Systèmes de culture et qualité de la laitue Comment repenser les systèmes de culture pour réduire l'usage de pesticides et les risques de résidus ?

Mireille Navarrete, François Lecompte, Beatrice Collange, Marc Tchamitchian

▶ **To cite this version:**

Mireille Navarrete, François Lecompte, Beatrice Collange, Marc Tchamitchian. Systèmes de culture et qualité de la laitue Comment repenser les systèmes de culture pour réduire l'usage de pesticides et les risques de résidus ?. Innovations Agronomiques, 2010, 9, pp.67-84. hal-02659807

HAL Id: hal-02659807
https://hal.inrae.fr/hal-02659807

Submitted on 30 May 2020

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Systèmes de culture et qualité de la laitue
Comment repenser les systèmes de culture pour réduire l'usage de pesticides et les risques de résidus ?

Navarrete M.[1], Lecompte F.[2], Collange B.[1],Tchamitchian M.[1]

[1] : Unité d'Ecodéveloppement, INRA Centre PACA, Domaine St Paul, Site Agroparc, 8914 Avignon CEDEX 9.

[2] : Unité PSH, INRA Centre PACA, Domaine St Paul, Site Agroparc, 8914 Avignon CEDEX 9.

Correspondance : Mireille.Navarrete/Francois.Lecompte/Marc.Tchamitchian@avignon.inra.fr

Résumé

Cet article aborde les relations entre systèmes de culture sous abri et quelques aspects de la qualité des salades (qualité sanitaire liée à l'usage de produits phytosanitaires et aux résidus azotés). Il présente d'abord l'influence de quelques techniques et combinaisons de techniques alternatives, en se centrant sur le contrôle des maladies et en abordant plus brièvement les conséquences de ces choix techniques sur d'autres critères de qualité. L'intérêt agronomique de la fertilisation azotée, puis des combinaisons entre engrais vert, solarisation et amendements organiques sera ainsi discuté sur la base de résultats d'expérimentations, en station expérimentale et en parcelles d'agriculteurs. La multiplicité des objectifs assignés aux systèmes de culture (productivité, contrôle des pathogènes, réduction des risques de fuites de nitrates dans les nappes), les interactions entre techniques et les effets contrastés des techniques sur les différents pathogènes complexifient fortement la recherche de nouveaux systèmes techniques. Des outils pour évaluer les effets des techniques et des systèmes de culture, et des démarches de nature systémique sont enfin proposés dans l'objectif de mettre au point de nouveaux systèmes de culture en partenariat avec les acteurs du développement agricole.

Mots-clés: techniques alternatives, pesticide, nitrate, modèle, conception

Abstract: Cropping systems and quality of lettuce. How to conceive new systems to reduce pesticide use and risks of residues?

This article deals with the relations between protected cropping systems and some aspects of the quality of salads (health aspects, linked to the use of agrochemicals and nitrate content in the leaves). First the influence of some techniques alternative to agrochemicals, and of their combinations, is presented, with a special focus on the management of plant diseases, and discussing briefly the consequences of these technical choices on some other quality aspects. The agronomical interest of nitrogen fertilisation and of the combinations of green manure, solarisation and organic amendments are discussed, using results obtained in experiments carried in experimental stations and on-farm. Cropping systems must now achieve several goals at the same time (productivity, product quality, pest and disease control, environment protection). Therefore, new systems must be designed but this is a difficult task because of the multiple interactions between the cropping techniques, their manifold and sometimes contradictory effects on these goals, and the fact that they can have opposite effects within one goal, controlling one pest while promoting another for example. Model-based tools to evaluate or simulate the effects of the different cropping techniques and systems are then presented. Finally, a setup is proposed, joining growers, development advisers and researchers for the design of new and more sustainable protected cropping systems.

Keywords: alternative techniques, agrochemical, nitrate, model, design

Introduction

La qualité de la salade a toujours été un enjeu important, notamment parce qu'il s'agit d'un légume consommé en frais et non stockable. La fraîcheur, la qualité visuelle, le calibre, le choix de la variété étaient et sont toujours au centre des préoccupations des différents acteurs de la filière. Depuis plusieurs années, la production de salade en France est confrontée à de nouvelles exigences du fait du retrait progressif de nombreuses molécules chimiques, notamment celles qui permettaient le contrôle des maladies et ravageurs du sol. En effet, l'horticulture est un des secteurs les plus consommateurs de pesticides, avec 4.7% de la consommation nationale pour 0.8% de la SAU nationale (Ecophyto R&D, 2010). Le retrait du Bromure de méthyle en 2005 par exemple et, plus récemment, de molécules nématicides, répond à la fois à des exigences environnementales (cette molécule participant à la destruction de la couche d'ozone) et sanitaires (pour limiter le risque de résidus de pesticides dans les salades, alors même que les pouvoirs publics mettent en avant la valeur santé des légumes). Les traitements chimiques en cours de culture sont également très encadrés pour éviter le risque de résidu de pesticides dans les parties consommées. Mais le maraîchage a progressivement accru sa dépendance aux pesticides parce que les systèmes de culture, en particulier sous abri, sont très intensifs. Pour produire des légumes primeurs, les systèmes de culture originaux ont été progressivement modifiés : plantations précoces dans la saison, à des périodes climatiquement délicates, réduction de la longueur des cycles de culture, d'où le développement des cultures abritées. De ce fait, le niveau des charges (main d'œuvre et abris) est élevé et oblige les agriculteurs à viser des niveaux de rendements élevés. Aujourd'hui, les systèmes maraîchers sous abri reposent sur des rotations assez peu diversifiées, qui se répètent d'année en année : alternance de salade en hiver et de légumes fruits en été, les espèces les plus fréquentes étant des Solanacées (tomate, aubergine, poivron) et des Cucurbitacées (melon, concombre, courgette). Les sols sont utilisés de façon intensive (présence de cultures sur la même parcelle jusqu'à 10 mois sur 12), et des problèmes de fatigue des sols s'observent régulièrement, d'où le recours aux engrais verts pour restaurer leur fertilité. L'irrigation et la fertilisation ont été jusqu'à présent conduites dans le but principal de maximiser les rendements, et donc de ne pas risquer de carence.

Puisque les systèmes maraîchers sont très intensifs, donc très sensibles aux pathogènes, la réduction de l'usage des produits phytosanitaires pose, plus que dans d'autres systèmes de production, des questions agronomiques cruciales, Comment réduire les risques de développement de maladies et ravageurs ? Comment remobiliser dans une perspective de contrôle des pathogènes des techniques culturales, qui soit étaient utilisées principalement dans le but de contrôle de la fertilité du sol (fertilisation minérale, engrais verts, amendements organiques), soit avaient été abandonnées pour des raisons économiques et d'organisation (rotations diversifiées) ? De nouvelles questions de recherche se posent également dans la mise au point de nouvelles techniques (biofumigation, variétés résistantes par exemple). Dans ce cadre, l'Agriculture biologique apparaît comme un prototype d'une nouvelle agriculture plus durable. Elle est en effet basée sur l'utilisation des fonctions naturelles des écosystèmes et sur l'entretien de la fertilité et de la qualité des sols, autant de fonctions qui affectent directement ou non la qualité des produits issus de ces systèmes, comme illustré tout au long de cet article. Les techniques mises au point pour ce mode de production peuvent servir de source d'inspiration pour les systèmes plus conventionnels qui n'ont pas les mêmes contraintes réglementaires et techniques.

L'objectif de cet article est, à partir de quelques recherches conduites récemment à l'INRA d'Avignon, de montrer différentes démarches basées sur l'expérimentation, le suivi de parcelles d'agriculteurs, la modélisation quantitative et qualitative, le recours à l'expertise. Leur angle d'attaque commun est double : (i) tenir compte de l'existence d'interactions entre techniques pour augmenter leur efficacité ; (ii) identifier les effets des techniques simultanément sur plusieurs maladies/ravageurs, pour éliminer les systèmes de culture qui contrôleraient un pathogène mais contribueraient au développement d'un autre. Nous nous intéressons plus particulièrement à trois pathologies fréquentes dans les systèmes sous

abris du Sud de la France : le développement des nématodes à galles et les maladies fongiques causées par *Botrytis cinerea* et à *Sclerotinia* (*S. minor* et *S.sclerotiorum*), qui toutes entraînent des dégâts importants dans les cultures de salade.

Les améliorations à apporter aux systèmes de cultures s'envisagent à différentes échelles temporelles : certaines, comme les rotations, relèvent de décisions à long terme ; d'autres, comme le mode de gestion de l'interculture (engrais vert, solarisation) relèvent de décisions annuelles ; d'autres enfin relèvent de décisions tactiques intra-cycle, c'est le cas du contrôle de la fertilisation ou de l'irrigation. Les marges de manœuvre pour faire évoluer les systèmes de culture dans les exploitations ne sont donc pas de même nature, certaines innovations étant ponctuelles, à l'échelle de l'itinéraire technique d'une seule culture, d'autre entraînant un changement de systèmes plus radical, sur un pas de temps pluriannuel, comme dans le modèle de re-conception proposé par Hill et Mac Rae (1995). De plus, ces techniques n'ont que des effets partiels sur le contrôle des pathogènes (Abawi et Widmer, 2000). Mais dans le cas des maladies et ravageurs telluriques, où l'inoculum se maintient pendant plusieurs années dans le sol, la répétition dans le temps de techniques pourrait permettre d'augmenter leur efficacité par effet cumulatif.

Dans cet article, nous présenterons d'abord l'influence de quelques techniques et combinaisons de techniques alternatives, en centrant notre propos sur le contrôle des maladies et en abordant plus brièvement les conséquences de ces choix techniques sur d'autres critères de qualité. L'intérêt agronomique de la fertilisation azotée (partie I), puis des combinaisons entre engrais vert, solarisation et amendements organiques (partie II) sera ainsi discuté sur la base de résultats d'expérimentations, en station expérimentale et en parcelles d'agriculteurs. La multiplicité des objectifs assignés aux systèmes de culture (productivité, contrôle des pathogènes, réduction des risques de fuites de nitrates dans les nappes), les interactions entre techniques et les effets contrastés des techniques sur les différents pathogènes complexifient fortement la recherche de nouveaux systèmes techniques. Dans la partie III, nous proposerons des outils et démarches de nature systémique dans l'objectif de mettre au point de nouveaux systèmes de culture en partenariat avec les acteurs du développement agricole.

1- Impact des choix techniques en cours de culture sur la qualité sanitaire: l'exemple de la fertilisation

1-1 Modifier la fertilisation pour rendre les plantes moins sensibles aux maladies

1) Fertilisation des cultures et sensibilité aux maladies

La nutrition minérale des plantes, à l'instar d'autres techniques culturales, est susceptible d'influencer la sensibilité des cultures aux maladies et ravageurs. L'effet de la nutrition des cultures sur leur sensibilité aux maladies a été rapporté depuis plusieurs décennies (Datnoff *et al*., 2007 ; Huber et Watson, 1974). Mais chaque élément minéral a un ou plusieurs effets spécifiques dans la relation hôte-pathogène. Ainsi, une augmentation des apports peut selon l'élément minéral, la plante et la maladie considérée augmenter ou diminuer l'incidence et la sévérité des symptômes (Huber et Thompson, 2007 ; Walters et Bingham, 2007). Cette variabilité des effets de la fertilisation, notamment azotée, est liée au fait que la nutrition des plantes peut exercer une influence à différents niveaux de l'interaction hôte-pathogène. Les nutriments ont un effet sur la croissance et le développement des cultures, donc sur l'architecture des plantes et par voie de conséquence sur le microclimat au sein du couvert. Une fertilisation azotée excessive pourra favoriser un couvert dense et peu aéré, favorable au développement de champignons pathogènes. Parallèlement, la nutrition a un effet sur le métabolisme des plantes, notamment le métabolisme secondaire, qui inclut la synthèse de molécules impliquées dans la défense contre les maladies et ravageurs. La fertilisation azotée module également la synthèse de protéines impliquées dans les processus de défense. Enfin, les champignons utilisent les ressources de leurs hôtes pour alimenter leur propre métabolisme. Ainsi, le contenu en éléments nutritifs des plantes aura une influence sur la vitesse de croissance des organismes pathogènes qui les colonisent. Suivant le

pathosystème considéré, un ou plusieurs des mécanismes décrits ci-dessus (microclimat du couvert, défense des plantes, nutrition du pathogène) seront activés lors d'une modification de la nutrition, et la résultante sera selon les cas une augmentation ou une diminution de l'épidémie. En conséquence, l'effet sur la pression parasitaire de différents niveaux de fertilisation doit être étudié au cas par cas. Mais dans les situations où une baisse de la fertilisation, notamment azotée, conduit à une moindre sensibilité aux principales maladies de la culture étudiée, des essais agronomiques peuvent être mis en œuvre pour concevoir des systèmes limitant à la fois l'usage des engrais et des pesticides. Ce travail a été engagé en grandes cultures depuis une vingtaine d'années (Meynard *et al.*, 2003). En cultures légumières, des références sont en train d'être établies pour évaluer l'impact d'une variation de la nutrition azotée sur la sensibilité des cultures aux maladies.

2) Impact d'une modification de la fertilisation azotée de laitues sur leur sensibilité aux maladies

Des expérimentations ont été menées sur des plants de laitue ferti-irrigués en pots, visant à connaître l'influence de la nutrition azotée sur leur susceptibilité aux champignons pathogènes *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia sclerotiorum*. La gamme de concentration en nitrates dans la solution nutritive allait de 0.5 mmol à 20 mmol, l'optimum pour la croissance des plantes dans les conditions de l'expérience étant d'environ 10 mmol. La sévérité des attaques des deux champignons a augmenté avec des apports d'azote accrus (Figure 1). La croissance des lésions sur feuille a plus que doublé entre 0.5 mmol et 20 mmol pour *Botrytis*, et a été multipliée par 6 pour *Sclerotinia* entre 0.5 mmol et 10 mmol, sans aggravation de la maladie entre 10 et 20 mmol.

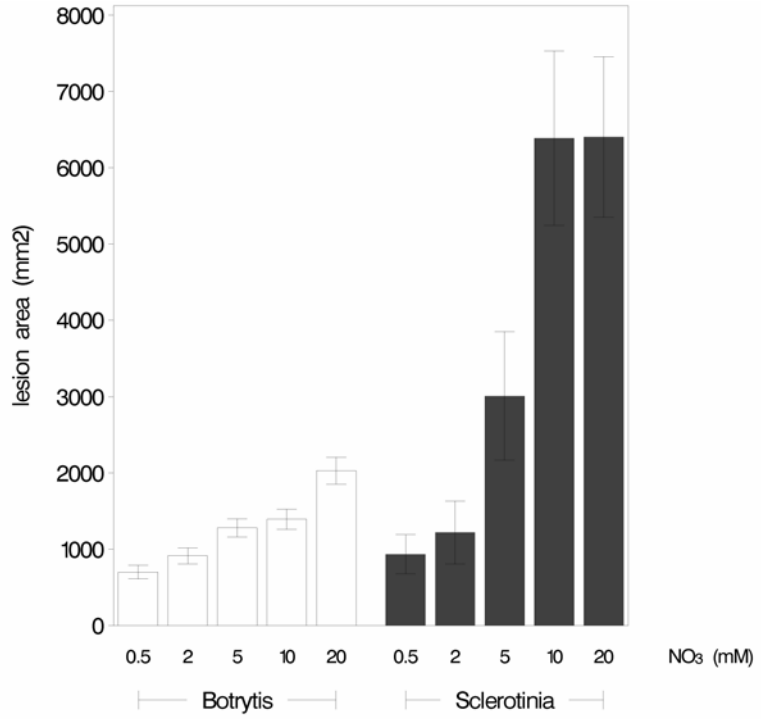

Figure 1 : Surfaces de lésions causées par *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia sclerotiorum* sur des feuilles de laitues cultivées à différents niveaux de nitrates dans la solution nutritive.

Des réponses comparables ont été observées pour différentes souches de *Botrytis* de même niveau d'agressivité sur les laitues. Sur tomate, au contraire, des réactions opposées avaient été observées entre des souches de *Botrytis* agressives, défavorisées par des hautes teneurs en azote dans les plantes, et des souches peu agressives, favorisées par des teneurs en azote élevées (Lecompte *et al.*, 2010). De faibles niveaux de nutrition azotée seraient donc susceptibles de réduire la sévérité des

épidémies causées par deux champignons pathogènes causant des dégâts importants sur salade. On ignore en revanche l'effet de la fertilisation azotée sur la sensibilité de la laitue au mildiou, *Bremia lactucae*. Des essais en conditions de production sont en cours pour valider ces résultats et étudier la pertinence de stratégies visant à réduire la fertilisation. Cependant, la fertilisation a d'autres effets sur la qualité des produits, et l'on peut envisager les marges de manœuvre théoriquement possibles pour une réduction de la fertilisation.

1-2 Gestion de l'azote, qualité des produits et respect de l'environnement

Des limites réglementaires de teneur en nitrates des laitues, variables suivant la saison et le type de production (abri ou plein champ), ont été établies. Ces limites sont relativement élevées pour les productions du sud de l'Europe, si bien que seules des fertilisations azotées très excessives aboutissent à des risques de dépassement (Dapoigny *et al.*, 2000 ; de Tourdonnet, 1998 ; Konstantopoulou *et al*., 2010). Dans les expérimentations mentionnées ci-dessus, les teneurs en nitrates des laitues sont de 1507 mg/kg de poids frais pour des solutions nutritives à 10 mmol de nitrates, et 3374 mg/kg de poids frais pour des solutions à 20 mmol de nitrates. Le maximum de croissance des plantes étant atteint dès 10 mmol, ces tests montrent que la teneur maximale autorisée (3500 mg/l dans les conditions de l'essai) n'a pas été atteinte pour des doses d'azote deux fois supérieures à celles nécessaires pour obtenir le maximum de rendement. Par ailleurs, des teneurs en nitrates élevées dans les plantes sont corrélées avec des teneurs en eau élevées (Cardenas-Navarro *et al*., 1999). Le croquant des feuilles étant lié à leur teneur en eau, on obtiendra des feuilles plus craquantes avec des plantes fortement fertilisées en azote. La concentration en chlorophylle, qui contribue à la couleur des feuilles et à l'apparence de certains types de laitues, est également corrélée positivement – dans des gammes normales de nutrition azotée - avec la teneur en azote des plantes (Fallovo *et al*., 2009). En revanche, le contenu nutritionnel des plantes, notamment la teneur en sucres diminue lorsque l'on passe d'une fertilisation optimale à une sur-fertilisation. De même, le contenu en polyphénols, dont les propriétés antioxydantes peuvent être recherchées dans une démarche d'amélioration de la qualité nutritionnelle, baisse significativement à mesure que l'on augmente la fertilisation azotée (Coria-Cayupan *et al*., 2009).

Du point de vue des conséquences environnementales, les relations entre fertilisation azotée et fuites d'azote dans l'environnement ont été bien décrites, par des approches expérimentales ou par modélisation (de Tourdonnet, 1998 ; Gay, 2002 ; Jackson *et al*., 1994 ; Lafolie *et al*., 1997 ; Leenhardt *et al*., 1998). Les risques de lessivage de nitrates sont liés à la fois à la quantité d'azote minéral présent dans le sol, issue de la fertilisation ou de la minéralisation de la matière organique, et de l'intensité des flux de drainage de la solution du sol, liée aux pluies et à l'irrigation (Figure 2).

Les apports d'eau et d'azote au sol peuvent être spatialement très hétérogènes, notamment sous abri, du fait de l'irrégularité des conditions climatiques, de la distribution inégale de l'eau d'irrigation et des résidus d'azote (Bruckler *et al*., 1997 ; de Tourdonnet *et al*., 2001 ; Leenhardt *et al*., 1998). D'autre part, les besoins en eau et en azote des laitues évoluent beaucoup en cours de culture. En conséquence, les pertes de nitrates par lessivage sont très inégalement réparties dans le temps et dans l'espace. Un contrôle fin de l'évolution de la teneur en nitrates du sol, et le décalage des apports d'azote à des moments où les besoins du peuplement sont forts, c'est-à-dire durant la seconde moitié de la culture, permettraient de limiter les pertes d'azote par lessivage (Lecompte, comm. pers.). Il faudrait pour cela développer l'irrigation au goutte à goutte dans les systèmes de cultures de salade sous abri, alors qu'aujourd'hui les dispositifs reposent presque exclusivement sur des systèmes d'irrigation par aspersion. Les pertes d'azote par dénitrification sont également liées aux conditions climatiques et à l'irrigation, et constituent des évènements ponctuels en relation avec l'apparition de conditions d'anaérobiose dans le sol. Potentiellement très importants dans certains contextes culturaux, ces pertes de nitrates aboutissent au dégagement d'oxyde nitreux (N_2O), qui est un puissant gaz à effet de serre.

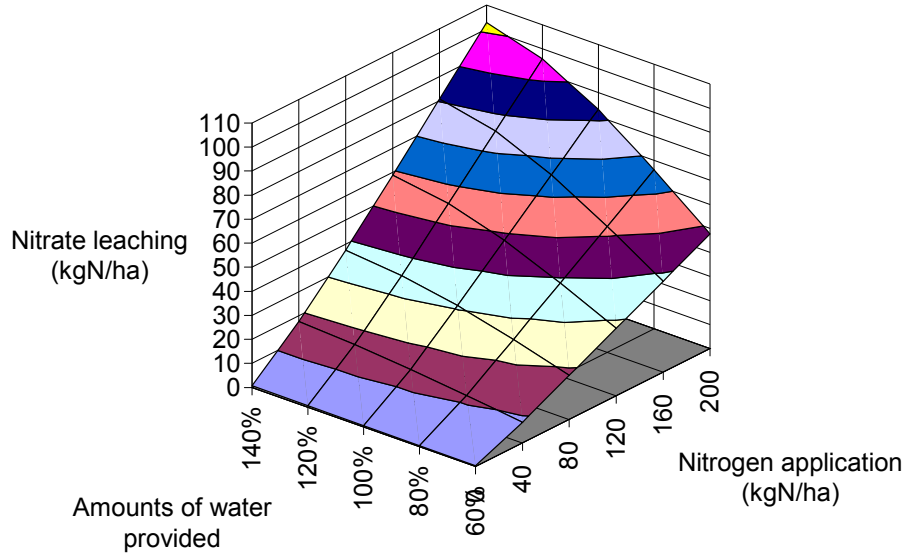

Figure 2 : Relation entre les quantités relatives d'eau et d'azote fournies à la culture et le lessivage de nitrates (de Tourdonnet et al., 2004).

Une bonne maîtrise de la fertilisation azotée, optimale vis-à-vis de la croissance du peuplement, semble pour l'heure un bon compromis vis-à-vis du cahier des charges fixé à la production : rendement maximum permis par les conditions climatiques et le potentiel génétique des variétés, diminution des risques de maladie et donc du recours à la lutte chimique curative, et impact modéré de la fertilisation azotée sur les aspects nutritionnels et sur la valeur santé des produits. Les risques de maladies étant franchement diminués pour des niveaux de nutrition sous-optimaux par rapport à la croissance, on pourrait imaginer certains créneaux de production dans laquelle la qualité sanitaire des produits serait valorisée et où la fertilisation serait utilisée comme un outil tactique de lutte contre les bioagresseurs. Des recherches de terrain sont encore nécessaires pour aller dans ce sens.

2- Impact des intercultures sur les maladies et l'environnement

2-1. Effet de la solarisation et des engrais verts sur le développement conjoint de nématodes à galles et de Sclerotinia

Une expérimentation sous tunnel en parcelles de producteurs et en station expérimentale a été mise en place dans le but d'évaluer les effets de plusieurs systèmes de culture intégrant des techniques alternatives sur les attaques des champignons du sol *Sclerotinia spp*. et des nématodes à galle *Meloidogyne* (Thèse en cours B. Collange).

1) <u>Suivis en parcelles de producteurs</u>

Dans le cadre du suivi en parcelles d'agriculteurs, les techniques alternatives testées sont la solarisation et l'engrais vert (sorgho fourrager), seules ou combinées entre elles, et associées à différentes successions de cultures (monocultures de salades ou successions salades-melon). L'évolution spatio-temporelle des attaques sur les cultures a été suivie pendant 2 ans sur 28 parcelles de producteurs de la région PACA (Vaucluse et Bouches-du-Rhône). Pour les nématodes, l'estimation du niveau d'attaque a été réalisée pour toutes les cultures de la succession et repose sur l'enregistrement d'indices de galles sur les plants de melon et de salade échantillonnés de manière systématique (sur une échelle de 11 indices ; 0 correspondant aux plantes saines ; 10 aux plantes dont le système racinaire est entièrement envahi par les galles). Pour *Sclerotinia*, les observations ont été réalisées uniquement sur salades. Elles ont consisté en des comptages du nombre de plantes flétries par parcelle et en l'attribution d'une note de gravité allant de 1 (salade peu atteinte) à 3 (salade morte).

Pour les deux pathogènes, les attaques des cultures ont été caractérisées par deux variables : l'incidence (représentant le pourcentage de plantes atteintes à l'intérieur du tunnel, calculée comme le ratio du nombre de plantes atteintes dans l'échantillon observé au nombre total de plantes dans cet échantillon) et la sévérité (caractérisant la gravité de la maladie, calculée à partir des notes de gravité ou des indices de galle).

Concernant les attaques de Sclerotinia (Figure 3), les systèmes de culture associant monocultures de salades (pas de culture de melon) et engrais vert tous les ans sont les plus favorables aux fortes incidences. En revanche, les successions de culture à base de salade et de melon, combinées à la solarisation (utilisée seule tous les ans ou en alternance avec l'engrais vert un an sur deux) assurent un contrôle satisfaisant de ce pathogène. Ces résultats paraissent de prime abord contre-intuitifs du fait du statut de ces espèces vis-à-vis du *Sclerotinia*, puisque le melon est hôte alors que le sorgho ne l'est pas (Boland et Hall, 1994 ; Melzer *et al*., 1997). Mais les deux cultures correspondent à des modes de gestion du sol et de l'irrigation très différents (irrigation en rang avec paillage du sol pour le melon ; irrigation par aspersion pour le sorgho), d'où des dynamiques temporelles et des répartitions spatiales de l'humidité probablement très différentes. Enfin, ces résultats montrent que la combinaison de solarisation et d'engrais vert sorgho en alternance sur deux années pourrait être intéressante pour bénéficier à la fois de la bonne protection des cultures fournie par la solarisation et des effets bénéfiques de l'engrais vert (structure du sol, matière organique et fertilisation, vie microbienne du sol).

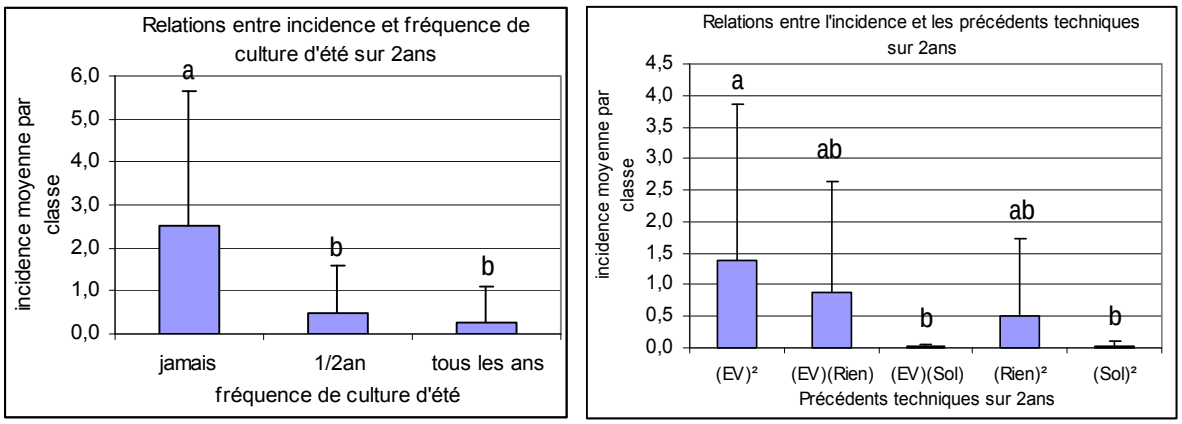

Figure 3 : Relations entre incidences observées de *Sclerotinia* et fréquences de culture d'été ou précédents techniques (les lettres indiquent les différences significatives à p<0,05)

Concernant les nématodes *Meloidogyne*, les analyses sont en cours mais semblent montrer que, contrairement à *Sclerotinia*, (a) l'utilisation de melon dans les successions de culture est favorable aux attaques de nématodes sur les cultures de salade suivantes et (b) les systèmes de culture à base de monocultures de salades et d'utilisation d'engrais vert tous les ans semblent les moins atteints par ce ravageur. Ces résultats restent actuellement à préciser.

Par ailleurs, ce travail a permis de mettre en évidence d'autres facteurs à intégrer dans les choix techniques pour la gestion des bioagresseurs telluriques. Les espèces de salades cultivées influencent les incidences observées sur les cultures ; les cultures de laitues sont les plus sensibles aux attaques de *Sclerotinia* et les feuilles de chêne blondes les moins sensibles (Figure 4). En dehors de mécanismes génétiques encore peu connus actuellement (Grube et Ryder, 2004), ces différences entre espèces peuvent s'expliquer par l'architecture des plantes et le microclimat qu'elle induit au niveau du collet : les plantes aux ports plus dressés sont en effet moins susceptibles d'être contaminées par les champignons du sol du fait d'une surface foliaire en contact avec le sol plus faible (Schwartz et Steadman, 1978 ; Grube et Ryder, 2004). Par ailleurs, les suivis confirment les observations des producteurs en ce qui concernent le positionnement des cycles de culture, les incidences en nématodes

étant bien plus faibles sur les plantations hivernales par rapport aux plantations de septembre et octobre, du fait de la moindre activité des nématodes en période froide.

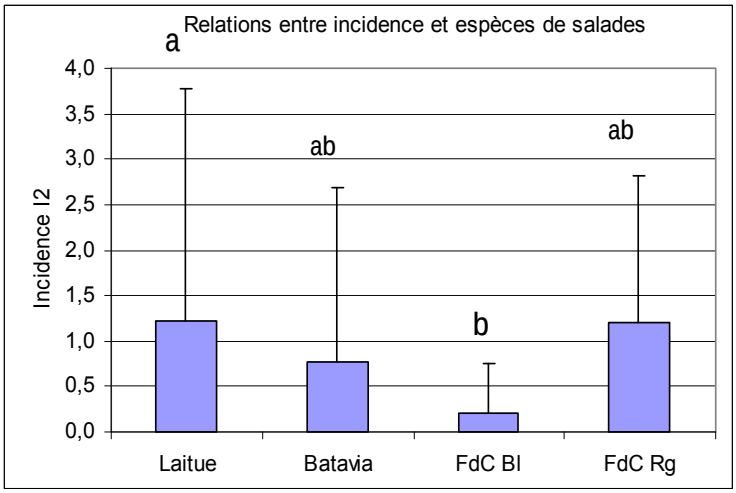

Figure 4 : Relations entre incidences et espèces de salades (les lettres indiquent les différences significatives à p=0,09)

En termes de gravité de la maladie, il semblerait que, contrairement aux incidences, la sévérité des attaques soit peu corrélée aux caractéristiques des systèmes de culture mais qu'elle soit surtout dépendante des conditions en cours de culture. Le climat pourrait notamment être déterminant sur les sévérités observées sur les cultures. Cette hypothèse est à vérifier par des expérimentations complémentaires.

Par ailleurs, cette étude confirme l'intérêt d'appréhender la gestion des bioagresseurs de façon systémique en intégrant l'ensemble des composantes des systèmes de culture (successions de culture, techniques alternatives et itinéraires techniques). Les comportements différents du champignon *Sclerotinia* et des nématodes *Meloidogyne* face aux mêmes systèmes de culture montrent également qu'une méthode de contrôle unique de l'ensemble des bioagresseurs est difficilement concevable. L'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie de gestion de ces problèmes doivent être réfléchies et adaptées en fonction des bioagresseurs dominants ou en développement sur les parcelles.

2) Essai en parcelles expérimentales

Contrairement aux suivis en parcelles de producteurs testant des systèmes classiques déjà utilisés en routine par les maraîchers, l'essai en parcelles expérimentales (INRA Alénya – Pyrénées orientales) visait à tester des combinaisons de techniques plus novatrices, en particulier avec l'utilisation de moutarde comme engrais vert. Deux variétés de moutarde brune, à faibles et fortes caractéristiques biocides respectivement, ont été utilisées, pour déterminer la plus-value potentielle de cette propriété biocide sur l'efficacité d'un l'engrais vert.

Malheureusement, ce dispositif a été perturbé en cours d'expérimentation par une forte hétérogénéité des cultures de moutarde et une très faible production de matière sèche. Ces problèmes sont liés à des problèmes de fontes de semis par *Rhizoctonia*, des problèmes de levée et de croissance des plantes. Cette hétérogénéité et ces défauts de croissance ont également été observés sur d'autres essais mis en place pendant la même période sur des abris localisés dans le sud de la France (CTIFL, Aprel…). Les températures élevées sous abri pendant les semis pourraient en être la cause. Ces résultats laissent penser que, si la moutarde reste une espèce candidate intéressante sous abri du fait de la production de glucosinolates ayant une activité biocide sur les pathogènes, il faut revoir complètement la position de cette culture dans la saison, en décalant les semis à des périodes plus froides, ce qui

conduira également à réviser son insertion comme engrais verts dans des successions de cultures sous abris. Des expérimentations complémentaires doivent être réalisées pour adapter la mise en œuvre de cette technique alternative aux conditions de cultures méditerranéennes.

2-2. Modélisation de l'incorporation d'engrais vert et de l'apport d'engrais organique sur le bilan azoté d'une succession salade-salade

Une partie des engrais verts et des engrais organiques ou organo-minéraux qui sont apportés dans les parcelles de salade est destiné à se transformer en un humus stable dont le turn-over est lent. Cependant, une fraction importante de ces matières enfouies est rapidement minéralisée par les micro-organismes, ce qui conduit notamment à libérer des nitrates dans la solution du sol. Des mesures sur des sols maraîchers du sud de la France avaient permis de déterminer des vitesses de minéralisation nette allant de 0.27 à 2.37 kg N/ha/jour (Bertuzzi *et al*., 2002). Des simulations avec le modèle PASTIS[1] ont permis d'explorer les sources de cette variabilité et de les hiérarchiser. 648 situations de production de laitues d'abri ont été simulées, correspondant à des combinaisons réalistes de caractéristiques du milieu (comportement hydraulique du sol, caractéristique de l'humus et de la biomasse microbienne, type de climat) et de techniques culturales (pratiques d'irrigation, nature des amendements organiques, calendrier de culture). Chaque simulation représente une période d'environ 220 jours, d'octobre à mars, dans laquelle deux cultures de laitues sous abri sont mises en place. La minéralisation est apparue variable avant tout en fonction de la nature des résidus, avec des valeurs moyennes de 61 kg N/ha (sur la période de 220 jours) en l'absence d'apport organique l'année de simulation, de 174 kg N/ha avec l'enfouissement d'un sorgho fourrager, et de 248 kg N/ha avec un apport de compost de type végéthumus®. Mais pour un type de résidu donné, une grande variabilité subsiste en fonction des autres caractéristiques du milieu et des techniques culturales choisies (Figure 5).

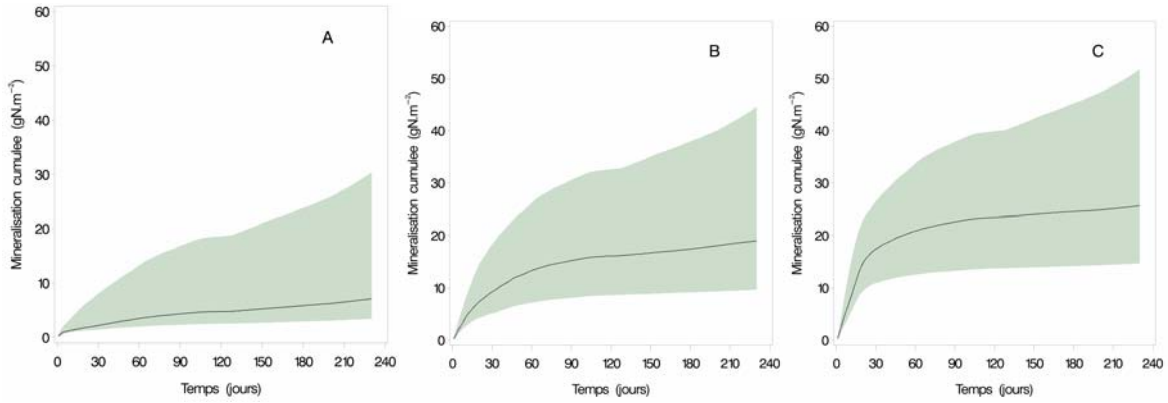

Figure 5 : Simulation de minéralisation nette cumulée d'azote dans une parcelle de laitue sous abri froid. Chaque graphique représente une modalité d'apport de matière organique : A : pas d'apport ; B : enfouissement de résidus de sorghos cultivés comme engrais vert durant l'été ; C : enfouissement d'un engrais organo-minéral de type végéthumus®. Les lignes représentent la valeur médiane obtenue pour 216 simulations avec des combinaisons variables de caractéristiques du milieu et de pratiques techniques. Les parties grisées représentent l'écart entre les valeurs minimales et maximales.

Par son intensité, la minéralisation de l'azote contribue de manière importante à l'alimentation azotée de la culture. La figure 5 montre que dans les cas où un amendement organique est enfoui dans le sol,

[1] PASTIS est un modèle simulant les flux d'eau, de solutés, et de chaleur dans le sol, qui comporte un module de transformations biologiques du carbone et de l'azote et un module de culture permettant de simuler une production de laitue.

la minéralisation d'azote est très importante dans les 30 premiers jours qui suivent l'enfouissement. Cette période correspond à de faibles besoins en azote de la culture, même si la laitue est plantée peu de temps après l'enfouissement de la matière organique. Par ailleurs, cette période présente un risque important de lessivage d'azote nitrique du fait du maintien d'une teneur en eau du sol élevée. Ainsi, en moyenne, le lessivage d'azote sera d'autant plus important que la minéralisation de la matière organique avant la plantation et pendant la première partie de la culture sera forte. Les simulations avec Pastis donnent un lessivage moyen de 25 kg N/ha sans apport de matière organique, de 45 kg N/ha avec l'enfouissement d'un sorgho engrais vert, et de 63 kg N/ha avec un apport de compost de type végéthumus®. L'apport d'engrais vert ou d'amendement organique augmente donc le risque d'impacts sur l'environnement, et doit être raisonné par rapport au type de sol et à l'évolution tendancielle de sa teneur en matière organique. L'importante minéralisation automnale est un élément de plus justifiant le raisonnement de la fertilisation azotée, et, comme déjà indiqué plus haut, le décalage des apports à la deuxième partie de la culture, si les analyses de sol confirment sa nécessité.

L'introduction d'engrais vert dans les rotations a plusieurs fonctions : à son enfouissement, il contribue au maintien de la teneur en matière organique du sol et à une bonne structure. L'engrais vert pendant sa culture peut s'enraciner profondément, et ainsi récupérer les nitrates profonds qui ne pourraient pas bénéficier à une culture à enracinement superficiel comme la laitue. Enfin, l'engrais vert a une influence sur le contenu et l'activité des microorganismes du sol et peut contribuer à limiter certaines maladies (Thorup-Kristensen *et al.*, 2003). Mais les travaux présentés ci-dessus montrent que l'introduction d'engrais vert dans la rotation peut aussi avoir des effets délétères : tendance à l'augmentation des épidémies de *Sclerotinia* et augmentation des risques de lessivage de nitrates lors de la minéralisation rapide d'une partie des résidus enfouis. On ignore si l'augmentation des épidémies de *Sclerotinia* dans les rotations incluant des engrais verts est lié au surcroît d'azote dans les cultures (dont on a vu qu'il favorisait la maladie), à l'effet de dispersion de l'inoculum suite au travail du sol nécessaire pour enfouir l'engrais vert, ou à une conjonction d'autres facteurs encore. En tout état de cause, les caractéristiques du sol et les choix techniques mis en œuvre dans le système de culture vont avoir une influence sur les conditions de réussite de l'introduction d'engrais verts dans les rotations. La fréquence de retour, la date et la durée d'implantation et le type d'espèce implantée doivent donc être réfléchis au cas par cas dans les exploitations.

3- Pistes de recherches pour une évolution des systèmes de cultures

3-1. Les possibilités d'amélioration des systèmes de culture

Les travaux précédents montrent l'existence d'interactions de nature variée, entre techniques, milieu et peuplements végétaux. Compte tenu des connaissances scientifiques actuelles, il est encore difficile de proposer des combinaisons concrètes de techniques, qui permettent à la fois une limitation des pathogènes, un maintien d'un niveau élevé de productivité et une réduction des risques d'atteintes à l'environnement. Mais il est possible, par contre, de dégager des voies d'améliorations possibles, qui pourraient être mises au point et testées à court ou moyen terme.

1) <u>Combiner des techniques pour un contrôle durable des pathogènes</u>

Concernant le contrôle des pathogènes, la réduction des moyens de contrôle chimique suppose de passer d'une logique de traitement curatif à une logique d'anticipation, qui favorise les autorégulations du système par lui-même sur le long terme. Mais comment passer de ces principes généraux à une opérationnalisation ? Comment favoriser le maintien des auxiliaires, des équilibres entre micro-organismes et utiliser les fonctionnalités naturelles des écosystèmes dans un système où le choix des espèces est très contraint par des critères commerciaux ?

Une première voie consiste à optimiser les successions de cultures, en introduisant des plantes pièges et des plantes peu sensibles, afin de compenser la grande sensibilité de certaines espèces

maraîchères. Si des résistances variétales existent (par exemple pour la résistance aux nématodes à galles, Djian-Caporalino *et al*., 2009), la gestion des successions de culture doit encore être affinée, pour définir quelle doit être la fréquence d'introduction des espèce pièges par rapport aux espèces sensibles, leur positionnement dans le temps, ou encore la durée d'éviction de certaines espèces sensibles. De plus, il faut également tester la sensibilité de ces nouvelles successions de culture aux autres pathogènes et ravageurs les plus fréquents en maraîchage.

Une autre voie consisterait à réfléchir à l'agencement temporel des opérations culturales et des espèces. Ainsi, le décalage des dates de plantations des espèces sensibles en dehors des périodes à risques est une voie d'amélioration, comme l'ont montré Ornat *et al*. (2001) en Espagne. Sur les parcelles infestées en nématodes, décaler les plantations de salade de septembre à novembre permettrait de réduire les risques de multiplication de l'inoculum, et progressivement assainir les parcelles. Une autre amélioration possible consisterait à réfléchir aux conséquences des différents actes techniques sur les populations de ravageurs, et à gérer mieux leurs effets. Par exemple l'utilisation d'une espèce commerciale sensible (nécessaire sur un plan économique) ou d'un engrais vert sensible (intéressant dans le contrôle de la fertilité) pourrait être compensée par des actes techniques qui ont une action létale (par exemple la solarisation), ou une action de régulation des antagonistes (par exemple l'apport d'amendement organique), à condition de réfléchir à leur positionnement temporel.

2) Combiner des techniques pour un pilotage efficient de la fertilisation

Du point de vue de la gestion de l'azote, il apparaît que les successions de culture en rang (par exemple la tomate) et de culture en plein (par exemple la salade) ne sont pas optimales. La ferti-irrigation des cultures en rang induit dans la plupart des contextes culturaux une accumulation d'azote minéral dans le sol sous les inter-rangs. Ceci est dû au fait que l'azote nitrique de la fertilisation apportée sous les rangs de culture migre horizontalement, par diffusion et convection, vers les zones d'inter-rang, dans lesquelles il y a peu de racines susceptibles de le récupérer. En conséquence, en fin de culture en rang, on a une importante hétérogénéité horizontale de concentration en azote à l'échelle de la parcelle. Lors des apports d'eau qui précèdent et suivent la plantation de la laitue, une partie de l'azote excédentaire de l'inter-rang est lessivé, tandis que l'autre partie se retrouve dans la culture, induisant un différentiel de concentration en nitrates dans les laitues récoltées en fonction de leurs positions par rapport aux rangs et inter-rangs de la culture précédente (Lecompte, comm. pers.). Ce phénomène est limité dans des cas de sous-fertilisation de la culture en rang (Lecompte *et al*., 2008), mais il reste significatif à des niveaux optimaux de fertilisation. Il conviendrait donc d'inventer un moyen de supprimer ce reliquat d'azote avant de planter les laitues d'automne et d'hiver, pour améliorer l'homogénéité des cultures et réduire les risques de lessivage. Ce constat peut déboucher soit sur le développement de fertilisation différentielle des lignes de laitue suivant leurs positions, soit sur une recherche d'homogénéisation du reliquat, par exemple par l'utilisation d'engrais verts après une culture en rangs et une réflexion sur le travail du sol.

De plus, la disponibilité en azote pour les cultures ne dépend pas seulement de la fertilisation minérale, mais aussi de l'utilisation d'engrais verts et d'amendements organiques (les types de matières utilisées, mais aussi les modalités et les périodes d'enfouissement). La solarisation des sols affecte également l'azote du sol. Pour piloter au mieux la fertilisation dans un objectif de qualité, il ne faut donc pas seulement piloter l'apport d'azote en cours de culture, mais aussi pendant l'interculture, et en analyser les conséquences sur la culture, mais aussi sur l'environnement.

Néanmoins, qu'il s'agisse de pilotage de la fertilité ou de contrôle des pathogènes, toutes ces propositions supposent d'être opérationnalisées, c'est-à-dire qu'il faut être capable de définir des seuils, des fréquences, des doses optimales en fonction des caractéristiques propres des parcelles… Cela suppose de disposer de méthodes d'évaluation multicritères des systèmes techniques, à la fois sous l'angle du contrôle des pathogènes, de la productivité et de l'environnement.

3-2. Des outils d'évaluation des systèmes de culture

1) Modèle Pastis

Le travail de modélisation des cultures de laitue présenté précédemment, réalisé avec le modèle PASTIS, a servi à évaluer les performances des systèmes de culture simulés, performances basées sur les variables du bilan azoté. Trois indices ont été construits, à partir des sorties du modèle concernant l'absorption d'azote par le peuplement (effet sur la qualité des produits), le lessivage des nitrates (effet sur la pollution des nappes), et la dénitrification (rejet de gaz à effet de serre). Un indicateur global, construit par combinaison linéaire de ces trois indices, a été calculé pour chaque système de culture simulé, puis les systèmes ont été classés comme « bons » ou « mauvais » suivant la valeur de cet indicateur (Lecompte et Lafolie, comm. pers.). Il ressort de cette étude qu'environ 1/3 seulement des 648 systèmes simulés se sont avérés satisfaisants, ce qui met en évidence la marge de progrès à réaliser, notamment en matière d'environnement. Les propriétés hydrauliques du sol et le climat ont eu une influence déterminante sur la valeur de l'indicateur de performance.

Un constat principal peut être tiré de cette étude : certains milieux ont des caractéristiques favorables à la culture de la laitue, et dans ces milieux de nombreuses combinaisons de techniques peuvent être choisies sans que cela affecte les performances du système de culture. À l'inverse, certains milieux sont beaucoup plus contraignants, et un petit nombre seulement de combinaisons de techniques peut être mis en œuvre pour obtenir des résultats agronomiques satisfaisants. Un autre enseignement de cette étude est que les modalités de mise en œuvre d'une technique sont très contingentes des caractéristiques du milieu, et qu'un choix technique favorable dans un contexte pourra ne pas être optimal dans un autre contexte. Par exemple, le choix d'irriguer sur la base d'un seuil d'enclenchement de l'irrigation à un potentiel hydrique du sol de -20 kPa[2] est préférable à un raisonnement de l'irrigation basé sur le calcul de l'ETP dans un grand nombre de combinaisons de sol et de climat. Mais dans un petit nombre de cas, l'irrigation basée sur l'ETP sera nettement favorable du point de vue des résultats agronomiques.

2) Modèle qualitatif multicritère pour étudier l'impact des systèmes de culture sur les maladies et ravageurs

Les techniques alternatives de lutte ne se décident pas toutes à la même échelle temporelle et peuvent interagir, entre elles comme avec d'autres décisions constitutives du système de culture. Il est donc difficile, même pour un expert, d'évaluer les conséquences de telle ou telle combinaison technique et des modalités de leur mise en œuvre, et ce d'autant plus que cette évaluation porte sur plusieurs dimensions (pathologie, environnement, qualité, rendement). Le recours à la modélisation pour évaluer ces conséquences s'impose donc, dans une démarche multicritère. Afin de valoriser aussi les connaissances que les acteurs (agriculteurs et conseillers) ont acquises, pour compléter des connaissances scientifiques encore incomplètes dans ce domaine compte tenu de son évolution relativement récente, une méthodologie qualitative est préférable, car le mode de représentation des connaissances est adapté à la formulation de celles-ci par ces experts. Une méthodologie de modélisation de type évaluation multicritère qualitative (DEXi, Bohanec *et al.*, 2004) semble donc particulièrement adaptée pour agréger et synthétiser les diverses connaissances disponibles aujourd'hui pour évaluer des systèmes de culture maraîchers innovants conçus entre autres pour contrôler les maladies telluriques. Son principe s'appuie sur la construction d'un arbre hiérarchique partant de la description des techniques mobilisées et de leur organisation dans un système de culture et aboutissant à une note qualitative représentant l'aptitude de ce système à limiter l'incidence des maladies sur les cultures.

[2] Ce qui implique un suivi régulier du potentiel hydrique du sol avec des tensiomètres ou des watermarks

L'analyse de la biologie et de l'écologie des nématodes à galles et des champignons *Botrytis* et *Sclerotinia* fait apparaître trois modes d'interaction entre système de culture et ravageurs/maladies : les actions directes sur ces agents, les actions modifiant leur environnement biotique et abiotique et les actions modifiant la sensibilité de la culture à ces agents. Certaines techniques agissent simultanément sur plusieurs processus. Les actions directes sur les agents pathogènes passent par leur suppression immédiate (biofumigation, solarisation, vapeur, enfouissement d'engrais vert ou d'amendement organique nématicide) ou par une perturbation de leur cycle biologique en particulier en privant ces pathogènes d'hôtes à des moments clés de leur cycle (reproduction en particulier). Le choix des espèces cultivées, des dates de plantation, donc de la rotation, correspondent à ce dernier mode. Les actions sur l'environnement se décomposent en actions modifiant les conditions abiotiques (température, humidité), donc liées à des choix techniques tels que le paillage et le mode et la conduite de l'irrigation, et en actions modifiant l'environnement biotique des bioagresseurs. Entrent dans cette dernière catégorie les engrais verts et les amendements organiques (surtout frais) car ils modifient la composition et le volume des populations biotiques du sol, ce qui modifie les compétitions entre ces organismes, et plus particulièrement entre pathogènes et non pathogènes. La lutte biologique par inoculation du sol avec des champignons ou des bactéries nématophages en est un autre exemple mais dont l'emploi reste encore à la fois limité (peu de produits autorisés) et délicat (la plupart des agents de lutte sont issus de régions pédoclimatiques différant de nos conditions européennes et méditerranéennes et semblent donc peu adaptés) (Pimentel *et al.*, 2009). Toutefois, ce mode d'action modifiant les compétitions et les équilibres entre populations est délicat à utiliser. Mateille *et al.* (2008) ont par exemple montré que la modification des équilibres entre espèces de nématodes ne résulte pas nécessairement en une modification de la pathogénicité globale car certaines espèces non ou peu pathogènes le deviennent après modification des équilibres. Le dernier mode d'action consiste à modifier la sensibilité des plantes aux maladies et ravageurs. Les interactions entre fertilisation azotée et sensibilité des plantes aux champignons ont été illustrées et discutées plus haut dans cet article.

Les différentes techniques culturales mises en œuvre dans un système technique maraîcher agissent donc quasiment toutes sur les bioagresseurs, mais par des modes d'action variés. Elles interagissent aussi entre elles selon d'autres dimensions, notamment environnementale ou de qualité des produits à travers la gestion de l'azote comme illustré plus haut dans cet article (interactions engrais vert ou amendement organique/fertilisation/irrigation). Un travail centré sur la gestion des nématodes a montré que la méthodologie d'évaluation multicritère DEXi permet d'organiser ces interactions pour permettre l'évaluation des systèmes de culture (Tchamitchian *et al.,* 2009). Les évaluations de systèmes existants réalisées avec cette méthodologie sont correctement corrélées aux incidences et sévérités observées sur les parcelles d'agriculteurs où ces systèmes sont mis en œuvre (systèmes et parcelles suivies dans le cadre des travaux décrits ci-dessus, § II.1). Une extension de ce système d'évaluation à la prise en compte des effets conjoints de ces systèmes sur la gestion des nématodes et des champignons *Botrytis* et *Sclerotinia* est en cours, en parallèle avec une extension à l'évaluation environnementale (programme ANR/Systerra SysBioTel[3]).

3-3 Une démarche de conception de nouveaux systèmes de culture en partenariat avec des professionnels agricoles

Différentes méthodologies de conception de systèmes de culture existent, depuis des démarches uniquement portées par les scientifiques jusqu'à des démarches de recherche-action (Douthwaite *et al*., 2003). Elles varient notamment par le niveau d'implication des partenaires professionnels et le moment de leur implication dans le processus de recherche, suivant qu'ils sont mobilisés dans la construction du cahier des charges des objectifs, dans la recherche des solutions techniques, dans la définition des

[3] http://www.inra.fr/sysbiotel

critères d'évaluation ou encore dans la validation finale des propositions techniques (Loyce et Wery, 2006).

En maraîchage sous abri, peu de recherches systémiques ont été conduites jusqu'à présent dans un objectif de contrôle des maladies, même si des outils d'aide à la décision en matière de succession de culture existent déjà (Dogliotti *et al*., 2004). L'objectif du projet conduit à l'INRA d'Avignon est de construire en partenariat des systèmes de culture alternatifs, en optimisant l'efficacité des combinaisons de techniques déjà connues et/ou en inventant des systèmes plus en rupture, modifiant plus radicalement les systèmes techniques actuels. Un groupe d'experts constitué de conseillers techniques et d'agriculteurs a donc été sollicité dans cet objectif. Son rôle est de participer à la recherche de nouvelles combinaisons techniques, d'apporter une expertise sur l'effet de certaines techniques encore mal évaluées par les scientifiques, de critiquer et hiérarchiser les propositions techniques sur la base des contraintes et opportunités commerciales des agriculteurs. L'outil DEXi sera mobilisé pour évaluer la résistance/résilience des systèmes de culture aux ravageurs et pathogènes. Les systèmes les plus prometteurs seront alors testés dans des stations expérimentales et en parcelles de producteurs (Figure 6).

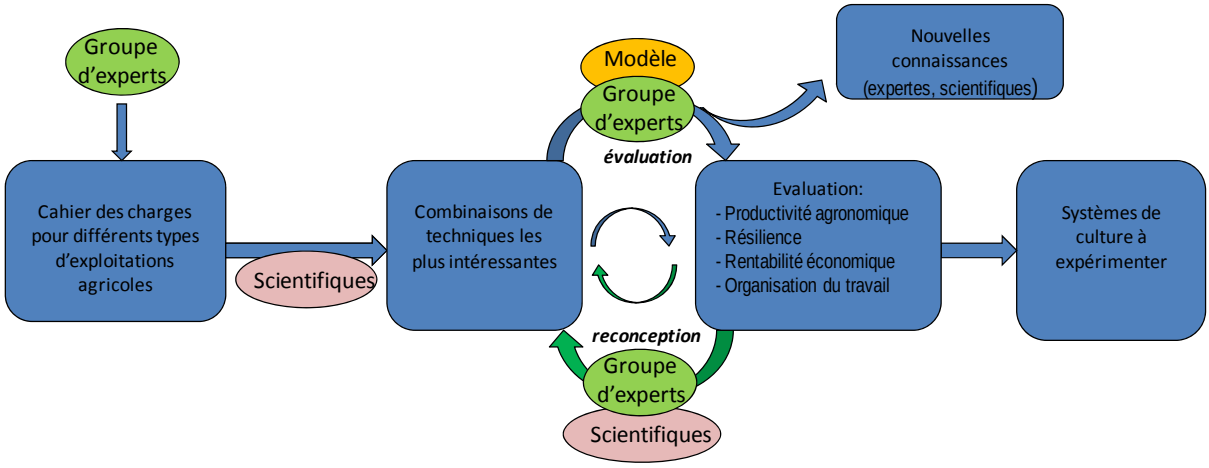

Figure 6 : Dispositif de conception de systèmes de culture en partenariat

L'enjeu est de combiner les connaissances des scientifiques et des professionnels, notamment sur l'évaluation des effets combinés des techniques pour lesquels les connaissances scientifiques sont encore lacunaires.

La recherche de solutions peut se faire à l'échelle de la parcelle, comme indiqué dans la partie III.1, mais sans doute sera-t-il nécessaire de concevoir des innovations à des échelles spatiales plus larges, pour tenir compte non seulement des critères pathologiques et agronomiques, mais aussi de critères économiques et sociaux. En effet, certaines techniques comme les engrais verts et la solarisation occupent les parcelles pendant plusieurs semaines et modifient les calendriers de cultures. L'introduction de cultures à effet biocide comme les Alliacées pose la question de leurs débouchés commerciaux. Il est donc essentiel de réfléchir à l'organisation dans le temps des cultures commerciales et des intercultures, à l'organisation du travail, aux débouchés des nouvelles cultures à intégrer dans la rotation pour limiter les maladies (Bressoud *et al*., 2009).

Les marges de manœuvre des agriculteurs pour adopter des innovations techniques varient suivant les types d'exploitations, notamment suivant qu'il s'agit d'exploitations spécialisées ou diversifiées, qui combinent ou pas du maraîchage et d'autres cultures, des cultures de plein champ et des abris (Navarrete *et al*., 2010). Les innovations doivent donc tenir compte de la diversité des exploitations,

d'où le choix dans le projet de recherche actuel de construire des catégories d'innovations techniques par types d'exploitations (Tableau 1), et de s'appuyer sur les connaissances des professionnels pour exprimer et intégrer ces contraintes, autant que pour évaluer les possibilités de les lever.

Tableau 1. Cahier des charges pour la construction de systèmes techniques alternatifs.

a) Exemple d'une exploitation maraîchère de 10 ha, entièrement couverte avec des tunnels plastiques, commercialisant ses produits dans une OP. Les principaux dégâts sont dus aux nématodes.

Composantes de la durabilité	Objectif général de l'agriculteur	Critères pour la re-conception des systèmes techniques
Economie	Priorité aux cultures « classiques »	Cultiver les laitues en hiver et les *Solanacées* ou *Cucurbitacées* en été sur au moins 2/3 des abris chaque année.
	Limiter les cultures alternatives (celles pour lesquelles l'OP a une demande limitée)	Planter moins de 20% de la surface avec des espèces alternatives
Agronomie	Successions de culture intensives	Cultures commerciales au moins 8 mois par an
	Limiter la fatigue des sols	Au moins un engrais-vert chaque année
Pathologie	Limiter les contaminations entre parcelles	Eviter la dissémination des nématodes d'une parcelle à l'autre

b) Exemple d'une exploitation maraîchère de taille mixte, combinant abris et plein champ, vendant ses produits à des grossistes et en vente directe. Les principaux problèmes liés à un fort inoculum de champignons dans le sol.

Composantes de la durabilité	Objectif général de l'agriculteur	Critères pour la re-conception des systèmes techniques
Economie	Equilibre entre cultures classiques (grossistes) et cultures de diversification (vente directe)	Cultiver des laitues, solanacées et cucurbitacées sur la ½ de la surface
Agronomie	Augmenter la matière organique des sols	Apporter des amendements organiques à forte dose
Pathologie	Limiter le développement de l'inoculum et son expression dans les parcelles déjà contaminées	Permettre l'usage des engrais verts et désinfection solaire au moins deux mois/ans sur chaque parcelle Décaler les dates de plantation pour éviter la multiplication de l'inoculum

Ainsi, il s'agit de faire émerger des combinaisons techniques, à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, pour leur efficacité sur le contrôle des pathogènes, mais aussi de vérifier qu'elles permettent une productivité satisfaisante (en rendement, qualité, variabilité, risque…) et qu'elles n'ont pas d'effets négatifs sur l'environnement. L'association d'experts ayant des compétences complémentaires dans le groupe permet d'obtenir une pluralité de diagnostics vis-à-vis de ces critères et de rechercher des compromis satisfaisants. A l'issue de cette démarche itérative de conception/adaptation/évaluation des solutions techniques, un petit nombre de prototypes pourront alors être expérimentés en station expérimentale ou chez des producteurs.

Conclusion

La qualité est un concept multicritère (dont seuls certains critères ont été abordés ici), mais aussi étroitement lié aux questions de rendement, aux conséquences environnementales… Cet article fait état d'un certain nombre de travaux traitant de l'évaluation et de la conception de systèmes de culture maraîchers. À ce titre, il permet d'illustrer qu'il existe une multiplicité de voies d'action sur la qualité, du fait que de nombreuses techniques jouant sur un même critère de qualité et que ces techniques sont en interactions entre elles. Cela illustre la complexité de la recherche sur la conception des systèmes techniques. Plusieurs démarches complémentaires ont été identifiées, certaines basées sur l'expérimentation multifactorielle en conditions plus ou moins contrôlées, d'autres sur la modélisation quantitative ou qualitative, d'autres enfin sur la conception de systèmes par les scientifiques et/ou à dire d'experts…

À la différence des systèmes de grande culture, en maraîchage les systèmes à bas niveaux d'intrants ne sont pas forcément économiquement plus rentables que les systèmes intensifs, car certains coûts comme les charges de main d'œuvre, les charges de structure des abris sont incompressibles. En maraîchage, les questions de commercialisation et de gestion de la main d'œuvre apparaissent donc particulièrement importantes à prendre en compte. La valorisation économique de produits dont la qualité est accrue et dont la culture respecte mieux l'environnement devient alors une question centrale. L'appropriation par les producteurs des innovations agronomiques envisagées ici ne sera possible que si celles-ci leur confèrent un avantage commercial, notamment en termes de prix de vente. Cependant on note d'ores et déjà une tendance, du fait de la prise de conscience croissante par les consommateurs des enjeux environnementaux, à un durcissement des conditions d'accès à certains marchés. L'évolution des systèmes de culture pourrait donc à court terme devenir une absolue nécessité pour élargir les débouchés commerciaux.

Si les travaux cités sont issus de démarches scientifiques, il est clair que les agriculteurs eux-mêmes innovent, mettent au point et testent des combinaisons alternatives sur leurs propres exploitations (Torrès, 2010). Valoriser leur expertise, identifier dans leurs propres systèmes ce qui est spécifique et ce qui est généralisable apparaît comme une piste de recherche intéressante, source potentielle d'innovations qui pourraient être proposées à un plus grand nombre d'entre eux.

Références bibliographiques

Abawi G.S., Widmer T.L., 2000. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. Appl. Soil Ecol. 15, 37–47.

Bertuzzi P., Raynal-Lacroix C., Gay F., de Cockborne A-M., Abarza E., Bressoud F., Dumoulin J., Mounier A., 2002. Culture d'une salade sous abri: savoir évaluer la minéralisation nette de l'azote au champ. Infos-Ctifl 183, 40-45.

Bohanec M., Džeroski S., Žnidaršič M., Messéan A., Scatasta S., Wesseler J. 2004. Multi-attribute modeling of economic and ecological impacts of cropping systems. Informatica 28, 387–392.

Boland G.J., Hall R., 1994. Index of plant hosts of *Sclerotinia sclerotiorum*. Canadian Journal of Plant Pathology http://www.informaworld.com/smpp/title~db=all~content=t913932741~tab=issueslist~branches=16 - v16 16, 93–108.

Bruckler L., de Cockborne A-M., Renault P., Claudot B., 1997. Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. Irrigation Science 17, 53-61.

Bressoud F., Navarrete M., Mazollier C., 2009. Le maraîchage et la production de légumes biologiques: ajuster la production et la commercialisation. In : Bellon S. et Lamine C. (Eds),*Transitions vers l'agriculture biologique*, Quae et Educadri editions, pp. 75-101.

Cardenas-Navarro R., Adamowicz S., Robin P., 1999. Nitrate accumulation in plants: a role for water. Journal of Experimental Botany 50, 613-624.

Coria-Cayupan Y.S., De Pinto M.I.S., Nazareno M.A., 2009. Variations in Bioactive Substance Contents and Crop Yields of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivated in Soils with Different Fertilization Treatments. Journal of Agricultural and Food Chemistry 57, 10122-10129.

Dapoigny L., de Tourdonnet S., Roger-Estrade J., Jeuffroy M-H., Fleury A., 2000. Effect of nitrogen nutrition on growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.), under various conditions of radiation and temperature. Agronomie 20, 843-855.

Datnoff L.E., Elmer W.H., Huber D.M., 2007. Mineral nutrition and plant disease. American Phytopathological Society (APS Press), St. Paul.

de Tourdonnet S., 1998. Maîtrise de la qualité et de la pollution nitrique en production de laitues sous abri plastique: diagnostic et modélisation des effets des systèmes de culture. Thèse de docteur ingénieur, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris. 204 p.

de Tourdonnet S., Meynard J-M., Lafolie F., Roger-Estrade J., Lagier J., Sebillotte M., 2001. Non-uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality. Agronomie 21, 297-309.

Djian-Caporalino, C., Védie, H. Arrufat, A., 2009. Gestion des nématodes à galles : lutte conventionnelle et luttes alternatives. L'atout des plantes pièges. Phytoma, 624, 21-25.

Dogliotti S., Rossing W.A.H., van Ittersum M.K., 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay. Agr. Syst. 80, 277–302.

Douthwaite B., Kuby T., van de Fliert E., Schulz S., 2003. Impact pathway evaluation: an approach for aciveing and attributing impact in complex systems. Agric. Systems 78, 243-265.

Fallovo C., Rouphael Y., Rea E., Battistelli A., Colla G., 2009. Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. Journal of the Science of Food and Agriculture 89, 1682-1689.

Gay F., 2002. Elaboration d'une méthode d'évaluation des risques de pollution nitrique et de perte de rendement en parcelles agricoles. Application à la gestion des irrigations en culture de laitue sous abri froid. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier.238 p.

Grube, R.; Ryder, E., 2004. Identification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) germplasm with genetic resistance to drop caused by *Sclerotinia minor*. Journal of American Society of Horticulture Sciences 129, 70-76.

Hill S.B.; Mac Rae R.J., 1995. Conceptual frameworks for the transition from conventional to sustainable agriculture. Journal of sustainable agriculture 7, 81-87.

Huber D.M., Watson R.D., 1974. Nitrogen form and plant disease. Annual Review of Phytopathology 12, 139-165.

Huber D.M., Thompson I.A., 2007. Nitrogen and plant disease. In : L. E. Datnoff, W. H. Elmer, D. M. Huber (Eds.), Mineral nutrition and plant disease. APS Press, Saint Paul, MN, USA. pp. 31-44

Jackson L.E., Stivers L.J., Warden B.T., Tanji K.K., 1994. Crop nitrogen utilization and soil nitrate loss in a lettuce field. Fertilizer Research 37, 93-105.

Konstantopoulou E., Kapotis G., Salachas G., Petropoulos S.A., Karapanos I.C., Passam H.C., 2010. Nutritional quality of greenhouse lettuce at harvest and after storage in relation to N application and cultivation season. Scientia Horticulturae 125, 93-94.

Lafolie F., Bruckler L., de Cockborne A-M., Laboucarie C., 1997. Modelling the water transport and nitrogen dynamics in irrigated salad crops. Irrigation Science 17, 95-104.

Lecompte F., Abro M.A., Nicot P., 2010. Contrasted responses of *Botrytis cinerea* strains developing on tomato plants grown under different nitrogen nutrition regimes. Plant Pathology 59, 891-899.

Lecompte F., Bressoud F., Parès L., De Bruyne F., 2008. Root and nitrate distribution as related to the critical plant-N status of a fertigated tomato crop. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 83, 223-231.

Leenhardt D., Lafolie F., Bruckler L., de Cockborne A-M., 1998. Evaluating irrigation strategies for lettuce by simulation: 2. Nitrogen budget. European Journal of Agronomy 8, 267-282.

Loyce C., Wery J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. In DoréT. et al. (Eds) L'agronomie aujourd'hui, QUAE, Versailles, pp. 77-95

Mateille T., Cadet P., Fargette, M., 2008. Control and management of plant-parasitic nematode communities in a soil conservation approach. In : Ciancio A., Mukerji K.G. (Eds.), Integrated management and biocontrol of vegetable and grain crops nematodes. Springer, pp. 79-97.

Melzer M.S., Smith E.A., Boland G., 1997. Index of plant hosts of *Sclerotinia minor*. Can. J. Plant Pathol. 19, 272–280

Meynard J-M., Doré T., Lucas P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. Comptes Rendus Biologies 326, 37-46.

Navarrete M., Tchamitchian M., Aissa-Madani C., Collange B., Taussig C., 2010. Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool. The case of soilborne disease control in market-gardening cropping systems, International symposium Innovation and Sustainable Development in Agriculture and food, Montpellier, 28/06-01/07/2010, http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00512273/fr/.

Ornat, C., Sorribas, F.J., Verdejo-Lucas, S., Galeano, M., 2001. Effects of planting date on development of Meloidogyne javanica on lettuce in northeastern Spain. Nematropica 31, 148-149.

Pimentel M.S., Peixoto A.R., da Paz C.D., 2009. Potential of biological control of Meloidogyne by nematophagous fungi and bacteria in coffee. Coffee Science, Lavras 4, 84–92

Schwartz H.F., Steadman J.R., 1978. Factors Affecting Sclerotium Populations of, and Apothecium Production by, *Sclerotinia sclerotiorum*. Phytopathology 68, 383-388.

Tchamitchian M., Collange B., Navarrete M., Peyre G., 2009. Multicriteria evaluation of the pathological resilience of in-soil vegetable protected cropping systems. In : Gosselin A. et Dorais M. *(*Eds*.)* GreenSys 2009, Québec City, Québec, Canada.

Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Advances in Agronomy 79, 227-302.

Torrès M., 2010. Les systèmes alternatifs de control des pathogènes telluriques en maraîchage. Analyse des modalités techniques et évaluation des risques d'infestation en exploitations agricoles. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur ISARA Lyon, 58p. + annexes

Walters D.R., Bingham I.J., 2007. Influence of nutrition on disease development caused by fungal pathogens: implications for plant disease control. Annals of Applied Biology 151, 307-324.