

Résistance aux insecticides de *Helicoverpa armigera* (Lépidoptère : Noctuidae) dans le sud de la France

Robert Buès
Liliane Boudinhon

UMR INRA-UAPV
Écologie des invertébrés,
Agroparc,
84914 Avignon Cedex 9
<bues@avignon.inra.fr>

Résumé

Les tests sur *Helicoverpa armigera* ont été réalisés, soit sur larves L1 par pulvérisation des insecticides sur des pastilles d'aliment artificiel, soit sur larves de troisième stade par application topique. Les DL50 (dose létale pour 50 % des individus traités) des populations prélevées dans le sud-est de la France et traitées par application topique varient en µg/larve de 0,07 à 0,78 avec la deltaméthrine, de 0,94 à 1,58 avec le méthomyl et de 3,70 à 6,07 avec l'acéphate. Les DL50 des autres pyréthrinoïdes testés sont en µg/larve de 0,08 pour la L-cyhalothrine, de 1,14 pour le fenvalérate, de 0,23 pour la cyperméthrine, de 0,06 pour la cyfluthrine et de 0,13 pour l'alphaméthrine. La pression de sélection exercée avec la deltaméthrine augmente le taux de résistance à cet insecticide (25,3 fois en G16), alors que les DL50 de la souche, considérée comme relativement sensible, restent constantes au cours des générations. Les taux de synergie de la deltaméthrine avec le pipéronyl butoxide (PBO) augmentent avec la sélection de 11 fois en G1 à 61 fois en G16 pour la souche résistante et à 35 fois pour la souche sensible. Ces résultats permettent de supposer la présence d'un mécanisme de détoxification par les mono-oxygénases. Les implications agronomiques de ces résultats sont discutés.

Mots clés : Protection phytosanitaire.

Summary

Resistance of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) to insecticides in the South of France

The noctuid *Helicoverpa armigera* Hübner has been known to resist insecticides for several years in Africa, Asia and Australia. In the Mediterranean Basin, this pest was reported to resist pyrethroids in Spain in 1995. This species is one of the main pests infesting cotton, corn, sunflower and tomatoes, and it is difficult to control because it starts boring into the host plant at the first larval instar. Tests were carried out by spraying insecticides onto the artificial food tablets fed to L1 larvae, and by topically applying 1 µL insecticide solution to L3 larvae weighing 30 to 40 mg. Larvae at the L1 instar treated by spraying food tablets with insecticide solution gave LD50 values (expressed in µL ai/L) of 14.12 with cypermethrin, 2.36 with cyhalothrin, 1.33 with deltamethrin, 0.57 with acephate, and 1.36 with methomyl. After 11 generations of selection with deltamethrin, the LD50 had increased (to 14.62 µL/L) and the resistance rate calculated with respect to G11 S had increased 21.8-fold. The tests in which insects at the first four instars were sprayed with deltamethrin showed that the LD50 increased 6.2-fold between the 1st and 2nd instars, 6.6-fold between the 2nd and 3rd instars and 2-fold between the 3rd and 4th instars, which amounts to an 83-fold increase between the 1st and 4th instars. Although the ingestion tests were carried out in the laboratory under different conditions from those encountered when the treatment is applied under natural conditions, the results clearly show that the efficacy of the treatment decreases when the age of the larvae increases. This finding shows how useful it can be to apply the treatment at an early larval stage, especially as this species starts its boring behaviour into the host plant as early as instar 2. The LD50 values obtained on populations collected in south-eastern France which were treated by topical application on L3 larvae were found to range between 0.07 and 0.78 µg/larva in the case of deltamethrin, between 0.94 and 1.58 µg/larva in that of methomyl and between 3.70 and 6.07 µg/larva in that of acephate. The LD50 values obtained with the other pyrethroids tested using the same technique were 0.08 µg/larva with cyhalothrin, 1.14 µg/larva with fenvalerate, 0.23 µg/larva with cypermethrin,

0.06 µg/larva with cyfluthrin and 0.13 µg/larva with alphamethrin. The selective pressure exerted on one of the populations for 8 to 9 generations increased the resistance rates 8- to 10-fold in the case of deltamethrin, cyfluthrin, and alphamethrin, 2-fold in that of methomyl and 1.3-fold in that of acephate. After 16 generations of selection the resistance rate to deltamethrin is therefore as high as 25.3-fold. The DL50 of G16 R is of 1.77 µg/larva and the resistance rate, calculated on the basis of the LD50 values of the susceptible strain most frequently quoted in the literature (0.01 µg/larva), therefore worked out at 177-fold. In the populations tested, the rate of synergy of pyrethroids with the PBO was found to range between 6.6 and 32.6-fold. Possibly due to the inhibitory effects of PBO on mono-oxygenases, it was possible with deltamethrin to recover LD50 values of 0.008 µg/larva, which are comparable to those previously published on susceptible strains in the literature. Under the selective pressure exerted with deltamethrin, the rates of synergy increased considerably (61-fold), parallel to the resistance rates. It is questionable whether the mono-oxygenase inhibited by the PBO contribute to the detoxification process. The presence of these enzymes in *H. armigera* might be due to other factors, and further biochemical studies are now required to elucidate this point. The possibility cannot be ruled out, however, that in the populations of Southern France, mono-oxygenases may be involved as one of the resistance mechanisms of the species to pyrethroids. Taken together all these results might explain the failure with chemical control methods reported by farmers. They also show the importance of carefully choosing insecticides and alternate insecticides. Moreover, in view of the migratory behaviour of this species, the resulting dispersion of the genes conferring resistance to insecticides is a risk which should be taken into account.

Key words: Phytosanitary protection.

La noctuelle *Helicoverpa armigera* Hübner est un ravageur important qui se développe sur un grand nombre de cultures : coton, maïs, tomate, tournesol... Présente en Afrique, Asie, Australie et en Europe du Sud où sa limite nord de répartition se situe au niveau du 45° parallèle, l'espèce en France, a trois générations annuelles de mai à octobre [1]. La lutte chimique doit être appliquée sur le stade œuf ou larves L1, avant que la jeune larve foreuse ne pénètre dans le végétal. Depuis quelques années, des échecs dans la lutte chimique ont été signalés dans différents pays de l'arc nord méditerranéen et des travaux récents ont mis en évidence en Espagne la présence d'une résistance aux pyréthrinoides [2, 3]. La résistance de cette espèce aux pyréthrinoides a été particulièrement étudiée en Australie [4-6], et en Asie [7-9], où des taux élevés de résistance sont observés. Elle a également été détectée en Afrique de l'Ouest [10]. Des résistances aux organophosphorés et aux carbamates ont été aussi constatées en Inde [11], en Australie [12] et au Pakistan [13].

À partir de 2000, une étude a été entreprise afin de comparer les différences de sensibilité à divers insecticides entre populations prélevées dans le sud-est de la France. La baisse d'efficacité observée vis-à-vis d'insecticides homologués peut en

effet être une explication parmi d'autres des difficultés rencontrées par les agriculteurs dans la lutte chimique contre *H. armigera*.

Matériel et méthode

Les insectes

Cinq populations larvaires ont été prélevées de 2000 à 2002, dans des cultures en basse vallée du Rhône (tomate de conserve) et dans le delta du Rhône (tournesol et sorgho). L'élevage des larves est réalisé sur milieu artificiel suivant une technique décrite par ailleurs [14]. Pour obtenir l'accouplement, une vingtaine de couples sont placés dans un cylindre de 20 cm de diamètre et de 25 cm de haut, recouvert d'un couvercle grillagé, et alimentés avec de l'eau sucrée à 10 %. Après 4-5 jours, les adultes sont isolés par couples dans des boîtes cylindriques de 8 cm de diamètre et de 6 cm de haut, et alimentés avec de l'eau sucrée. Les boîtes sont tapissées de papier filtre pour recueillir les pontes. L'élevage et les tests ont lieu à 22 °C ± 1 °C, photopériode (L : O) 16 : 8.

Tests insecticides

Sur larves L1

La solution insecticide est pulvérisée sur des pastilles d'aliment artificiel (diamètre 1 cm, épaisseur 2-3 mm), sous une tour de Potter, avec un dépôt moyen de 1,6 mg/cm². Les pastilles traitées sont séchées sous une hotte puis disposées individuellement dans une boîte cubique (2 cm de côté). Une larve, éclos depuis moins de 12 heures, est déposée sur chaque pastille. Chaque test comprend 5 à 6 concentrations d'insecticide avec 40 individus par concentration et un lot témoin. Le contrôle a lieu 3 jours après le traitement. Afin d'évaluer les différences de sensibilité aux insecticides en fonction des stades larvaires, des tests sur larves L2, L3 et L4 ont également été conduits selon la même méthode que pour L1.

Sur larves 3^e-4^e stades

Les larves sont élevées individuellement à partir des deuxième-troisième stades dans des boîtes cubiques (2 cm de côté). Parvenues au troisième stade, les larves pesant entre 30 et 40 mg sont traitées par application topique de 1 µL de solution insecticide déposée sur le thorax à l'aide d'une micropipette (Eppendorf Research Pro), selon la méthode recommandée par la *Entomological Society of America* [15]. Chaque test comprend 5 à 6 concentra-

tions d'insecticide et un lot témoin avec 30 individus par concentration, alimentés avec un fragment d'aliment artificiel et maintenus individuellement dans les boîtes cubiques. Le contrôle a lieu 3 jours après le traitement.

Insecticides

Les insecticides, en formulations commerciales, sont préparés dans une solution d'alcool à 40 °C. Tous les témoins sont traités avec cette solution alcoolique. Six pyréthrinoïdes ont été testés (deltaméthrine, λ -cyhalothrine, fenvalérate (qui n'est plus commercialisé en France), cyperméthrine, cyfluthrine et alphaméthrine ; un carbamate, le méthomyl, deux organophosphorés, l'acéphate et le mévinphos (ce dernier non homologué sur noctuelles, mais inclus dans des cahiers des charges pour lutter contre les pucerons). Un synergiste inhibiteur des mono-oxygénases, le pipéronyl butoxide (PBO, 94 % de pureté), a été appliqué en topique à la concentration de 10 g/L, à raison de 1 μ L par larve, 3 heures avant l'insecticide. Le synergiste est également préparé dans une solution alcoolisée à 40 °C et chaque test comprend un témoin traité avec le synergiste seul.

Sélection d'une souche sensible et d'une souche résistante

La descendance d'une population prélevée en juillet 2000 sur tomate dans la basse vallée du Rhône a été séparée en deux souches à partir de la première génération d'élevage (G1). L'une considérée comme sensible a subi à la cinquième génération une sélection inverse : 20 larves de chacune des 23 descendance de couples, ont été traitées au stade L1 avec la deltaméthrine à la dose de 1,8 μ L de matière active par litre (μ L/L). Seules 10 descendance présentant plus de 85 % de mortalité ont été maintenues et ont constitué la souche sensible.

La sélection de la souche résistante s'est effectuée selon la technique appliquée au stade L1 avec des doses croissantes de deltaméthrine : 1,8 μ L/L de la G1 à la G3, 3,7 μ L/L en G4, 7,5 μ L/L de la G5 à la G13, puis 15 μ L/L pour les générations suivantes. Toutefois, l'espèce présente une sensibilité particulière à la consanguinité [16] et la baisse de fertilité observée après les traitements insecticides nous a conduit à moduler la pression et à l'interrompre en G8, G10 et G12.

Analyse des données

Les mortalités, corrigées selon la formule d'Abbot, sont analysées en log-probit à l'aide d'un logiciel (*Probit and Logic analysis program*) [17], afin d'estimer la régression entre les doses et les pourcentages de mortalité. Les résultats sont indiqués en μ g de matière active par larve (μ g/larve), excepté pour les tests par ingestion avec les L1 pour lesquels les résultats sont exprimés en μ L de matière active par litre (μ L/L). Les taux de résistance (TR) sont calculés en divisant la dose létale pour 50 % des individus traités (DL50), par la DL50 de la souche sensible. Notons que la sensibilité de cette souche est relative par rapport à d'autres souches sensibles, rapportées dans la littérature, et dont il sera fait état dans la discussion. Les taux de synergie (TS) sont calculés en divisant la DL50 des individus traités avec l'insecticide seul par la DL50 des individus traités avec le synergiste et l'insecticide.

Résultats

Tests sur larves L1

Comparaison de la sensibilité entre stades larvaires

Les taux d'augmentation des DL50 entre les stades larvaires vis-à-vis de la deltaméthrine sont de 6,2 fois entre les premier et deuxième stades, de 6,6 fois entre les deuxième et troisième stades et de 2 fois entre les troisième et quatrième stades, soit 82 fois entre les premier et quatrième stades (*tableau 1*). Dans le ta-

bleau 2, nous indiquons, outre les paramètres des droites de régression, les pourcentages de mortalité en L1, correspondant à la dose homologuée, déduits des régressions entre la mortalité et la dose. Cette méthode facilite la comparaison de l'efficacité entre insecticides, à un stade du développement auquel les traitements sont conseillés. Le pourcentage de mortalité en première génération pour trois pyréthrinoïdes varie de 85,2 à 97 % ; il n'est que de 74,8 % pour l'acéphate et de 17,7 % pour le méthomyl. Après 11 générations de sélection, le pourcentage de mortalité avec la deltaméthrine est de 100 % pour la souche sensible, alors qu'il n'est plus que de 17,6 % pour la souche résistante. Les régressions obtenues avec la souche sensible (G11S) et la souche résistante (G11R) sont représentées en *figure 1*. Le rapport des DL50 entre les deux souches est de 21,8 fois. Un test effectué au même stade larvaire avec le mévinphos fait apparaître, à la dose homologuée contre les pucerons en cultures légumières (0,35 g/L), une mortalité de 92,7 %.

Tests par application topique sur L3

Comparaison de populations naturelles

Les taux de résistance des lots traités avec la deltaméthrine, calculés par rapport à la population la plus sensible prélevée sur tomate en 2001, s'élèvent à 11,1 fois pour la population sur le sorgho, 5 fois pour la population sur le tournesol 3,7 et 1,3 fois pour des populations sur tomate (*tableau 3*). Les DL50 obtenues sur les populations prélevées sur les cultures de

Tableau 1. Comparaison de la sensibilité des larves de *H. armigera* issues de la population prélevée sur tomate en 2000, traitées à différents stades par ingestion avec la deltaméthrine.

Table 1. Susceptibility of *H. armigera* larvae from a population collected on a tomato crop in 2000 and treated with ingested deltamethrin at each of the four instars.

Stade	DL50 (95 %)*	Pente \pm s**	Rapport de DL50***
1	1,54 (1,34-1,76)	2,21 \pm 0,21	
2	9,55 (7,50-11,61)	1,78 \pm 0,20	6,2
3	62,98 (52,04-76,67)	1,62 \pm 0,14	6,6
4	127,42 (101,28-160,85)	2,49 \pm 0,34	2,0

* en μ L de ma/L, entre parenthèses l'intervalle de confiance au seuil 95 % ; ** écart type de la pente ; *** rapport de DL50 entre stades successifs ; DL50 : dose létale pour 50 % des individus traités.

Tableau 2. Comparaison des DL50 obtenues sur larves L1, et pourcentages de mortalité à la dose homologuée (déduits des régressions).

Table 2. LD50 values obtained on L1 larvae and mortality rates calculated at the authorized dose (calculated from the dose/mortality regression).

Insecticides	DL50	(95 %)*	Pente ± s**	% de mortalité***
Cyperméthrine G1	14,12	(12,47-16,08)	3,20 ± 0,33	85,2
λ-cyhalothrine G1	2,36	(1,99-2,81)	3,12 ± 0,36	94,2
Fenvalérate G1	24,42	(20,66-29,10)	3,55 ± 0,50	/
Deltaméthrine G1	1,33	(1,13-1,54)	2,51 ± 0,24	97,0
Deltaméthrine G11 S	0,67	(0,57-0,78)	3,46 ± 0,47	100
Deltaméthrine G11 R	14,62	(12,35-17,31)	3,21 ± 0,37	17,6
Acéphate G1	0,57	(0,51-0,64)	5,51 ± 0,88	74,8
Méthomyl G1	1,36	(1,05-1,86)	1,93 ± 0,31	17,7

* en µL de m.a./L, entre parenthèses l'intervalle de confiance au seuil 95 % ; ** écart type de la pente ; *** % de mortalité à la dose homologuée (deltaméthrine et λ-cyhalothrine, 7,5 µL/L ; cyperméthrine, 30 µL/L ; fenvalérate (non commercialisé) ; acéphate, 0,75 g/L ; méthomyl, 0,45 g/L ; DL50 : dose létale pour 50 % des individus traités.

tomate dans la basse vallée du Rhône sont légèrement inférieures à celles obtenues sur les populations prélevées sur le sorgho et le tournesol dans le delta du Rhône. Ces populations, traitées avec le méthomyl ou l'acéphate, ne présentent pas de différence appréciable entre localités. Le nombre de larves L3 obtenues avec les populations prélevées sur tournesol et sorgho était trop faible pour permettre de réaliser tous les tests.

Comparaison entre la souche sensible et la souche résistante

La figure 2 montre que, sous l'action de la pression de sélection avec la deltaméthrine, la progression de la résistance à cet insecticide augmente entre G1, G9 et

G16 (respectivement 0,09, 0,90 et 1,77 µg/larve). Par ailleurs, les DL50 de la souche sensible varient peu aux cours des générations (0,11 en G8, 0,07 en G15). Le taux de résistance, de 8,2 fois entre la G8 S et la G9 R (tableau 4), est de 25,3 fois entre la G15 S et la G16 R (tableau 5). Les taux de résistance, calculés entre la souche sensible et la souche résistante après 8 à 9 générations, sont de 10,5 fois pour la cyfluthrine, de 9,6 fois pour l'alphaméthrine et de 2,3 et 1,3 fois pour, respectivement, le méthomyl et l'acéphate (tableau 5).

Tests de synergie

Les taux de synergie des pyréthri-noïdes avec le PBO, observés avant sélection,

varient de 6,6 fois avec la cyperméthrine à 11,3 et 13,3 fois pour, respectivement, la deltaméthrine et la λ-cyhalothrine, à 32,6 fois avec le fenvalérate (tableau 5). Après la sélection, les taux de synergie de la deltaméthrine avec le PBO sont de 61 fois pour la G16 R, et de 35 fois pour la G15 S, soit un accroissement respectif de 5 et 3 fois environ par rapport à la G1. Le taux de synergie s'est accru nettement plus pour la souche résistante sélectionnée que pour la souche sensible. Toutefois, l'application du PBO ne permet pas de restaurer pour la souche R une DL50 comparable à celle de la souche S. D'autre part, l'augmentation du taux de synergie de la souche S, par rapport à celui observé avant sélection, est consécutive à la diminution de la DL50 d'environ 4 fois après application du PBO. Notons que le pourcentage de mortalité des lots témoins traités avec le PBO seul varie de 0 à 3,3 %.

Discussion et conclusion

Dans le sud de l'Europe, la résistance aux pyréthri-noïdes a été signalée en Turquie [18] et en Espagne [3]. Ces derniers auteurs, qui utilisent une technique de test similaire à la nôtre, calculent les taux de résistance par rapport à la DL50 de la population naturelle prélevée la plus sensible pour chacun des insecticides, soit en µg/larve : deltaméthrine 0,01, λ-cyhalothrine 0,01, fenvalérate 0,15, cyperméthrine 0,04 et cyfluthrine 0,05. Ces DL50 prises comme références d'une souche sensible sont sensiblement identiques à celles indiquées par d'autres auteurs en Asie et en Australie [4-8, 11]. Les taux de résistance observés en Espagne, lorsqu'ils sont calculés d'après ces DL50 de référence, varient de 5 à 132 fois avec la deltaméthrine, de 3 à 117 fois avec la λ-cyhalothrine, de 3 à 26 fois avec le fenvalérate, de 2 à 80 fois avec la cyperméthrine et de 2 à 9 fois avec la cyfluthrine. Avec ces mêmes bases de calcul, les taux de résistance des cinq populations prélevées dans le sud de la France varient de 7 à 78 fois avec la deltaméthrine, soit des taux de résistance du même ordre que ceux constatés en Espagne. Les taux de résistance observés par d'autres auteurs en Australie et en Asie, avec la deltaméthrine, sur des populations naturelles, varient de 2 à 6 fois [4] à

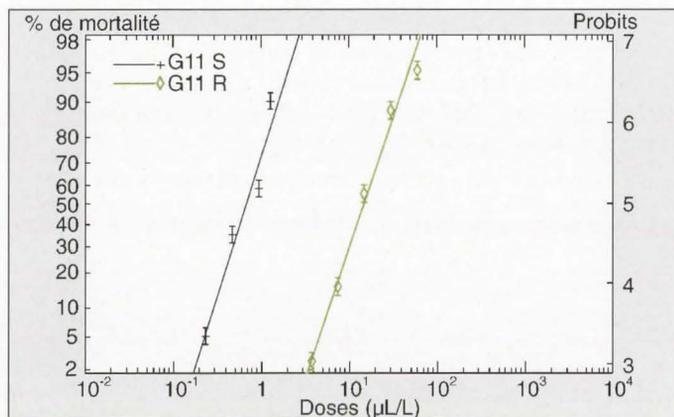


Figure 1. Comparaison en L1 des droites de régression obtenues entre la souche résistante et la souche sensible, après 11 générations de sélection par pulvérisation de deltaméthrine sur aliment artificiel.

Figure 1. Dose-response regression obtained with L1 instar larvae of the resistant and susceptible strains, after 11 generations of selection with deltamethrin.

Tableau 3. Comparaisons des DL50 observées sur des échantillons prélevés de 2000 à 2002 sur différentes cultures et traités en L3, avec trois insecticides.

Table 3. LD50 values obtained with samples collected from 2000 to 2002 on various crops and treated at stage L3 with three insecticides.

Plante hôte	DL50 (95 %)*	Pente \pm s**	TR***
<i>Deltaméthrine</i>			
Tomate 2000	0,09 (0,07-0,11)	1,82 \pm 0,24	1,3
Tournesol 2000	0,35 (0,27-0,48)	2,07 \pm 0,31	5,0
Tomate 2001	0,07 (0,04-0,13)	1,37 \pm 0,29	/
Sorgho 2001	0,78 (0,47-2,27)	1,15 \pm 0,28	11,1
Tomate 2002	0,26 (0,20-0,33)	2,00 \pm 0,22	3,7
<i>Méthomyl</i>			
Tomate 2000	1,58 (1,17-2,02)	2,28 \pm 0,34	1,6
Tournesol 2000	1,27 (0,90-1,81)	1,43 \pm 0,21	1,3
Tomate 2001	0,98 (0,81-1,22)	1,97 \pm 0,23	/
Tomate 2002	0,94 (0,65-1,26)	1,99 \pm 0,33	1,0
<i>Acéphate</i>			
Tomate 2000	6,07 (4,82-7,58)	2,48 \pm 0,31	1,6
Tomate 2001	3,70 (2,57-5,02)	1,59 \pm 0,22	/
Tomate 2002	5,83 (4,18-8,12)	1,73 \pm 0,24	1,6

* en μg de ma/larve, entre parenthèses l'intervalle de confiance au seuil 95 % ; ** entre parenthèses l'écart type de la pente ; *** taux de résistance calculé par rapport aux résultats de la tomate 2001 pris comme références ; DL50 : dose létale pour 50 % des individus traités.

plus de 2 500 fois [19]. Pour les autres pyrèthrinoïdes, les taux de résistance varient de 6 à 12 fois, mais testés sur une seule population ; on ne peut exclure l'existence de populations plus résistantes.

On n'observe pratiquement pas de différences de sensibilité au méthomyl et à l'acéphate entre les populations testées. La référence pour une souche sensible au méthomyl peut être fixée à 0,12 μg /larve

[2, 8, 11], et à 0,8 μg /larve pour l'acéphate [2]. Avec ces données, les taux de résistance des populations du sud-est de la France varient de 7,8 à 13,2 fois pour le méthomyl et de 4,6 à 7,6 fois pour l'acéphate. Ces valeurs sont à comparer avec celles indiquées dans la bibliographie pour différentes populations : 14, 24 et 74 fois pour le méthomyl [respectivement, 12, 19 et 8] ; 7 fois pour l'acéphate [20]. Il apparaît donc que, dans la basse

vallée du Rhône, seule semble présente de façon significative la résistance aux pyrèthrinoïdes. Pour le méthomyl ou l'acéphate, d'autres études sont nécessaires avant de conclure, mais un taux de résistance supérieur à 10 peut être suffisant pour causer des échecs dans la lutte chimique [11]. Par ailleurs, la comparaison de résultats obtenus par plusieurs auteurs à l'aide de valeurs de référence pour la souche sensible n'est pas exempte de risques d'erreurs méthodologiques, notamment au niveau du poids des larves traitées.

La sélection exercée avec la deltaméthrine sur l'une des populations conduit, après 8 à 9 générations, à des taux de résistance entre la souche sensible et la souche résistante, de 8 à 10 fois pour la deltaméthrine, la cyfluthrine et l'alpha-méthrine, de 2,3 fois pour le méthomyl et de 1,3 fois pour l'acéphate. Après 15 à 16 générations de sélection, le taux de résistance à la deltaméthrine est alors de 25,3 fois. Calculé en prenant comme référence d'une souche sensible la DL50 indiquée par différents auteurs, le taux de résistance est de 9 fois en G1, de 90 fois en G9 et de 177 fois en G16. Inversement, la DL50 de la souche sensible varie peu au cours des générations, la sélection inverse effectuée en G5 ne semble pas avoir modifié la susceptibilité à la deltaméthrine.

Les taux de résistance observés, pour le méthomyl et l'acéphate, après 8 à 9 générations de sélection, sont du même ordre que ceux observés dans les populations prélevées dans les cultures.

Nous ne disposons pas de DL50 de référence obtenue avec la même méthode utilisée sur larves L1. Si l'on considère les taux de mortalité observés à la dose homologuée, on constate en G1 une tolérance moyenne à l'acéphate, élevée au méthomyl et une assez forte susceptibilité aux pyrèthrinoïdes. Malheureusement nous ne disposons pas, comme pour les larves L3, de données qui permettent de comparer en G1 des différences de susceptibilité entre différentes populations. Après 11 générations de sélection avec la deltaméthrine, on constate une forte augmentation de la DL50 de la souche R et, parallèlement, une forte baisse de la mortalité à la dose homologuée. Bien que la technique des tests par ingestion diffère des traitements en conditions naturelles, les résultats obtenus aux quatre premiers stades reflètent la réduction d'efficacité des traitements avec l'augmentation de l'âge des larves. Ces résultats mettent en

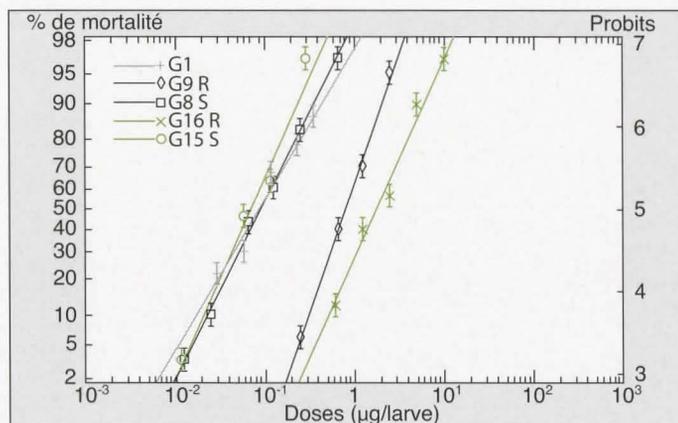


Figure 2. Comparaison des droites de régression entre la souche résistante et la souche sensible, obtenues à deux périodes de la sélection par application topique de deltaméthrine sur larves L3.

Figure 2. Dose-response regression obtained at two periods of selection of resistant and susceptible strains with topically applied deltamethrin on L3 instar larvae.

Tableau 4. Comparaison des souches S et R sélectionnées avec la deltaméthrine pendant 8 à 9 générations et testées au stade L3 avec différents insecticides.

Table 4. Comparison between strains S and R selected with deltamethrin during 8 to 9 generations and tested at stages L3 with various insecticides.

Insecticide		DL50 (95 %)*	Pente ± s**	TR***
Deltaméthrine	S	0,11 (0,09-0,15)	1,77 ± 0,19	
	R	0,90 (0,57-1,64)	1,19 ± 0,20	8,2
Cyfluthrine	S	0,06 (0,04-0,07)	1,71 ± 0,21	
	R	0,63 (0,49-0,82)	3,99 ± 1,15	10,5
Alphaméthrine	S	0,13 (0,11-0,17)	2,42 ± 0,31	
	R	1,25 (1,06-1,49)	3,22 ± 0,42	9,6
Méthomyl	S	1,67 (1,21-2,40)	1,72 ± 0,24	
	R	3,88 (2,94-5,04)	2,07 ± 0,24	2,3
Acéphate	S	5,27 (3,92-7,07)	1,91 ± 0,27	
	R	6,84 (4,22-9,96)	1,49 ± 0,37	1,3

* en µg de m.a./larve, entre parenthèses l'intervalle de confiance au seuil 95 % ; ** écart type de la pente ; *** taux de résistance ; DL50 : dose létale pour 50 % des individus traités.

évidence l'intérêt d'interventions ciblées dès le stade œufs ou larves L1 [21], et ce, d'autant plus que l'espèce est foreuse et pénètre généralement dès le deuxième stade dans le fruit de la tomate, l'inflorescence du tournesol ou à l'intérieur des panicules du sorgho.

Le taux de synergie des pyréthri-noïdes avec le PBO, observé sur une population prélevée sur tomate, varie de 6,6 pour la

cyperméthrine à 32,6 fois pour le fenvalérate. L'inhibition des mono-oxygénases dans la population naturelle permet de restaurer pour la deltaméthrine une DL50 (0,008 µg/larve) comparable à celle indiquée dans la bibliographie pour une souche sensible. Après sélection, le taux de synergie de la deltaméthrine avec le PBO augmente pour la souche R, en même temps que le taux de résistance. L'appli-

cation de PBO ne permet pas toutefois de restaurer une DL50 comparable à celle de la souche sensible. On ne peut donc pas exclure l'hypothèse d'un autre mécanisme de résistance à la deltaméthrine. Le taux de synergie de la souche S s'accroît également, mais dans une moindre proportion que dans la souche R. Cet accroissement est dû à la diminution de la DL50, dans le lot traité avec le PBO, qui devient inférieure de cinq fois à celle généralement indiquée comme référence d'une souche sensible. Cela, bien que les DL50 de la souche S, observées à différentes générations sur L3 avec la deltaméthrine, demeurent sensiblement constantes. Des taux plus élevés de synergie avec le PBO ont été observés en Australie, sur une souche résistante aux pyréthri-noïdes [6] : 70 fois avec la deltaméthrine, 106 fois avec le fenvalérate, 73,5 fois avec la cyperméthrine et 15,7 fois avec la λ-cyhalothrine. Le rôle du PBO dans l'inhibition des mono-oxygénases est discutable [18, 23] et la présence de mono-oxygénases chez *H. armigera* peut être induite par d'autres facteurs [22]. Des études biochimiques complémentaires sont nécessaires avant de conclure. Cependant, on ne peut exclure l'hypothèse que, dans les populations du sud de la France, les mono-oxygénases interviennent comme un des mécanismes de résistance aux pyréthri-noïdes. Les différentes études conduites en Australie et en Asie, sur la résistance de *H. armigera* aux pyréthri-noïdes montrent la présence de différents mécanismes [5, 6, 9, 18], mais les plus fréquemment impliqués sont les résistances métaboliques (mono-oxygénases, estérases).

Dans le sud de la France, une forte mortalité hivernale réduit la population de printemps [24]. En général, la lutte ne concerne que deux générations (2 et 3^e) et les surfaces traitées sont relativement réduites, mais les capacités migratrices de l'espèce ne permettent pas d'exclure que des individus en provenance de régions plus au sud parviennent jusqu'au delta du Rhône. Signalons que les populations prélevées en Catalogne [3] présentent des taux de résistance aux pyréthri-noïdes de 6 à 17 fois. L'analyse de populations naturelles, en provenance du Bassin aquitain, plus sujettes que celles du sud-est de la France de recevoir des adultes migrants en provenance d'Espagne [25], permettra éventuellement de préciser une origine possible de la résistance observée.

En définitive, cette étude confirme la présence dans les populations naturelles de

Tableau 5. Synergie de différents insecticides avec le PBO, observée sur larves L3 de *H. armigera* issues soit de la population prélevée sur tomate en 2000 et traitées en G1 avant sélection, soit de la souche sensible et de la souche résistante.

Table 5. Synergism with PBO of various insecticides on stage L3 larvae of *H. armigera* originating either from the population collected on tomatoes in 2000 and treated before selection or from strains S and R.

Insecticide		DL50 (95 %)*	Pente ± s**	TS***
λ-cyhalothrine		0,08 (0,05-0,09)	1,56 ± 0,21	
	+ PBO	0,006 (0,005-0,007)	2,22 ± 0,27	13,3
Fenvalérate		1,14 (0,91-1,51)	1,75 ± 0,26	
	+ PBO	0,035 (0,03-0,05)	1,49 ± 0,19	32,6
Cyperméthrine		0,23 (0,18-0,28)	1,31 ± 0,12	
	+ PBO	0,035 (0,03-0,04)	1,65 ± 0,14	6,6
Deltaméthrine		0,09 (0,07-0,11)	1,82 ± 0,24	
	+ PBO	0,008 (0,006-0,01)	2,42 ± 0,25	11,3
Deltaméthrine Souche R		1,77 (1,51-2,09) (a)	2,41 ± 0,26	
	+ PBO	0,029 (0,02-0,05)	1,06 ± 0,14	61,0
Deltaméthrine Souche S		0,07 (0,05-0,09) (a)	2,44 ± 0,39	
	+ PBO	0,002 (0,001-0,003)	2,13 ± 0,27	35,0

* en µg de ma/larve, entre parenthèses l'intervalle de confiance au seuil 95 % ; ** écart type de la pente ; *** taux de synergie (TS) ; (a) Taux de résistance (DL50 souche R/DL50 souche S) = 25,3 ; DL50 : dose létale pour 50 % des individus traités.

gènes de résistance, au moins à la delta-méthrine, mais d'autres études sont nécessaires avant de préciser leur distribution géographique et leur fréquence. Les taux de résistance observés sont suffisamment élevés pour nécessiter des précautions dans le choix et l'alternance des insecticides et l'utilisation de méthodes alternatives de lutte (formulations à base de *Bacillus thuringiensis*, trichogrammes), chaque fois que cela est possible ■

Références

- Poitout S, Buès R. La noctuelle de la tomate *Heliothis armigera* Hübner, son cycle évolutif dans le sud de la France. *La Défense des Végétaux* 1979 ; 195 : 12-28.
- Torres-Vila LM, Rodriguez-Molina MC, Palo E, Tapia MM, Guerrero M. Susceptibilidad a 20 insecticidas de *Helicoverpa armigera* Hb. Y *Spodoptera exigua* Hb. (Lepidoptera : Noctuidae) en las Vegas del Guadiana (Extramadura). *Bol San Veg Plagas* 1999 ; 24 : 353-62.
- Torres-Vila LM, Rodriguez-Molina MC, Lacasa-Plasencia A, Bielza-Lino P, Rodriguez-del-Rincon A. Pyrethroid resistance of *Helicoverpa armigera* in Spain: current status and agroecological perspective. *Agr Ecosystems & Env* 2002 ; 93 : 55-66.
- Gunning RV, Easton CS, Greenup LR, Edge VE. Pyrethroid resistance in *Heliothis armigera* (Hübner) (Lepidoptera : Noctuidae) in Australia. *J Econ Entomol* 1984 ; 77 : 1283-7.
- Gunning RV, Easton CS, Balfe ME, Ferris I. Pyrethroid resistance mechanisms in Australian *Helicoverpa armigera*. *Pestic Sci* 1991 ; 33 : 473-90.
- Forrester NW, Cahill M, Bird LJ, Layland JK. Pyrethroid resistance: synergists. *Bull Entomol Res* 1993 ; 1 (Supp.) : 62-100.
- Ahmad M, McCaffery AR. Resistance to insecticides in a Thailand Strain of *Heliothis armigera* (Hübner) (Lepidoptera : Noctuidae). *J Econ Entomol* 1998 ; 81 : 45-8.
- Armes NJ, Jadhav DR, Bond GS, King ABS. Insecticide resistance in *Helicoverpa armigera* in south India. *Pestic Sci* 1992 ; 34 : 355-64.
- Kranthi KR, Jadhav D, Wanjari R, Kranthi S, Russell D. Pyrethroid resistance and mechanisms of resistance in field strains of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera : Noctuidae). *J Econ Entomol* 2001 ; 94 : 253-63.
- Martin T, Ochou GO, N'Klo FH, Vassal J-M, Vaissayre M. Pyrethroid resistance in the cotton bollworm *Helicoverpa armigera* (Hübner) in west Africa. *Pest Manag Sci* 2000 ; 56 : 549-54.
- Kranthi KR, Jadhav DR, Wanjari RR, Ali SS, Russell D. Carbamate and organophosphate resistance in cotton pests in India, 1995 to 1999. *Bull Entomol Res* 2001 ; 91 : 37-46.
- Gunning RV, Balfe ME, Easton CS. Carbamate resistance in *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera : Noctuidae) in Australia. *J Aust Ent Soc* 1992 ; 31 : 97-103.
- Ahmad M, Arif MI, Ahmad Z. Resistance to carbamate insecticides in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera : Noctuidae) in Pakistan. *Crop Protection* 2001 ; 20 : 427-32.
- Poitout S, Buès R. Élevage de chenilles de 28 espèces de Lépidoptères Noctuidae et de 2 espèces d'Arctiidae sur milieu artificiel simple. Particularité de l'élevage selon les espèces. *Ann Zool Ecol Anim* 1974 ; 6 : 431-41.
- Anonymous. Standard method for the detection of insecticide resistance in *Heliothis zea* (Boddie) and *H. virescens* (F.) *Bull Entomol Soc Am* 1970 ; 16 : 147-53.
- Poitout S. La consanguinité chez les Lépidoptères Noctuidae. Mise en évidence de son importance dans la conduite d'élevages en conditions artificielles. *Ann Zool Ecol Anim* 1969 ; 1 : 245-64.
- Raymond M. *PROBIT CNRS-UMII. Licence L93019*. St George d'Orques (France) : Avenix, 1993 ; 24 p.
- McCaffery AR. Resistance to insecticides in heliothine Lepidoptera; a global view. In : Denholm I, Pickett JA, Devonshire AL, eds. *Insecticide resistance: From mechanisms to management*. Londres : The Royal Society, 1999 : 59-74.
- Khranthi KR, Jadhav D, Wanjari R, Khranthi S., Russell D. Pyrethroid resistance and mechanisms of resistance in field strains of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera : Noctuidae). *J Econ Entomol* 2001 ; 94 : 253-63.
- Gunning RV, Moores GD, Devonshire AL. Esterase inhibitors synergise the toxicity of pyrethrinoids in Australian *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera : Noctuidae). *Pestic Biochem Physiol* 1999 ; 63 : 50-62.
- Bues R, Toubon JF, Boudinhon L. Dynamique des populations et lutte microbiologique contre la noctuelle de la tomate (*H. armigera*) sous serres dans le sud de la France. *PHM-Revue Horticole* 1988 ; 285 : 43-8.
- Kennaugh L, Pearce D, Daly JC, Hobbs AA. A Piperonyl Butoxide synergizable resistance to permethrin in *Helicoverpa armigera* is not due to increased detoxification by cytochrome P450. *Pestic Biochem Physiol* 1993 ; 45 : 234-41.
- Kranthi KR, Armes NJ, Rao NGV, Raj S, Sundaramurthy VT. Seasonal dynamics of metabolic mechanisms mediating pyrethroid resistance in *Helicoverpa armigera* in central India. *Pest Sci* 1997 ; 50 : 91-8.
- Buès R, Himimina M, Poitout S, Gabarra R. Différents états de diapause nymphale et stratégie d'hivernation de *Heliothis armigera* (Hübner) (Lep. Noctuidae). *J Appl Ent* 1989 ; 107 : 376-86.
- Anglade P. Premières observations de déplacements orientés de Noctuelles et de Sphinxes dans une haute vallée Pyrénéenne par recapture d'insectes marqués. *Bull Soc Entomol* 1969 ; 74 : 59-63.