisation des produits phytosanitaires. Connaissances de l'environnement n°0809. Office fédéral de l'environnement, Berne, 110p.

(22)-J.N. Matthiessen, J.A. Kirkegaard, Biofumigation and biodegradation: opportunity and challenge in soil-borne pest and disease management, Crit. Rev. Plant Sci. 25 (2006) 235–265.

[23] N. Motisi, T. Dore, P. Lucas, F. Montfort, Dealing with the variability in biofumigation efficacy through an epidemiological framework, Soil Biol. Biochem. 42 (2010) 2044–2057.

Conclusion :

La gestion des maladies d'origine tellurique est actuellement limitée à quelques méthodes de lutte telles que la diversification des cultures dans la rotation (succession de cultures hôtes/non-hôtes du pathogène), l'utilisation de résistances variétales qui restent néanmoins rares et la désinfection des sols avant culture qui est en passe de disparaître, face à l'évolution des réglementations sur la réduction de l'usage des pesticides.

Les méthodes de lutte biologiques contre les ravageurs et les maladies transmises par le sol ont longtemps été présentées comme une alternative écologiquement inoffensive aux pesticides chimiques de synthèse. Mais la dure réalité est qu'ils n'ont pas encore largement répondu aux attentes d'une efficacité cohérente et robuste dans des conditions de terrain.

Les agriculteurs doivent désormais adopter des méthodes s'insérant dans le cadre de la protection intégrée des cultures, et c'est dans ce contexte que la technique de biofumigation pour gérer les maladies d'origine tellurique connaît un regain d'intérêt. Elle est actuellement utilisée par un nombre grandissant d'agriculteurs à travers le monde (Italie, Etats-Unis, Australie, Philippines...) et fait également l'objet de nombreux programmes internationaux de recherche car la mise en œuvre de cette technique en conditions naturelles ne permet pas toujours à l'heure actuelle la réduction espérée des niveaux des maladies ciblées.

Il est évident que le développement de méthodes biologiques de lutte contre les organismes nuisibles du sol n'a pas atteint la maturité et qu'il est souvent controversé. Les praticiens sont souvent sceptiques à l'égard des déclarations d'efficacité des scientifiques, en particulier celles qui découlent uniquement d'études en laboratoire, ou méprisants sur la base de l'économie ou de la logistique de la mise en œuvre. La plupart (certains diront peut-être trop) de l'effort a consisté en une recherche fondamentale et descriptive. Beaucoup moins d'attention a été accordée à une mise en œuvre systématique basée sur les résultats de la recherche fondamentale et une compréhension du milieu dans lequel cette mise en œuvre doit avoir lieu. Il y a une très longue histoire de recherche sur de nombreuses alternatives à base biologique, dont on peut souvent facilement démontrer leur potentiel dans les tests de laboratoire *in vitro*.

Pour que les méthodes de contrôle biologiques réussissent, les normes d'efficacité doivent être celles utilisées pour les pesticides chimiques, ou elles doivent être préconisées pour des systèmes qui n'ont pas d'option de contrôle chimique économiquement viable ou qui préfèrent éviter l'utilisation de produits chimiques afin d'atteindre d'autres objectifs. Il faut

reconnaître dès le départ les réalités de l'intégration rentable de ces méthodes dans les systèmes agricoles, et les limites intrinsèques des méthodes de lutte antiparasitaire basées sur la biologie lorsqu'elles sont comparées à des critères chimiques synthétiques qui ont été développés et pré-tests pour travailler de manière robuste dans une grande variété de circonstances.

Références bibliographique :

Agerbirk, N., & Olsen, C. E. (2012). Glucosinolate structures in evolution. *Phytochemistry*, 77, 16-45.

Anonyme (25 octobre 2014) ,«Cultural Control», College of Agriculture and LifeSciences,université d'État de Caroline du Nord.

Bangarwa, S. K., Norsworthy, J. K., Mattice, J. D., & Gbur, E. E. (2011). Glucosinolate and isothiocyanate production from Brassicaceae cover crops in a plasticulture production system. *Weed Science*, 59(2), 247-254.

Couëdel, A., Seassau, C., Wirth, J., & Alletto, L. (2017). Potentiels de régulation biotique par allélopathie et biofumigation; services et dis-services produits par les cultures intermédiaires multiservices de crucifères.

Debaeke,P., Bedoussa ,L., Bonnet ,C., Bret-Mestries,E., Seassau,C.,Gavaland,A., Raffailac,D., Tribouillois,H., Véricel,G., Justes, E., 2017. Sunflower crop: environmental-friendly and agroecological. Ocl. doi:10.1051/oc/2017020.

Deguine, J. P., & Ferron, P. (2004). Protection des cultures et développement durable.

Deguine, J. P., Ferron, P., & Russell, D. (2008). *Protection des cultures: de l'agrochimie à l'agroécologie*. Editions Quae.

Denis Langlois, agr., Jean Coulombe, M.Sc., agr., Richard Hogue, Ph.D.,Guy Bélair, M.Sc., Thomas Jeanne et Nathalie Dauphinais, M.Sc.Décembre 2010 Biofumigation - Choix des plantes biofumigantes et méthodes pour lutter contre les nématodes et les pathogènes du sol.

Doré, T., Montfort, F., & Lucas, P. (2009). *Réguler les maladies d'origine tellurique par une culture intermédiaire de Brassicacées: mécanismes d'action et conditions d'expression dans une rotation betterave-blé* (Doctoral dissertation, AGROCAMPUS OUEST; Université européenne de Bretagne).

Falquet, B., Roux, D., Henriët, L., Tschuy, F., & Wirth, J. (2014). Simple method to separate resource competition from allelopathic root interactions. *Allelopathy Journal*, 34(2).

Ferron, P. (2000). Bases écologiques de la protection des cultures: gestion des populations et aménagement de leurs habitats.

Haramoto, E. R., & Gallandt, E. R. (2004). Brassica cover cropping for weed management: a review. *Renewable agriculture and food systems*, 187-198.

Hillock, D., & Bolin, P. (2004). Mechanical Pest Controls.

<https://www.aujardin.info/plantes/famille-brassicaceae.php>

Jourdheuil, P., Grison, P., & Fraval, A. (1991). La lutte biologique: un aperçu historique.

Kirkegaard, J. A., & Matthiessen, J. N. (2004). Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria*, 3(3), 233-239.

Kirkegaard, J. A., Gardner, P. A., Desmarchelier, J. M., & Angus, J. F. (1993). Biofumigation: using Brassica species to control pests and diseases in horticulture and agriculture.

Krishnan, G., Holshouser, D. L., & Nissen, S. J. (1998). Weed control in soybean (*Glycine max*) with green manure crops. *Weed Technology*, 97-102.

Lambert, N. (2010). *Lutte biologique aux ravageurs: applicabilité au Québec* (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke.).

Larkin, R. P., Honeycutt, C. W., & Olanya, O. M. (2011). Management of Verticillium wilt of potato with disease-suppressive green manures and as affected by previous cropping history. *Plant Disease*, 95(5), 568-576.

LOUCHAHI, M. R. (2015). *Enquête sur les conditions d'utilisation des pesticides en agriculture dans la région centre de l'algérois et la perception des agriculteurs des risques associés à leur utilisation* (Doctoral dissertation, INA)

Lucas, P. (2007). Le concept de la protection intégrée des cultures. *Innovations agronomiques*, 1, 15-21.

Malik, M. S., Norsworthy, J. K., Culpepper, A. S., Riley, M. B., & Bridges, W. (2008). Use of Wild Radish (*Raphanus raphanistrum*) and Rye Cover Crops for Weed Suppression in Sweet Corn. *Weed Science*, 56(04), 588–595. doi:10.1614/ws-08-002.1.

Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., Citovsky, V., Sriariyanum, M., Ronald, P., ... & Toth, I. A. N. (2012). Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. *Molecular plant pathology*, 13(6), 614-629.

Michel, V. (2008). Biofumigation—principe et application (4.2. 2008).

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales, Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, 2016.

Ngala, B. M., Haydock, P. P., Woods, S., & Back, M. A. (2015). Biofumigation with Brassica juncea, Raphanus sativus and Eruca sativa for the management of field populations of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Pest Management Science*, 71(5), 759-769.

Olivier, C., Vaughn, S. F., Mizubuti, E. S., & Loria, R. (1999). Variation in allyl isothiocyanate production within Brassica species and correlation with fungicidal activity. *Journal of Chemical Ecology*, 25(12), 2687-2701.

Pellerin, S., Mollier, A., Morel, C., & Plenchette, C. (2007). Effect of incorporation of Brassica napus L. residues in soils on mycorrhizal fungus colonisation of roots and phosphorus uptake by maize (*Zea mays* L.). *European Journal of Agronomy*, 26(2), 113-120.

Reau, R., Bodet, J. M., Bordes, J. P., Dore, T., Ennaifar, S., Moussart, A., ... & Sausse, C. (2005). Effets allélopathiques des Brassicacées via leurs actions sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes: analyse bibliographique. Partie 1. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 12(3), 261-271

Rocher, F. (2004). *Lutte chimique contre les champignons pathogènes des plantes: évaluation de la systémie phloémienne de nouvelles molécules à effet fongicide et d'activateurs de réactions de défense* (Doctoral dissertation)

Shurtleff, M. C., & Averre, C. W. (1997). The plant disease clinic and field diagnosis of abiotic diseases. *The plant disease clinic and field diagnosis of abiotic diseases*.

Treonis, A. M., Austin, E. E., Buyer, J. S., Maul, J. E., Spicer, L., & Zasada, I. A. (2010). Effects of organic amendment and tillage on soil microorganisms and microfauna. *Applied soil ecology*, 46(1), 103-110.

Valetti, L., Iriarte, L., & Fabra, A. (2016). Effect of previous cropping of rapeseed (*Brassica napus* L.) on soybean (*Glycine max*) root mycorrhization, nodulation, and plant growth. *European Journal of Soil Biology*, 76, 103-106.

Valetti, L., Iriarte, L., & Fabra, A. (2016). Effect of previous cropping of rapeseed (*Brassica napus* L.) on soybean (*Glycine max*) root mycorrhization, nodulation, and plant growth. *European Journal of Soil Biology*, 76, 103-106.

White, C. M., & Weil, R. R. (2010). Forage radish and cereal rye cover crop effects on mycorrhizal fungus colonization of maize roots. *Plant and Soil*, 328(1-2), 507-521.

Wilson, A. E. (2011). *Recherche d'isothiocyanates à intérêts fonctionnel et technologique chez les Brassicacées* (Doctoral dissertation, Strasbourg).

Xiao, C. L., Subbarao, K. V., Schulbach, K. F., & Koike, S. T. (1998). Effects of crop rotation and irrigation on *Verticillium dahliae* microsclerotia in soil and wilt in cauliflower. *Phytopathology*, 88(10), 1046-1055.