

Comment appliquer correctement les produits phytosanitaires par le système d'irrigation goutte à goutte

Mauro JERMINI¹, Peter WYSS², Marco DE ROSSA³, Nicola SOLCÀ⁴, Sebastiano SCETRINI¹

¹Agroscope, 6593 Cadenazzo, Suisse

²Syngenta Crop Protection AG, 4002 Basel, Suisse

³Laboratorio chimico cantonale, 6500 Bellinzona, Suisse

⁴Ufficio della gestione dei rischi ambientali e del suolo, 6500 Bellinzona, Suisse

Renseignements : Mauro Jermini, tél. +41 58 466 00 32, e-mail : mauro.jermini@agroscope.admin.ch, www.agroscope.ch



Culture d'aubergine hors-sol.

Introduction

Il est mondialement reconnu que l'eau est un élément critique pour le développement d'une agriculture durable, en particulier dans les régions arides où la

gestion optimale de cette ressource représente une priorité (Chartzoulakis et Bertaki 2015). Pour cette raison, des techniques de micro-irrigation ou d'irrigation localisée ont été développées pour distribuer uniformément l'eau au niveau de la zone racinaire de la

plante (Dasberg et Or 1999). Ces techniques sont aussi utilisées pour une distribution ciblée d'engrais, de produits phytosanitaires ou de régulateurs de croissance et sont appelées, en anglais, « chemigation ». Dans les cultures maraîchères les premiers essais avec des produits phytosanitaires datent de 1980 (Ghidu et Smith 1980). La technique a fait preuve d'efficacité, aussi bien en plein champ que sous serres pour lutter contre les insectes et nématodes (Desaeger *et al.* 2011; Kuhar *et al.* 2009), les maladies du sol (McGovern *et al.* 1998; Miles *et al.* 2018; Ozbahce 2014; Slusarski et Spotti 2016; Tolentino *et al.* 2011) et les mauvaises herbes (Candole *et al.* 2007; Chase *et al.* 2006). Elle est aussi utilisée en arboriculture (Grout et Stephen 2005) ainsi qu'en viticulture (Byrne et Toscano 2006; Van Timmeren *et al.* 2012). De plus, cette technique convient également pour la distribution d'agents de contrôle biologique, comme *Trichoderma* spp. pour lutter dans les cultures de tomates contre *Sclerotinia sclerotiorum* (de Aguiar *et al.* 2014).

L'efficacité de cette technique dépend notamment de la distribution des produits phytosanitaires et de leur rémanence dans le sol et dans la plante. Cette dernière détermine par ailleurs aussi le risque de résidus dans les fruits (Candole *et al.* 2007; Juraske *et al.* 2009; Wang *et al.* 2013).

Dans les cultures sous protection, seuls Dekker *et al.* (1995) et Runia *et al.* (1995) décrivent le comportement de l'Oxamyl et du Propamocarb dans des systèmes de culture sur laine de roche, tandis que Bracy *et al.* (2003) ont évalué la technique d'injection.

En Suisse, l'homologation d'un produit est liée à son mode d'application. Or, à ce jour, cette technique, bien qu'utilisée depuis plusieurs années, n'est pas décrite dans les « bonnes pratiques agricoles » et les modalités d'application ne sont ainsi pas définies. Ainsi nous avons réalisé des essais dans le but de décrire la technique correcte d'application pour la distribution des produits phytosanitaires par un système d'irrigation goutte à goutte en culture maraîchère sous protection, en culture en pleine terre et en hors-sol. Nous avons également évalué l'efficacité biologique et les risques de résidus.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés dans des serres de 200 m² à Agroscope Cadenazzo. Le choix s'est porté, pour la culture en pleine terre, sur la variété de tomate grappe Climberley, greffée sur Beaufort et, pour le hors-sol, sur Maxifort. La densité de plantation a été de

Résumé L'irrigation des cultures par le système goutte à goutte répond à la sensibilité croissante de notre population pour la préservation de nos ressources. La technique du goutte à goutte est utilisée depuis quelques années en Suisse pour appliquer les produits phytosanitaires dans les cultures maraîchères sous protection. Dans le contexte du plan d'action national lancé par le Conseil fédéral en septembre 2017 visant notamment la réduction des risques liés à l'utilisation des produits phytosanitaires, il nous a paru opportun d'apporter un éclairage scientifique sur cette technique d'application. Des essais ont été conduits en 2008 sur des cultures de tomates en hors-sol et en pleine terre. Nous avons voulu vérifier, dans un environnement expérimental, les risques liés à une application incorrecte des produits phytosanitaires par le système d'irrigation goutte à goutte. Aussi avons-nous souhaité évaluer l'efficacité biologique de tels traitements ainsi que les risques de présence de résidus. Il s'agissait également de définir les modalités techniques qui permettent une distribution et une application correcte des produits phytosanitaires par ce système. Pour la lutte contre le puceron, l'efficacité de Thiamethoxam appliqué via le système goutte à goutte a été comparable à l'application foliaire et les résidus n'ont jamais dépassé les seuils de tolérance.

1,25 plantes/m² avec une conduite à 2 tiges pour une densité de 2,5 tiges/m². Le substrat utilisé pour la culture hors-sol était la fibre de coco. La plantation a eu lieu le 12 mars en 2008 et le 13 mars en 2009.

L'essai 2008 a été réparti sur trois serres, deux en culture en pleine terre et une en hors-sol. Dans l'une des serres en culture en pleine terre ainsi que dans la serre en hors-sol, deux variantes de « chemigation » ont été appliquées: 1. une seule application à pleine dose (dosage homologué pour le traitement foliaire); 2. deux applications avec un dosage correspondant au 50 % de la pleine dose (dosage splitté) avec un intervalle de traitement maximum de trois semaines. Dans la seconde serre en culture en pleine terre deux autres variantes ont été définies: 1. témoin non traité et séparé du reste de la serre par un filet anti-insecte; 2. applications foliaires effectuées selon la dynamique

de croissance des ravageurs. Les serres ont été divisées en blocs homogènes selon les variantes appliquées dans chaque serre et chaque bloc divisé à son tour en 4 sous-blocs (répétitions).

L'essai 2009 a été effectué dans une serre hors-sol et dans une serre en culture pleine terre. Le dessin expérimental a été le même qu'en 2008 avec la différence que chaque bloc a été divisé en 3 sous-blocs (répétitions). Sur la base des résultats obtenus en 2008, deux variantes «chemigation» ont été planifiées dans la serre hors-sol: 1. une seule application à la pleine dose (dosage homologué pour le traitement foliaire); 2. deux applications avec un dosage égal au 50 % de la pleine dose avec un intervalle de traitement maximum de trois semaines. La serre avec culture en pleine terre comprenait trois variantes: 1. «chemigation» à dosage splitté (comme variante 2 serre hors-sol); 2. traitements foliaires; 3. témoin sans traitement.

Méthode d'application des produits

Les applications foliaires ont été effectuées par un pulvérisateur à dos Birchmeier. Le protocole d'application des produits par solution nutritive a été élaboré par le groupe de technique d'application de Syngenta. Ce protocole sera présenté et discuté dans les résultats. L'appareil d'injection (fig. 1) est un prototype développé en collaboration avec la firme Anacquaria SA de Tenero (www.anacquaria.ch).

Matières actives utilisées et détermination de l'efficacité biologique

Dans l'essai de 2008 le premier bloc d'applications a été centré sur le puceron *Macrosiphum euphorbiae* et le deuxième sur la mouche blanche (*Trialeurodes vaporariorum*). *M. euphorbiae* a été lâché dans les serres le 17 mars. La matière active de référence choisie a été le Thiamethoxam (Actara 25 WG), qui était alors encore homologué sur tomate en culture sous protection (voir encadré pour l'état actuel d'homologation). Cet insecticide a été utilisé à la dose de 200 g m.a./ha (800 g/ha de produit) aussi bien pour le traitement foliaire que pour la «chemigation» avec une seule application à pleine dose. Pour la deuxième variante de «chemigation» ce dosage a été splitté en deux applications de 100 g m.a./ha. La première application a été effectuée le 7 avril, 26 jours après la plantation. Les dates d'application des deux blocs sont présentées dans le tableau 1.

Sur la base des résultats 2008, l'essai 2009 a été centré sur la mouche blanche (*T. vaporariorum*) en utilisant les matières actives Thiamethoxam et Pyméthrozine (Plenum 25 WG). Le Thiamethoxam a été uti-



Figure 1 | Système d'injection utilisé dans les essais constitué d'une pompe volumétrique (A), d'un bac pour la bouillie (B) et pour le rinçage des tuyaux (C). Point d'injection dans le tuyau du système d'irrigation (D).

lisée dans les deux serres avec deux injections de 100 g m.a./ha comme en 2008. La Pyméthrozine a été appliquée par «chemigation» uniquement dans la culture hors-sol car une application en pleine terre induirait une fixation de cette matière active dans le sol qui ne pourrait alors pas être absorbée par les racines. Le dosage en culture hors-sol a été de 187,5 g m.a./ha et il a été calculé sur la base de l'homologation hollandaise qui est de 15 g de produit pour 1000 plantes ou tiges. Dans la serre en culture en pleine terre, le dosage a été de 110 g m.a./ha (220 g/ha de Plenum WG). Les dates d'application sont reportées dans le tableau 2.

L'évolution des ravageurs a été suivie chaque semaine selon le principe «présence/absence», sans estimation du nombre d'individus. Pour chacun des sous-blocs, 25 % des plantes ont été échantillonnées en choisissant au hasard, lors de chaque suivi, une plante sur laquelle on a contrôlé trois feuilles, soit une feuille de la partie basale, une de la partie centrale et une de la partie apicale. Pour chacune des feuilles les 4 feuilles apicales ont été contrôlées.

Tableau 1 | Essais 2008 sur puceron (*Macrosiphum euphorbiae*) et mouche blanche (*Trialeurodes vaporariorum*) : nombre d'applications, dosage en g/ha de matière active (m.a.) et dates d'applications. La variante « Deux applications 50 % pleine dose » correspond à la pleine dose splittée en deux applications de 100 g/ha de Thiamethoxam.

Variantes		Dosage m.a. g/ha	Nombre d'applications	Dates d'applications
Essai puceron				
Chemigation culture en hors-sol	Application pleine dose	200	1	7 avril
	Deux applications 50 % pleine dose			
Application foliaire	Application pleine dose	200	3	8 et 18 avril, 2 mai
Essai mouche blanche				
Chemigation culture en pleine terre	Application pleine dose	200	1	24 juillet
	Deux applications 50 % pleine dose			
Application foliaire	Application pleine dose	200	3	24 juillet, 4 et 13 août

Analyse des résidus dans les fruits

Dans chaque variante, un kilo de fruits ayant le même degré de maturation (fruits rouges prêts à la récolte) a été prélevé pour analyse des teneurs en résidus de Thiamethoxam (2008 et 2009) et de Pymétrozine (2009). La méthode d'analyse du Thiamethoxam consiste en une préparation d'échantillon par extraction avec de l'acétonitrile suivi d'un partage liquide-liquide par addition de sulfate de magnésium, de chlorure de sodium et de sels de citrate tampons, suivie d'une purification de dispersion de la matrice sur phase solide (dSPE). La quantification a été réalisée par chromatographie liquide à haute performance avec une colonne à phase inverse du type C18 couplée à la spectrométrie de masse à triple quadripôle LC-MS/MS, source d'ionisation electrospray en mode positif (ESI+) et acquisition MRM sur deux ions fils ($m/z = 132$, $m/z = 211$) de l'ion pseudomoléculaire ($m/z = 292$).

La mesure des résidus de la Pymétrozine a été effectuée par Syngenta chez un laboratoire privé.

En 2008, un premier échantillonnage a été effectué le 5 juin, correspondant à la première récolte de tomates dans les serres, pour déterminer la teneur en résidus du premier bloc d'applications (tabl. 1). Dans une deuxième

Tableau 2 | Essais 2009 sur mouche blanche (*Trialeurodes vaporariorum*) : nombre d'applications, dosage en g/ha de matière active (m.a.) et dates d'applications. Pour le traitement au Thiamethoxam, la variante « chemigation » correspond à deux applications 100 g/ha (= 50 % de la pleine dose 200 g/ha).

Variantes		Dosage m.a. g/ha	Nombre d'applications	Dates d'applications
Essai mouche blanche				
Chemigation culture en hors-sol	Thiamethoxam	100	2	5 et 19 juin
	Pymétrozine	187,5	2	5 et 19 juin
Chemigation culture en pleine terre	Thiamethoxam	100	2	5 et 19 juin
Application foliaire culture en pleine terre	Pymétrozine	110	3	5 et 19 juin, 6 juillet

série, 16 échantillons ont été prélevés à partir du 25 juillet avec un intervalle de 3-4 jours (tabl. 1 et 3). Les récoltes du 4 et 13 août ont été effectuées avant les applications.

En 2009, les teneurs en résidus du Thiamethoxam ont été mesurées 3, 7 et 14 jours après la première et la seconde injection (tabl. 2). Dans la variante « chemigation », les teneurs en Pymétrozine après la première injection n'ont pu être mesurées qu'une seule fois, soit 14 après traitement, en raison d'un manque de tomates à maturation. Lors du second traitement, les mesures ont été effectuées après 3 et 7 jours. Dans la variante application foliaire, les mesures ont été effectuées sur des échantillons récoltés 3, 7 et 14 jours après le premier traitement et 3 et 7 jours après le deuxième (tabl. 2).

Résultats

Technique correcte d'application des produits phytosanitaires par solution nutritive

Cette technique est couramment utilisée dans la pratique. Le producteur calcule simplement la dose de produit en tenant compte de la surface à traiter et du dosage homologué pour l'application foliaire. La dose est ensuite ajoutée à la solution du bac de l'automate d'irrigation. Ce système, très simple, ne tient toutefois pas compte de la problématique de répartition du produit sur l'ensemble de la surface à traiter ni des quantités réellement distribuées, une partie reste en effet dans le système d'irrigation.

Il est donc fondamental de dissocier l'opération d'irrigation de celle de l'injection de produits phytosa-

nitaires. Cette dernière est une opération indépendante qui doit tenir en compte de quatre paramètres clés.

Le système d'injection

L'appareil (fig. 1) doit être mobile pour permettre son déplacement dans les différents secteurs de la serre. Il doit être équipé d'une pompe qui répond à deux exigences clés:

- assurer une pression constante lors de l'injection
- fournir des débits constants à basse pression (le système d'irrigation goutte à goutte fonctionne à basse pression).

La pompe est ainsi un élément clé du système, elle doit être correctement installée et entretenue pour assurer une distribution régulière de la solution à chaque émetteur dans le système d'irrigation. Deux types de pompes répondent à ces critères: la pompe doseuse et la pompe volumétrique à débit constant.

Exécution de l'injection par secteur de la surface cultivée

La pression de l'irrigation diminue généralement lorsque l'on s'éloigne du point de départ de l'injection du produit et donc de l'automate d'irrigation. Cette diminution de pression peut induire une distribution hétérogène de l'eau (et donc du produit) sur la surface et provoquer un dosage irrégulier. Il s'agit donc de diviser la surface cultivée en secteurs homogènes. La taille des secteurs dépend de la pression d'irrigation, elle-même liée à la distance entre le point de départ de l'eau et les surfaces à irriguer et de l'appareil d'injection. Il est important de garantir une pression constante pour chaque secteur. Pour ce faire, on installe sur la conduite de chaque secteur un point d'injection avec une vanne qui évite le passage du produit dans les autres secteurs ainsi qu'un retour au bac de l'automate d'irrigation. L'automate d'irrigation doit être programmé pour des irrigations séparées selon le nombre de secteurs à traiter. Il est fortement conseillé que l'eau d'irrigation, lors de l'injection, soit claire, sans adjonction d'engrais, pour éviter d'éventuelles interactions négatives dues au pH ou à la salinité de la solution avec les produits phytosanitaires.

La durée minimale d'injection

Une durée minimale d'injection, qui se base sur la vitesse d'écoulement, est fondamentale pour la dispersion homogène du produit. Elle est déterminée avec l'injection d'un colorant alimentaire bien visible lorsqu'il sort des goutteurs. Le temps nécessaire entre l'apparition du colorant au premier et au dernier émetteur du secteur correspond à la durée minimale

d'injection. Un temps d'injection trop court se traduit par une dispersion inégale du produit. La quantité d'eau pour la préparation de la bouille est déterminée sur la base du temps d'injection et du débit de la pompe, tandis que la quantité de produit est calculée par rapport à la surface du secteur à traiter. La pression utilisée pour l'injection doit être constante lors de cette opération et rester la même pendant toute la saison. Après l'injection de la bouille, l'arrosage doit se poursuivre jusqu'à ce que toutes les molécules de matière active soient transportées dans le système. Cette opération de calibrage est effectuée idéalement avant la plantation et elle doit être répétée pour chaque secteur afin de définir d'éventuelles différences liées à la pression de l'irrigation et à la taille des surfaces.

Préparer la culture à absorber le produit

Une absorption rapide du produit par les racines est primordiale. Elle peut être favorisée en créant un léger état de stress hydrique qui, dans une culture hors-sol, ne doit être ni trop élevé ni trop faible. Une contrainte trop élevée pourrait engendrer des problèmes de production alors que des contraintes trop basses pourraient favoriser le drainage du produit lors du premier cycle d'injection (correspondant au moment de l'injection) ou lors du second cycle d'arrosage. Dans les cultures en sol c'est le type de sol qui détermine le niveau du stress hydrique mais la problématique reste la même. Comme il n'existe pas de règle générale pour préparer les cultures le producteur devra tenir compte du type de sol et du substrat pour gérer l'application des produits par goutte à goutte. Dans nos conditions d'essais (substrat en fibre de coco pour la culture hors-sol et sol sablonneux pour celle en pleine terre), nous avons, dans les cultures en pleine terre stoppé l'irrigation 24h avant l'injection et, dans la culture hors-sol, sauté la dernière de la journée (soir). L'injection est effectuée le lendemain avec le premier cycle d'irrigation du matin.

Injection des produits phytosanitaires

Le protocole d'injection doit être rigoureusement suivi afin d'éviter des risques de distribution hétérogène. Juste avant la fin de l'injection les tuyaux du système d'irrigation doivent être rincés pour garantir que tout le produit ait été mis en circulation. Cette opération est effectuée en utilisant simplement un deuxième bac d'eau claire ou en ajoutant l'eau claire dans le bac. Le rinçage de la pompe est nécessaire surtout si l'on travaille avec une pompe volumétrique pour éviter qu'elle aspire de l'air.

Efficacité biologique

L'essai 2008 sur le puceron *M. euphorbiae* a montré l'efficacité de la méthode. Une seule application à pleine dose par «chemigation» ou splittée en deux injections a donné une très bonne efficacité comparable à celle des traitements foliaires et ce indépendamment du type de culture où elle a été appliquée (fig. 2).

Culture hors-sol

Dans la culture hors-sol, l'efficacité de la variante «chemigation» avec une seule injection à pleine dose a été de 100 % au 15 avril (8 jours après son application) et de 94 % lors du contrôle du 9 juillet. Quant à la variante pleine dose splittée en deux injections (tabl. 1), on constate une efficacité de 99 % au 15 avril (8 jours après la première injection), tandis que la seconde application du 25 avril ne semble pas apporter d'améliorations particulières (fig. 2). En général, l'efficacité reste très élevée et varie entre 100 % et 97 % au 9 juillet. A cette date on observe une légère remontée des populations de pucerons, même si dans le témoin elles étaient déjà en phase de diminution (fig. 2).

Culture en pleine terre

L'application de la «chemigation» en culture en pleine terre montre la même évolution (fig. 2). Lors du contrôle du 9 juillet le dosage splitté indique une efficacité de 91 %. Dans la variante traitement foliaire (fig. 2) l'efficacité a été bonne et était comprise entre

96 % et 97 % après les deux premières applications, puis a baissé jusqu'à 74 % lors du contrôle du 9 juillet.

Mouche blanche (*T. vaporariorum*)

Les premiers foyers d'adultes de mouche blanche (*T. vaporariorum*) ont été trouvés le 3 avril dans les parcelles des variantes «traitement foliaire» et «chemigation» en culture hors-sol avec pleine dose avec 1,4 % et, respectivement, 0,6 % de feuilles colonisées. Depuis cette date, les populations ont augmenté régulièrement pour exploser à partir de la deuxième moitié de juin (fig. 3). Thiamethoxam n'a eu aucune efficacité aussi bien dans les variantes «chemigation» que traitement foliaire (fig. 3). Ce résultat laisse supposer que les populations présentes dans les serres présentaient probablement déjà une résistance aux néonicotinoïdes par une utilisation antérieure à l'essai ou que les applications ont été effectuées trop tard par rapport à l'évolution de la population. L'essai 2009 a confirmé que aussi bien le Thiamethoxam que la Pymétozine présentaient effectivement des fortes limites d'efficacité en confirmant la possible résistance envers ces deux matières actives des populations présentes dans nos serres (fig. 4).

Les résidus dans les fruits

Le premier échantillonnage dans l'essai 2008 a été effectué dans les deux cultures au 5 juin à la première récolte de tomates, c'est-à-dire 34 jours après la dernière application foliaire, 59 jours après l'injection dans la variante

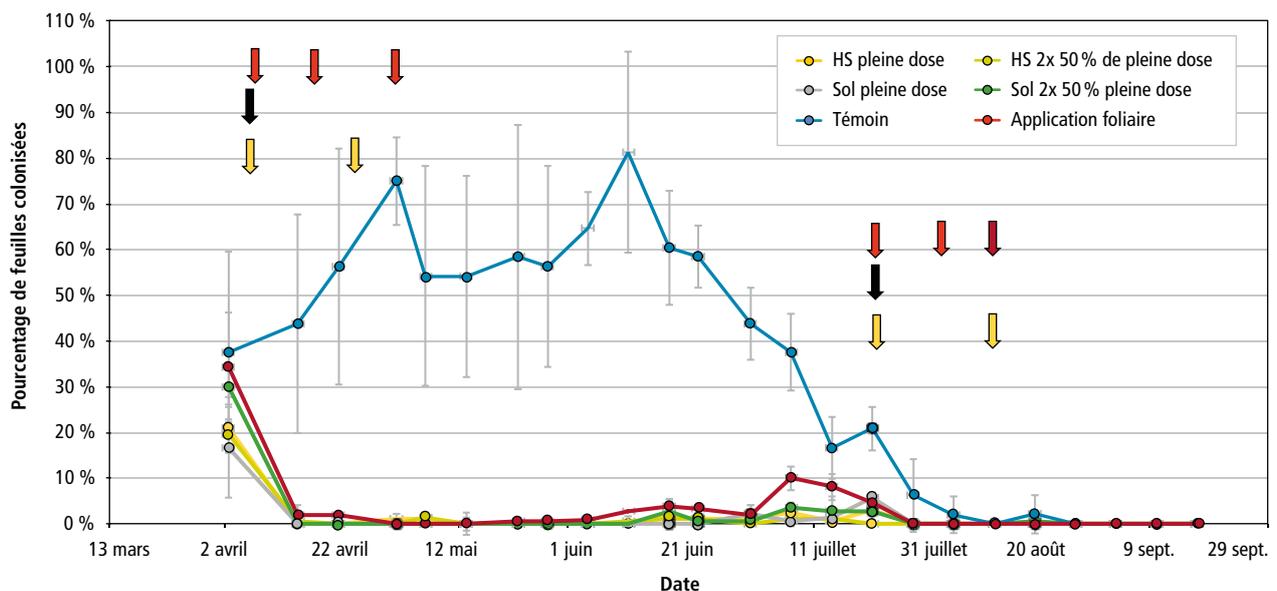


Figure 2 | Essai 2008. Evolution des populations du puceron *Macrosiphum euphorbiae* en pourcentage de feuilles colonisées. Les flèches indiquent les dates d'applications reportées dans le tableau 1. Flèche rouge = application foliaire; flèche jaune = injection avec le 50 % pleine dose; flèche noire = injection à la pleine dose.

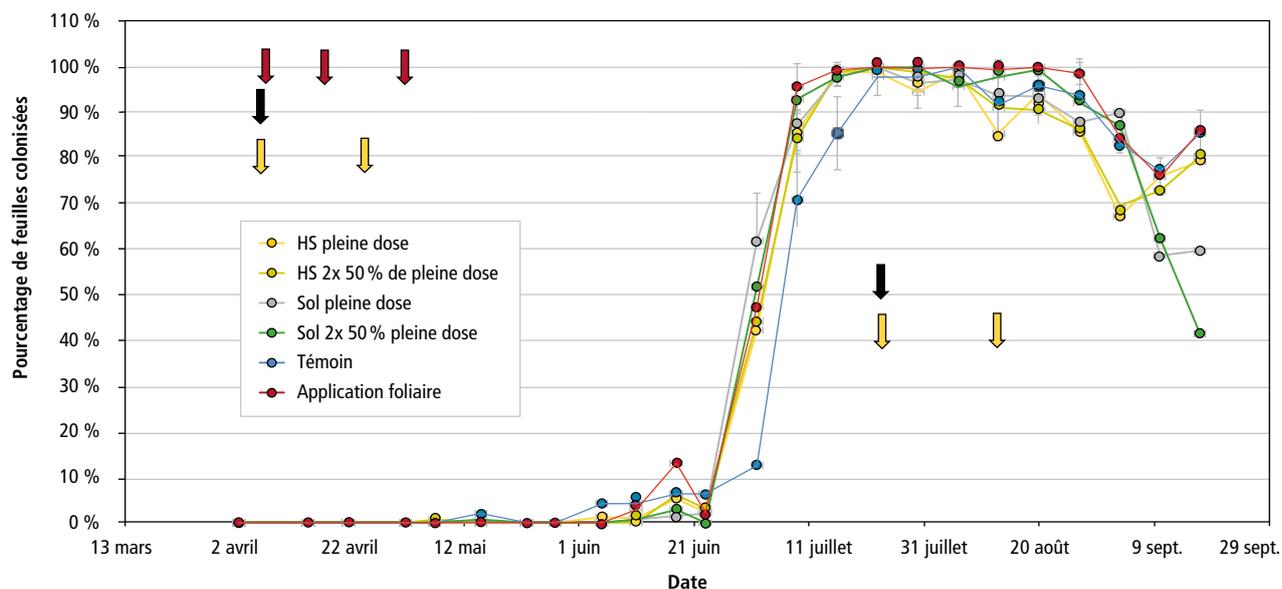


Figure 3 | Essai 2008. Evolution des populations des formes immatures de la mouche blanche (*Trialeurodes vaporariorum*) en pourcentage de feuilles colonisées. Les flèches indiquent les dates d'applications reportées dans le tableau 1. Flèche rouge = application foliaire; flèche jaune = injection avec le 50 % pleine dose; flèche noire = injection avec pleine dose.

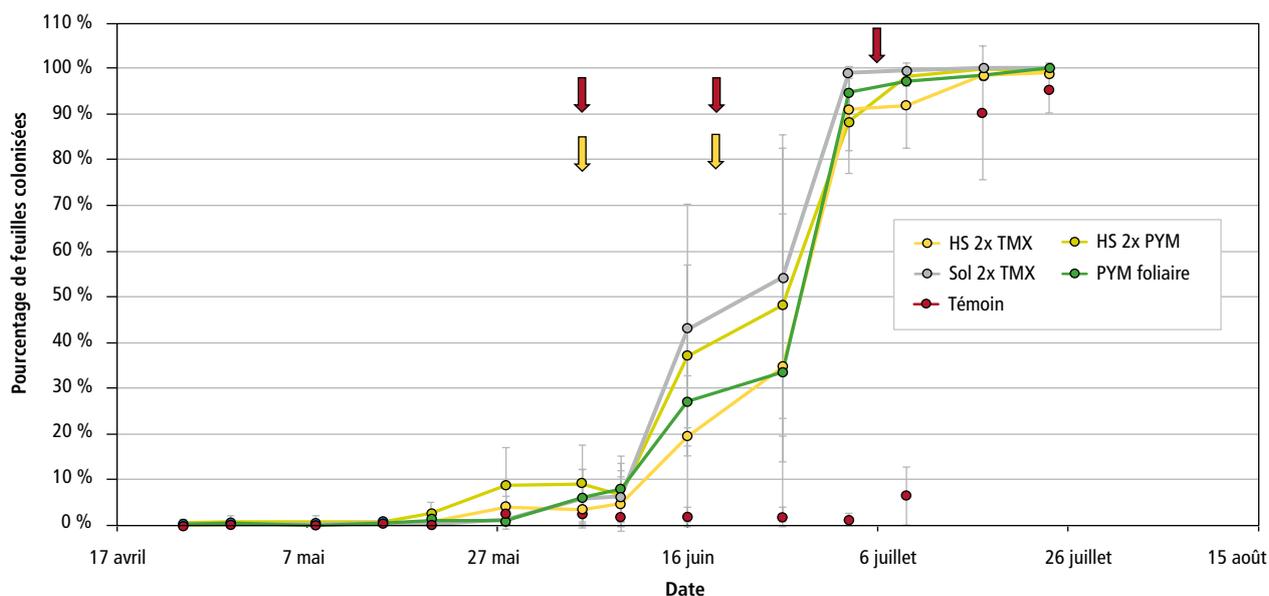


Figure 4 | Essai 2009. Evolution des populations des formes immatures de la mouche blanche (*Trialeurodes vaporariorum*) en pourcentage de feuilles colonisées en culture hors-sol et en pleine terre. Les flèches indiquent les dates d'applications reportées dans le tableau 2. Flèche rouge = application foliaire; flèche jaune = injection avec le 50 % pleine dose.

pleine dose et 41 jours après la deuxième injection dans la variante dose splittée. La teneur était de 12,1 µg/kg pour la variante « application foliaire », 13,6 µg/kg pour la variante « chemigation » en pleine terre, 6,9 µg/kg pour la variante « chemigation » en hors-sol, 24,9 µg/kg pour la variante « chemigation » splittée pour la culture en pleine terre et 14,0 µg/kg pour celle en hors-sol. Ce résultat montre la persistance du produit même si les quantités mesurées sont bien inférieures à la valeur

limite en résidus fixée dans la législation. L'application du produit par injection dans une culture en pleine terre semble conduire à des teneurs en résidus plus élevées par rapport à la culture hors-sol (supérieur de 51 % pour la variante pleine dose et 56 % pour la variante splittée). Trois applications foliaires ont apporté une teneur comparable aux variantes « chemigation » pleine dose en pleine terre et pleine dose splittée en hors-sol. Au contraire le fait de splitter la pleine dose en pleine terre

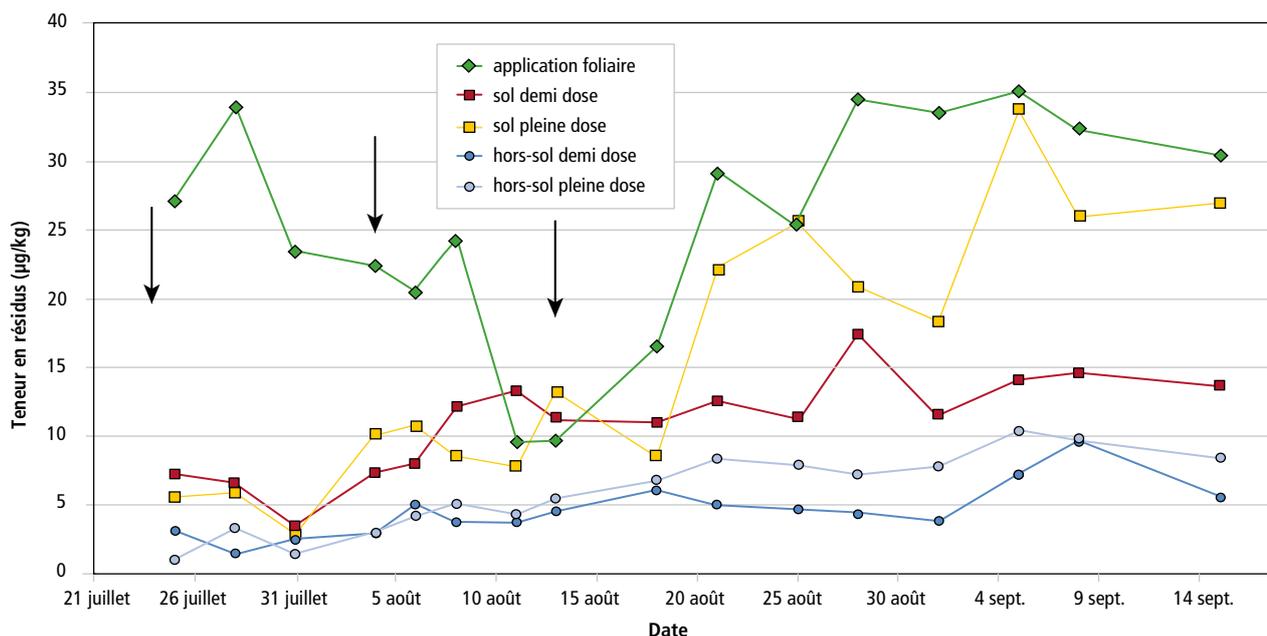


Figure 5 | Essai 2008. Evolution des résidus de Thiamethoxam dans les fruits de tomate depuis la première application du 24 juillet 2008 (tabl. 1) et les différentes dates de prélèvement (tabl. 3). Les flèches indiquent les moments des applications selon les dates reportées dans le tableau 1.

semble augmenter la teneur en résidus de 49 %, tandis qu'une seule application à pleine dose en hors-sol la diminue de 57 %.

En 2008, le suivi régulier de l'évolution de la teneur en résidus de la deuxième série d'applications débutée au 24 juillet (tabl. 1) confirme que dans injection en culture hors-sol avec les deux variantes Thiamethoxam les teneurs en résidus restent très faibles et régulières pendant toute la période de contrôle par rapport à l'application en pleine terre et plus particulièrement avec la variante application foliaire (fig. 5). Ce suivi pendant la phase de production de la plante met en évidence que, dans la culture en pleine terre, une application à pleine dose augmente les résidus par rapport à la variante splittée (fig. 5) et que les teneurs les plus élevées sont analysées avec la variante application foliaire et ce même 33 jours après la dernière application (fig. 5 et tabl. 3). Toutefois, ces teneurs sont également inférieures à la valeur limite tolérée. Dans l'essai 2009 les résultats, exprimés en mg/kg de matière active, ont confirmé pour toutes les dates de contrôle des teneurs en résidus inférieures à 0,02 mg/kg de Thiamethoxam. Le même résultat a été obtenu pour la Pymétrozine avec des teneurs en résidus systématiquement inférieures à 0,01 mg/kg.

Discussion

La technique d'injection décrite précédemment donne les bases pour une application correcte. Celle-ci passe

Tableau 3 | Essai 2008 sur la mouche blanche. Nombre de jours écoulés entre l'échantillonnage et la dernière application selon les variantes (tabl. 1). Le 5 juin correspond à la première récolte dans les serres. Les échantillonnages du 25 juillet au 4 août suivent les applications du 24 juillet; ceux du 6 au 13 août l'application foliaire du 4 août et ceux du 18 août au 15 septembre l'application foliaire du 13 août.

Date échantillonnage	Nombre de jours écoulés		
	Application foliaire	Chemigation avec 2 applications de 100g/ha	Chemigation avec la pleine dose de 200g/ha
5 juin	34	41	59
25 juillet	1	1	1
28 juillet	4	4	4
31 juillet	7	7	7
4 août	11	11	11
6 août	2	13	13
8 août	4	15	15
11 août	7	18	18
13 août	9	20	20
18 août	5	5	25
21 août	8	8	28
25 août	12	12	32
28 août	15	15	35
1 ^{er} septembre	19	19	39
5 septembre	23	23	43
8 septembre	26	26	46
15 septembre	33	33	53

par une répartition uniforme du produit dans la serre avec un système d'injection approprié à l'aide de pompes doseuses ou de pompes volumétriques à débit constant (Bracy *et al.* 2003). Il est donc fondamental de fragmenter la surface cultivée en secteurs à traiter comme cela a été mis en évidence par Runia *et al.* (1995). Ces auteurs ont montré qu'une injection d'Oxamyl dans les différents secteurs d'une serre permet de garantir une homogénéité de sa répartition. Une répartition hétérogène peut en effet créer des sous-dosage dans différentes parties de la serre, réduisant d'une part l'efficacité du traitement et augmentant d'autre part le risque de sélectionner des populations résistantes aux produits. Le second élément important est de préparer les plantes à absorber le produit. Dans les cultures hors-sol le fait d'éviter d'avoir du drainage lors du premier et deuxième cycle d'arrosage garantit que le produit reste confiné dans le substrat et qu'il soit absorbé par la plante. Si pour les utilisations en pleine terre, le risque d'induire des contraintes de production par un léger stress hydrique est limité, d'autres problèmes peuvent survenir relatifs à la rapidité de dégradation de la matière active, sa distribution horizontale et verticale, ainsi que la capacité du sol de la bloquer. Le mouvement de la matière active dépend partiellement de la texture et de la quantité de matière organique. Si la texture détermine la fréquence et la durée des irrigations, la teneur en matière organique, associée aux propriétés chimiques et physiques de la matière active, influence la possibilité d'absorption du produit par les racines et sa mobilité (Ghidiu *et al.* 2012). La connaissance de ces éléments devient importante pour déterminer des consignes spécifiques à leur utilisation dans des cultures en pleine terre.

Au niveau de l'efficacité biologique, l'essai, 2008 a montré l'efficacité de la technique sur le puceron *M. euphorbiae*. Une seule injection de Thiamethoxam à pleine dose ou splittée en deux injections ont fourni la même efficacité de trois applications foliaires aussi bien dans la culture en pleine terre qu'en hors-sol. (fig. 2). Malgré le manque de résultats d'efficacité sur la mouche blanche, ces deux années d'essais ont permis de valider la méthode d'injection. D'autres auteurs ont montré la validité de cette technique soit en plein champ soit sous serre pour lutter contre des insectes et nématodes (Desaeger *et al.* 2011), maladies du sol (McGovern *et al.* 1998; Miles *et al.* 2018; Ozbahce 2014; Slusarski et Spotti 2016; Tolentino *et al.* 2011) et mauvaises herbes (Candole *et al.* 2007; Chase *et al.* 2006). Kuhar *et al.* (2009), par exemple, montrent qu'une ou deux applications de chlorantraniliprole ont significativement diminué les dégâts de *Helicoverpa zea* sur les tomates par rapport aux applications foliaires.

Les résidus mesurés dans les fruits n'ont jamais dépassé les limites légales. Le suivi de 2008 a mis en évidence la tendance que l'utilisation du Thiamethoxam par injection en culture hors-sol limite plus fortement la teneur en résidus par rapport à la culture en pleine terre et surtout à l'application foliaire. Ce comportement ne peut pas être extrapolé pour d'autres matières actives qui pourraient avoir un autre comportement dans la plante et en particulier dans le sol. Nos résultats se trouvent en partie confirmés par ceux de Jurasko *et al.* (2009) qui ont montré que l'application en pleine terre d'Imidachloprid diminue de 5 fois les résidus dans les fruits de la tomate.

Indépendamment de l'utilisation en culture hors-sol ou en pleine terre, cette technique présente des avantages et des désavantages que le producteur doit considérer lors de l'application. Les avantages sont: 1. aucune contamination directe des personnes qui travaillent dans les infrastructures sauf au moment de la préparation de la bouillie; 2. l'application est rapide et entraîne une réduction des coûts du traitement; 3. aucun problème de dérive des produits et aucun risque de contamination pour le travailleur après l'application; 4. un faible risque de résidus dans les fruits; 5. la possibilité d'application plus précise de matières actives de contact ou d'agents de contrôle biologique pour la lutte contre des ravageurs ou maladies des racines; 6. la réduction du risque de mortalité pour les auxiliaires utilisés dans la lutte biologique.

Ces avantages sont significatifs dans le contexte du plan d'action de la Confédération visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires, qui encourage les mesures visant à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires et les risques pour le consommateur, les opérateurs, les organismes non cibles et la qualité des eaux et du sol (Conseil fédéral 2017).

Au niveau des désavantages, il faut distinguer si l'on cible, avec cette technique, la lutte contre des maladies ou des ravageurs du sol ou des parties aériennes de la plante. Dans ce dernier cas, il ne faut utiliser que des matières actives systémiques et seule l'application d'insecticides entre en considération. Utiliser une matière active fongicide systémique avec une simple mode d'action sur le pathogène constitue un fort risque de sélectionner des souches résistantes. Ce type de molécule est généralement mélangé avec des matières actives de contact pour limiter ce risque. Une fois injecté dans le système d'irrigation, seule la matière active systémique est absorbée et transportée dans la plante et ce fait constitue un risque élevé de sélectionner des souches résistantes. La partie de

contact reste, au contraire, dans le substrat ou le sol.

Par contre, pour lutter contre des ravageurs ou des maladies des racines et du collet, on peut appliquer par cette technique des produits de contact ou des organismes de contrôle biologique. Une application correcte de la technique nécessite des investissements pour les modifications du système d'irrigation pour permettre l'injection séparée dans les différents secteurs.

Conclusions

Ces deux années d'essais confirment que :

- L'application d'insecticides systémiques comme le Thiamethoxam par la solution nutritive est efficace et n'augmente pas le risque de résidus dans les fruits.
- La répartition homogène du produit et la préparation de la plante à l'absorber sont deux aspects fondamentaux pour la réussite de cette technique.
- Cette technique présente beaucoup d'avantages et elle est plus adaptée à la culture hors-sol puisque la texture et la teneur en matière organique du sol ainsi que les propriétés physiques et chimiques des matières actives sont les facteurs qui en limitent l'application.

La matière active Thiamethoxam fait partie de la famille des néonicotinoïdes. Les études sur leur écotoxicité ont conduit à une limitation progressive de leur homologation. Elle se limite actuellement aux utilisations en serre sur salades et plantes ornementales (<https://www.psm.admin.ch/de/wirkstoffe/1473> dernière consultation 22 octobre 2018).

Remerciements

Nous remercions Ildo Berri de la maison Anacquaria SA de Tenero pour l'aide au développement du système d'injection, ainsi qu'Olivier Felix de l'OFAG pour la lecture critique du manuscrit et Michele Gusberti et Corrado Cara pour l'aide technique dans la récolte des données.

Bibliographie

- Bracy R. P., Parish R. L. & Rosendale R. M., 2003. Fertigation uniformity affected by injector type. *HortTechnology* **13**(1): 103-105.
- Byrne F. J. & Toscano N. C., 2006. Uptake and persistence of imidacloprid in grapevines treated by chemigation. *Crop Protection* **25**(8): 831-834.
- Candole B. L., Csinos A. S. & Wang D., 2007. Distribution and efficacy of drip-applied metam-sodium against the survival of *Rhizoctonia solani* and yellow nutsedge in plastic-mulched sandy soil beds. *Pest Management Science* **63**(5): 468-475.
- Chartzoulakis K. & Bertaki M., 2015. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* **4**: 88-98.
- Chase C. A., Stal W. M., Simonne E. H., Hochmuth R. C., Dukes M. D. & Weiss A. W., 2006. Nutsedge control with drip-applied 1,3-dichloropropene plus chloropicrin in a sandy soil. *HortTechnology* **16**(4): 641-648.
- Conseil fédéral, 2017. Rapport du Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires: 1-81.
- Dasberg S. & Or D., 1999. Drip irrigation. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co.K. 171 pp.
- de Aguiar R. A., da Cunha M. G. & Lobo Junior M., 2014. Management of white mold in processing tomatoes by *Trichoderma* spp. and chemical fungicides applied by drip irrigation. *Biological Control* **74**: 1-5.
- Dekker A., Houx N. & Runia W., 1995. Behaviour of oxamyl and propamocarb in two rockwool cultivation systems: open drainage and recirculation of nutrient solution excess. *Acta Horticulturae* **382**: 278-287.
- Desaegeer J. A., Rivera M., Leighty R. & Portillo H., 2011. Effect of methomyl and oxamyl soil applications on early control of nematodes and insects. *Pest Management Science* **67**(5): 507-513.
- Ghidui G.M. & Smith N.L., 1980. Trickle irrigation system injected insecticides to control the European corn borer in bell pepper. In: Rutgers University Vegetable Entomology 190 Integrated Pest Management and Pest Control – Current and Future Tactics Research Results - 1980, New Jersey Agricultural Experiment Station, NJ Cooperative Extension Report No. 1: 5-6.
- Ghidui G., Kuhar T., Palumbo J., & Schuster D., 2012. Drip chemigation of insecticides as a pest management tool in vegetable production. *Journal Integrated Pest Management* **3**(3): 1-5; DOI: <http://dx.doi.org/10.1603/IPM10022>
- Grout T. G. & Stephen P. R., 2005. Use of an inexpensive technique to compare systemic insecticides applied through drip irrigation systems in citrus. *African Entomology* **13**(2): 353-358.
- Juraske R., Castells F., Vijay A., Muñoz P. & Antón A., 2009. Uptake and persistence of pesticides in plants: Measurements and model estimates for imidacloprid after foliar and soil application. *Journal of Hazardous Materials* **165**(1): 683-689.
- Kuhar T. P., Walgenbach J. F. & Doughty H. B., 2009. Control of *Helicoverpa zea* in tomatoes with chlorantraniliprole applied through drip chemigation. *Plant Health Progress* DOI 10.1094/PHP-2009-0407-01-RS
- McGovern R. J., Vavrina C. S., Noling J. W., Datnoff L. A. & Yonce H. D., 1998. Evaluation of application methods of metam sodium for management of Fusarium crown and root rot in tomato in southwest Florida. *Plant Disease* **82**(8): 919-923.
- Miles T. D., Glass B. W., Sysak R. W. & Schilder A. C., 2018. Post-plant strategies for management of black root rot-related decline of perennial strawberry fields. *Crop Protection* **104**: 78-85.
- Ozbahce A., 2014. Chemigation for soil-borne pathogen management on melon growth under drought stress. *Australasian Plant Pathology* **43**(3): 299-306.
- Runia W., Dekker A. & Houx N., 1995. Distribution and emission of oxamyl in a rockwool cultivation system with open drainage of the nutrient solution. *Acta Horticulturae* **382**: 269-277.
- Slusarski C. & Spotti C. A., 2016. Efficacy of chloropicrin application by drip irrigation in controlling the soil-borne diseases of greenhouse pepper on commercial farms in Poland. *Crop Protection* **89**: 216-222.
- Tolentino J. B. Jr., Rezende R., Itako A. T., de Freitas P. S. L. & Frizzone J. A., 2011. Drip fungigation in early blight control of tomato. *Acta Scientiarum-Agronomy* **33**(1): 9-14.
- Van Timmeren S., Wise J. C. & Isaacs R., 2012. Soil application of neonicotinoid insecticides for control of insect pests in wine grape vineyards. *Pest Management Science* **68**(4): 537-542.
- Wang Z. W., Huang J. X., Chen J. Y. & Li F. L., 2013. Time-dependent movement and distribution of chlorothalonil and chlorpyrifos in tomatoes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **93**: 107-111.

Summary

How to correctly apply the phytosanitary products by the drip irrigation system

Pesticides application by drip irrigation system is a technique already applied in Switzerland for years in protected horticulture. This technique is currently applied without experimental basis that is necessary to limit the risks associated with incorrect use. During 2008-2009 tests were carried out in tomato cultivation on hydroponics and on soil to describe the correct technique of application for the distribution of pesticides by a drip irrigation system in horticulture and evaluate the biological efficiency and risks of residues linked to this technique. The efficacy on aphids was comparable to that of foliar applications and residues never exceeded tolerance threshold.

Key words: chemigation, Thiamethoxam, aphids, pesticide residues, tomato

Zusammenfassung

Wie bringt man Pflanzenschutzmittel durch ein Tropfbewässerungssystem richtig aus

Die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln durch Tropfbewässerungssystem ist eine Technik, die in der Schweiz schon seit Jahren im geschützten Gemüsebau angewendet wird. Diese Technik wird derzeit ohne erprobte Grundlage angewendet, welche jedoch notwendig ist, um die mit einer falschen Anwendung verbundenen Risiken zu begrenzen. Im Zeitraum 2008-2009 wurden im Tomatenanbau Hors-Sol, sowie im Bodenbau Versuche durchgeführt, um die korrekte Anwendungstechnik zur Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln durch ein Tropfbewässerungssystem in Gemüsebaukulturen zu beschreiben und die biologische Effizienz und die mit dieser Technik verbundenen Rückstandsrisiken zu bewerten. Die Wirksamkeit gegenüber Blattläusen war mit der der Blattspritztechnik vergleichbar und die Rückstände lagen nie über der Toleranzschwelle.

Riassunto

Come applicare correttamente i prodotti fitosanitari con il sistema d'irrigazione goccia-goccia

L'applicazione dei prodotti fitosanitari mediante il sistema d'irrigazione goccia-goccia è una tecnica già utilizzata in Svizzera da anni nel settore dell'orticoltura sotto protezione. Questa tecnica è attualmente applicata senza la necessaria base sperimentale per limitare i rischi legati ad un suo uso scorretto. Nel periodo 2008-2009 sono stati effettuati delle prove in colture di pomodori coltivati in hors-sol e in piena terra con lo scopo di descrivere la tecnica corretta di distribuzione dei prodotti fitosanitari mediante il sistema d'irrigazione goccia-goccia nelle colture orticole e per valutarne l'efficacia biologica e i rischi dei residui ad essa collegati. L'efficacia sugli afidi è paragonabile a quella delle applicazioni fogliari e i residui non hanno mai superato la soglia di tolleranza.