

ÉCONOMIE
➤ **RURALE**

Économie rurale

Agricultures, alimentations, territoires

343 | septembre-octobre 2014

343

Évaluation socioéconomique des politiques phytosanitaires. Le cas de la chrysomèle du maïs

Socio-economic assessment of plant health policies. Application to the Western Corn Rootworm

Sylvain Rousset et Daniel Uny



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/economierurale/4424>

DOI : 10.4000/economierurale.4424

ISSN : 2105-2581

Éditeur

Société Française d'Économie Rurale (SFER)

Édition imprimée

Date de publication : 15 septembre 2014

Pagination : 7-28

ISSN : 0013-0559

Référence électronique

Sylvain Rousset et Daniel Uny, « Évaluation socioéconomique des politiques phytosanitaires. Le cas de la chrysomèle du maïs », *Économie rurale* [En ligne], 343 | septembre-octobre 2014, mis en ligne le 01 janvier 2016, consulté le 05 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/economierurale/4424> ; DOI : 10.4000/economierurale.4424

Évaluation socioéconomique des politiques phytosanitaires

Le cas de la chrysomèle du maïs

Sylvain ROUSSET, Daniel UNY • Irstea, UR ADBX Aménités et Dynamiques des Espaces Ruraux, Cestas

L'article présente une analyse coût-bénéfice de la réglementation sur le confinement de la chrysomèle des racines du maïs en France. L'étude a été réalisée en modélisant avec un système d'information géographique la dynamique de dispersion des populations à partir des foyers orientaux. L'évaluation des impacts socioéconomiques prend en compte l'hétérogénéité des zones de production. D'après les résultats, seule une intensification de la lutte obligatoire contre le ravageur, combinée à un élargissement de l'actuelle zone de confinement à plusieurs départements limitrophes, ralentit assez nettement l'invasion biologique. Toutefois, par rapport au statu quo, la valeur actuelle nette des scénarios alternatifs est faible. Elle est par ailleurs sensible aux paramètres de modélisation retenus. Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude pour l'évaluation des politiques de santé des plantes.

MOTS-CLÉS : *Analyse coût-bénéfice, modélisation spatiale, chrysomèle des racines du maïs, Diabrotica virgifera, système d'information géographique*

Socio-economic assessment of plant health policies. Application to the Western Corn Rootworm

The article reports a cost-benefit analysis of the containment policy of the Western Corn Rootworm in France. The study has been carried out based on the GIS modeling of the pest spread from the Eastern outbreaks. Socio-economic impact assessment takes into account the variety of production conditions. Simulations show that only an intensification of the phytosanitary measures combined with an extension of the current containment zone slows down rather sharply the biological invasion. However, the net present value of alternative scenarios remains low and sensitive to modeling parameters. Several lessons can be learned for this study, in order to assess plant health policies. (JEL: C63, D61, Q18).

KEYWORDS: *Cost-benefit analysis, spatial modelling, Western corn rootworm, Diabrotica virgifera, geographic information system*

Les organismes nuisibles des cultures sont des animaux, des pathogènes et des végétaux susceptibles de provoquer des dommages sur les cultures commerciales et ornementales, en particulier des pertes de récolte, en rendement et en qualité. Les impacts de ces organismes concernent également parfois les milieux non cultivés, avec par exemple la réduction d'espèces végétales clés ou composantes majeures des écosystèmes. Il convient d'ajouter les impacts économiques indirects, tels

que les coûts des plans de surveillance et de contrôle de ces organismes, ainsi que les effets sur les marchés domestiques et sur l'accès aux marchés d'exportation (FAO, 2004).

Pour protéger les ressources végétales mondiales, un ensemble de principes sont appliqués depuis 1952 dans le cadre de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV), principal traité international dans ce domaine. Une partie des organismes nuisibles sont

réglementés et soumis à des politiques de santé des plantes – ou politiques phytosanitaires. Sont notamment concernées les espèces qualifiées d'organisme de quarantaine, c'est-à-dire « qui a une importance potentielle pour l'économie de la zone menacée et qui n'est pas encore présent dans cette zone ou bien qui y est présent mais n'y est pas largement disséminé et fait l'objet d'une lutte officielle » (FAO, 2007). Encadrée au niveau européen par la Directive 2000/29/CE du Conseil, actuellement en cours de révision, la politique phytosanitaire française comporte un arsenal de mesures réglementaires, en particulier l'établissement de permis d'importation, l'inspection et l'interception éventuelle des produits importés, le contrôle de la circulation des végétaux et des produits végétaux, la surveillance biologique du territoire, et la définition de zones dans lesquelles sont conduits des programmes de lutte officielle à caractère obligatoire.

Depuis quelques années, les instances pour la protection de la santé des végétaux recommandent d'évaluer les impacts socio-économiques, en complément de l'analyse de risque traditionnelle (DEFRA, 2005). L'évaluation socio-économique doit aider le décideur public dans son choix de politique phytosanitaire. En effet, les mesures contre les organismes nuisibles permettent d'éviter des impacts négatifs sur les filières et l'environnement, en particulier à moyen et long terme. Pour autant, les politiques phytosanitaires représentent une charge financière pour les entreprises réglementées et le contribuable. Il convient par conséquent d'évaluer l'efficacité de ces politiques, selon leurs coûts et avantages pour la société dans son ensemble.

L'objet de notre recherche est de procéder à une analyse coût-bénéfice de la réglementation française sur le confinement de la chrysomèle des racines du maïs *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte, 1858 (*Coleoptera : Chrysomelidae*).

L'article propose une démarche originale de modélisation simulant la dynamique de dispersion des populations de nuisible, couplée à une évaluation quantitative des impacts économiques. La programmation dans un langage macro associé à un système d'information géographique (SIG) permet la représentation dynamique du phénomène d'invasion biologique, ainsi que la génération de données quantitatives directement exploitables par la suite dans l'analyse coût-bénéfice. L'utilisation du SIG permet l'intégration des données pour explorer et réaliser les simulations, produire une cartographie du risque prenant en compte l'hétérogénéité spatiale, plus précisément la diversité des conditions de production du maïs, en termes de vulnérabilité à l'insecte et de rentabilité des options de lutte.

La première partie de l'article introduit le contexte réglementaire de *Diabrotica virgifera* et les quatre scénarios de lutte obligatoire envisagés. La deuxième partie présente les hypothèses générales de l'étude, le modèle de dispersion et la méthodologie avec laquelle ont été évalués les coûts supportés par les producteurs. La troisième partie restitue et discute les résultats de l'analyse coût-bénéfice. La dernière partie conclut.

Politique de lutte contre la chrysomèle du maïs

La chrysomèle des racines du maïs est le principal ravageur du maïs en Amérique du Nord. Les larves de l'insecte consomment les racines provoquant un déficit nutritionnel et la verse de la plante dans les cas de fortes attaques, avec une atteinte au rendement en grain.

En Europe, les premiers individus ont été détectés en 1992 à Belgrade. Des populations de coléoptères sont aujourd'hui bien implantées sur le continent, notamment en Europe centrale et en Italie du

Nord. Un réseau de piégeage a été mis en place en France dès 1999 et la présence de *Diabrotica virgifera* (par la suite *Diabrotica*) a été détectée pour la première fois en août 2002 près des aéroports de Roissy et du Bourget.

Diabrotica est un organisme réglementé de quarantaine dont l'introduction et la dissémination sont interdites (CE, 2000, 2006a). En France, l'insecte fait l'objet de mesures obligatoires visant à l'éradication dans un périmètre de lutte établi autour des points de capture (MAP, 2000, 2008).

Cet insecte en voie d'installation en France illustre bien le problème des « effets externes » caractéristiques de la lutte contre les nuisibles (Oude Lansink, 2011). La chrysomèle est un insecte mobile et prolifique (Reynaud, 2010). Aussi une population limitée est susceptible de se disperser par vol prolongé vers des territoires contigus indemnes : dans l'Union européenne, les mesures de lutte obligatoire sont ainsi mises en place dès le premier individu adulte capturé par piégeage. En revanche, le seuil de nuisibilité économique de ce ravageur, c'est-à-dire le niveau d'abondance à partir duquel il est rentable pour un producteur de protéger ses cultures afin de prévenir des dégâts, est nettement plus élevé. Par exemple, en Lombardie, région infestée depuis une dizaine d'années, la recommandation aux exploitants prévoit un seuil de six adultes par piège et par jour pour déclencher la lutte contre les larves de *Diabrotica* (Governatori, 2013). Les producteurs situés dans des foyers de chrysomèles n'ont donc pas nécessairement intérêt à mettre en place des mesures préventives drastiques, en particulier si elles sont coûteuses et que la nuisibilité est faible sur leur territoire. Mais leur effort individuel de protection peut dès lors être insuffisant ou trop tardif pour éviter la dispersion des populations et la propagation du ravageur d'une région à l'autre. C'est précisément pour éviter cet effet externe

que la réglementation impose des mesures préventives aux exploitants des territoires où des individus ont été capturés. La réglementation française a ainsi pour finalité de ralentir l'invasion biologique, aujourd'hui considérée comme inéluctable, en maîtrisant des populations en voie d'installation.

Sur ce point, il est important de distinguer la question du risque d'infestation de celle des dégâts aux cultures. La dispersion des chrysomèles est d'autant plus rapide que la proportion de maïs dans le territoire est élevée. Par ailleurs, la monoculture du maïs est un critère majeur dans les dégâts aux cultures, mais d'autres facteurs, par exemple le type de sol, peuvent atténuer fortement l'impact pour le producteur d'un territoire donné.

On assiste depuis 2009 à une recrudescence des captures d'insectes dans l'Est du pays. Le Laboratoire de la santé des végétaux (LSV) de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail a constaté le manque d'efficacité des mesures d'éradication mises en place dans des zones à forte densité en maïs, celle-ci étant particulièrement favorable au développement de l'insecte.

À la suite de cette expertise de l'agence, le ministère de l'Agriculture a décidé de la mise en place d'une politique de confinement des populations pour les régions Alsace et Rhône-Alpes, à partir de la campagne 2010-2011 (MAP, 2011). Les territoires en confinement sont la Haute-Savoie, la Savoie, l'Ain, l'Isère, le Rhône et les deux départements alsaciens (sur une bande de 40 km à l'ouest de la frontière allemande). Dans cette zone, la mesure phytosanitaire retenue consiste en l'obligation, pour tous les agriculteurs, d'une rotation sur au moins un sixième de la sole maïs, avec l'obligation d'effectuer un traitement larvicide sur les parcelles faisant l'objet d'une culture de maïs à partir de la troisième année. Dans une parcelle en monoculture longue de maïs, il

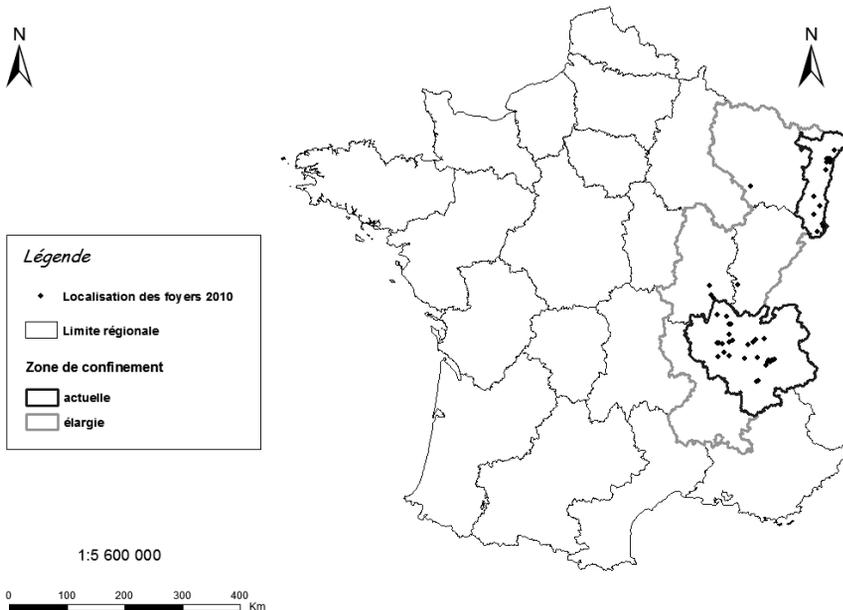
s'agit donc d'interrompre la monoculture (par exemple avec un blé tendre), avant de cultiver à nouveau du maïs, pour une période maximale de cinq années consécutives. Durant les deux premières années en maïs, la parcelle ne fait pas l'objet d'une protection chimique spécifique contre la chrysomèle ; mais les années suivantes, elle doit obligatoirement être traitée.

La lutte est renforcée en cas de capture d'insectes. Ainsi, à l'intérieur d'un périmètre d'un kilomètre de rayon autour du piège, les mesures de lutte se déclinent en fonction du niveau de capture : (a) entre 1 et 29 chrysomèles capturées : rotation une année sur six et lutte larvicide quatre années sur six (à partir de la deuxième année consécutive de maïs), (b) à partir de 30 chrysomèles capturées : rotation une année sur trois et lutte larvicide une année sur trois (à la deuxième année de maïs).

Selon le LSV, cette combinaison présente une certaine efficacité pour contenir les populations de chrysomèles (Reynaud, 2010). Elle reste toutefois moins efficace que la rotation du maïs une année sur trois avec lutte larvicide deux années sur trois, proposée par la Commission européenne dans la recommandation 2006/565/CE du 11 août 2006 (CE, 2006b). Par ailleurs, une première analyse de la situation en Bourgogne, avec des captures depuis deux années consécutives et une diffusion du nuisible, montre que cette région connaît aussi des difficultés d'éradication. La campagne de piégeage 2010 a en outre révélé la présence de l'insecte dans le Jura et dans les Vosges.

Dans ce contexte, se pose la double question de la pertinence d'une intensification de la lutte et d'une extension du confinement au territoire restant des régions

Figure 1. Localisation des foyers et périmètre des zones de confinement



Source : Uny D., IRSTEA UR ADBX. Données Direction générale de l'alimentation. Fond cartographique GéoFla 2007 (IGN).

Alsace et Rhône-Alpes, ainsi qu'aux autres départements de l'Est de la France. À la demande du ministère de l'Agriculture, nous avons réalisé une analyse coût-bénéfice de la politique de lutte contre *Diabrotica*. En accord avec le commanditaire, les scénarios étudiés sont les suivants :

- Le scénario de référence S_{REF} correspond à la poursuite de la réglementation actuelle, incluant le confinement tel qu'il a été établi pour la campagne 2010-2011.
- Le scénario S_{INT} consiste en une intensification des mesures de lutte, à périmètre de protection constant.
- Le scénario S_{EXT} correspond à une extension du périmètre de lutte, à mesure constante, aux départements suivants : Loire, Ardèche, Drôme, Saône et Loire, Côte d'Or, Vosges, Meuse, Moselle, Meurthe-et-Moselle, Jura, Doubs, Haute-Saône et Territoire de Belfort (*figure 1*).
- Le scénario S_{MAX} est un scénario ambitieux combinant cet élargissement de la zone de confinement avec une intensification de la lutte.

Les différences entre scénarios ne concernent que la zone de confinement (ZC). En dehors des départements concernés, la réglementation générale s'applique, avec une poursuite de la politique d'éradication dès la première capture, selon l'arrêté modifié du 28 juillet 2008 (MAP, 2008).

Méthodologie

Parmi les méthodes d'évaluation socio-économique, l'analyse coût-bénéfice présente plusieurs intérêts (Pearce *et al.*, 2006). Elle cherche à prendre en considération les gains et les pertes pour différentes catégories d'agents, sans réduire l'analyse à un groupe en particulier, par exemple dans le cas des politiques phytosanitaires, les seuls producteurs soumis à des mesures obligatoires. Elle permet de mettre en évidence les coûts et les bénéfices pour les différents groupes sociaux, gagnants et perdants. Elle

considère plusieurs options ou scénarios, et contrairement à d'autres approches, elle permet non seulement de classer ces options, mais également de déterminer s'il est pertinent pour le décideur d'intervenir ou non. Elle prend explicitement en compte la dimension temporelle par la procédure d'actualisation. Enfin, basée sur les préférences individuelles, des producteurs, des consommateurs, des citoyens, elle peut être considérée comme « démocratique » (Pearce *et al.*, 2006).

Notre étude est basée sur les étapes logiques de l'analyse coût-bénéfice proposées par Pearce *et al.* (2006) : identification des scénarios possibles et des agents économiques dont les bénéfices et les coûts seront pris en considération, évaluation des impacts physiques, choix d'un horizon temporel, obtention de valeurs monétaires, choix d'un taux d'actualisation, calcul de la valeur actuelle nette (VAN) permettant de juger les scénarios alternatifs, analyse de sensibilité. Pour évaluer les impacts économiques, suivant Holmes *et al.* (2010), nous avons combiné une représentation spatialisée du phénomène d'invasion biologique permettant de déterminer l'aire concernée, avec une évaluation des coûts par unité de surface à risque.

1. Hypothèses générales

Horizon temporel

Quand les effets d'une invasion biologique se manifestent avec un temps de latence et lorsque la phase de propagation de l'organisme est lente, les évaluateurs retiennent un horizon de planification très long, parfois infini, les pertes subies étant considérées comme irréversibles et perpétuelles (Thomas, Gozlan, 2006). Nous avons retenu un horizon de cent ans. Ce choix peut être justifié *a posteriori*, notre modèle de dispersion montrant que dans le scénario d'invasion la plus lente, les derniers maïs français sont atteints en 96^e année. Au-delà, les scénarios ont strictement les mêmes conséquences économiques.

Taux d'actualisation

Conformément aux recommandations pour le calcul économique public, nous avons retenu un taux d'actualisation décroissant avec le temps, avec une valeur constante de 4 % pendant les trente premières années, puis une décroissance jusqu'à atteindre une valeur plancher de 2 % (CGP, 2005).

Ressources concernées

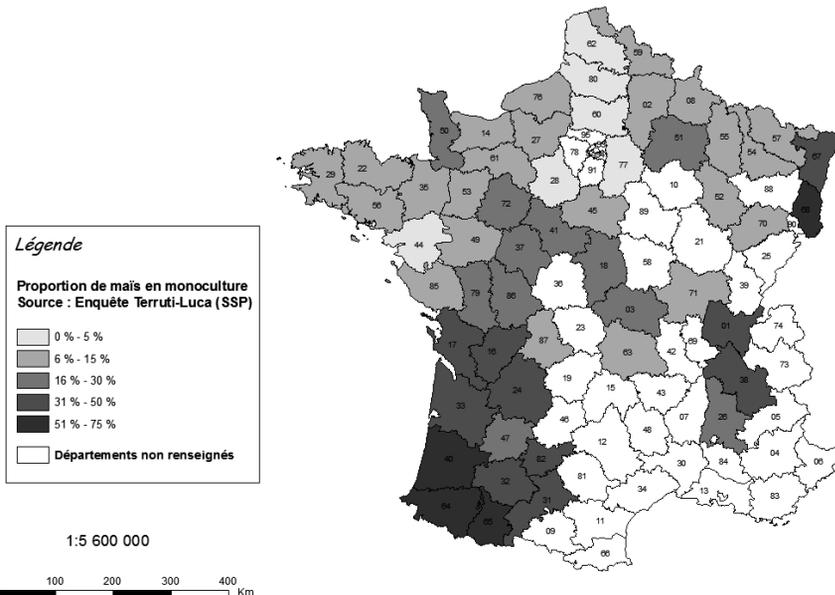
Les superficies en maïs sont considérées constantes durant la période de projection. En rapprochant les données du recensement agricole et de l'enquête sur l'utilisation des terres du ministère de l'Agriculture (service de la Statistique et de la Prospective), nous estimons la surface en maïs cultivée en monoculture, donc vulnérable à la chrysomèle, à 671 825 ha sur 2 886 963 ha cultivés en France, soit un peu moins du quart des surfaces (figure 2).

Les producteurs de maïs grain et de fourrages sont directement impactés par les mesures de lutte obligatoire et les dégâts de chrysomèles dans les zones européennes infestées. Le maïs est l'unique plante hôte subissant des dégâts par les larves ; le variant américain adapté au maïs assolé étant absent du continent européen, seules les plantes conduites en monoculture longue sont sensibles aux attaques du ravageur.

Comportement des agents

Dans la zone de confinement, les exploitants agricoles doivent mettre en place des mesures préventives. En dehors de la ZC, les producteurs ne déclenchent une lutte que lorsque leur commune est infestée, la stratégie individuelle dépendant alors de la nuisibilité du ravageur et des contraintes locales de production.

Figure 2. Proportion de maïs en monoculture selon le département



Source : Uny D., IRSTEA UR ADBX. Données Teruti-Lucas (SSP).
Fond cartographique Géofla 2007 (IGN).

Autres hypothèses

Tous les foyers actifs en 2010 contribuent à la dispersion des populations de chrysomèles, y compris les foyers isolés en régions Lorraine, Bourgogne et Franche-Comté. En revanche, on fait l'hypothèse que les nouveaux foyers détectés postérieurement sont éradiqués et qu'il n'y a donc pas de nouvelle source de dispersion en aval du front d'attaque oriental. Par ailleurs, la ZC a vocation à contenir la dissémination des chrysomèles et non à la stopper, elle finira par être dépassée par le front d'attaque.

Les simulations du modèle spatial montrent qu'avec la mesure la plus efficace, la ZC est entièrement infestée dès la quinzième année. Au-delà de 15 ans, on considère donc que les mesures obligatoires en zone de confinement sont abandonnées.

2. Modélisation de la dispersion des populations

L'Analyse du risque phytosanitaire (ARP) est la procédure standardisée pour apprécier les risques en santé végétale, et décider par exemple si un organisme nuisible doit être réglementé ou non. C'est une approche qualitative et multicritères, codifiée dans des normes internationales (FAO, 2004 ; OEPP, 2009). Une appréciation plus quantitative des risques est toutefois nécessaire pour conduire une analyse coût-bénéfice des politiques phytosanitaires (Rousset *et al.*, 2012).

Le cas de Diabrotica virgifera

Le LSV considère que l'ensemble de la France possède un climat favorable

à l'installation du ravageur et que seule l'absence du maïs est un facteur limitant à son établissement. D'autres facteurs abiotiques peuvent intervenir pour expliquer l'abondance de l'insecte dans un milieu donné et la vitesse de dispersion, en particulier le type de sol, la vitesse ou la direction du vent, l'hétérogénéité spatiale du milieu cultivé, les pratiques culturales (Reynaud, 2010).

Peu de travaux modélisent explicitement la dynamique de dispersion de *Diabrotica* sur un espace géographique. Van Nieuwenhuysse *et al.* (2009) font des hypothèses d'installation des populations à partir de l'avis d'experts européens. Dans une étude portant sur le Royaume-Uni, Macleod *et al.* (2005) reprennent le principe d'une dispersion concentrique à partir d'un foyer unique. Wesseler et Fall (2010) simulent une dispersion par réaction-diffusion plus théorique à l'échelle continentale. Carrasco (2009) définit un modèle de propagation calibré sur des essais réalisés en Hongrie, intégrant la dispersion à longue distance par voie anthropique.

Baufeld et Enzian (2005a) ont mis au point un modèle pour l'analyse de risque phytosanitaire en Allemagne. Les auteurs introduisent une progression naturelle sur longue distance, qui correspond à un paysage peu compartimenté, avec une vitesse de dispersion corrigée par la proportion de maïs dans le paysage. Dans les zones de très forte densité maïsicole, la vitesse de dispersion est maximale. Dans les autres cas, elle est corrigée pour prendre

Équation 1a. Modèle de dispersion de Baufeld et Enzian (2005a)

$V_i = V_{\max} \cdot K_i$		V_i	Vitesse de dispersion (km/an)
		V_{\max}	Vitesse maximale de dispersion
$K_i = \frac{2 \cdot SM_i}{SAU_i}$	si $SM_i \leq 0.5 \cdot SAU_i$	K_i	Correction pour la densité maïs
		SM_i	Superficie en maïs
$K_i = 1$	si $SM_i > 0.5 \cdot SAU_i$	SAU_i	Superficie agricole utile
		i	: Canton

en compte la diversité des cultures, par un facteur prenant de façon continue des valeurs comprises entre 0 pour les espaces sans maïs et 1 pour les espaces dans lesquels la culture représente au moins 50 % de la Superficie agricole utile (SAU) (équation 1a).

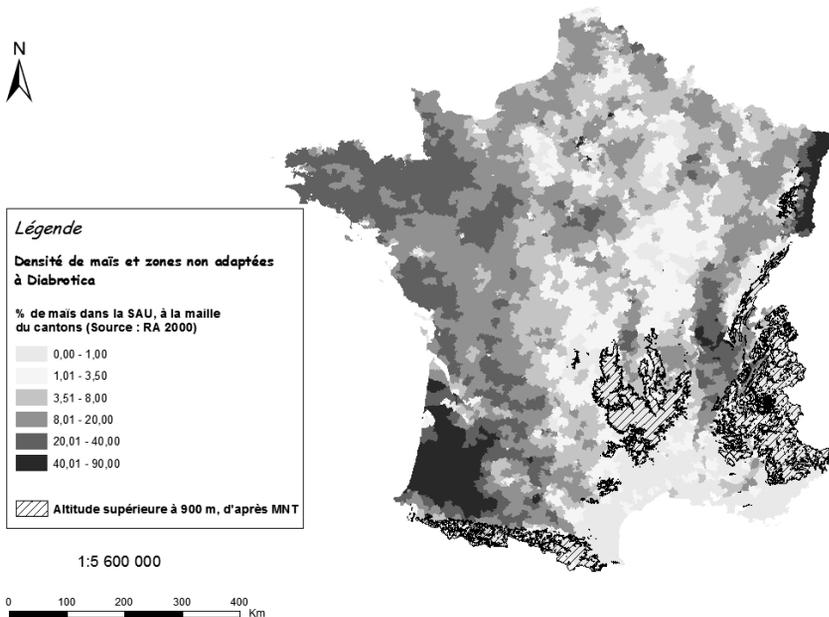
La dispersion se fait de proche en proche et de façon concentrique à partir des zones infestées. Au vu de la littérature et des données disponibles, on considère en effet implicitement que la dispersion de la chrysomèle est équiprobable dans toutes les directions (Reynaud, 2010). Le modèle intègre par ailleurs une contrainte topographique, le vol des adultes étant supposé impossible au-delà de 900 m d'altitude. Dans le cas de la France, cette contrainte ne constitue pas des barrières infranchissables, la dispersion des populations de Rhône-Alpes au Sud-Ouest pouvant par

exemple s'opérer par le Nord du Massif central (figure 3).

Le modèle retenu

Nous nous sommes basés sur le modèle de Baufeld et Enzian (2005a). Celui-ci simule une propagation en l'absence de lutte individuelle ou collective contre *Diabrotica*. Nous l'avons donc adapté en introduisant au dénominateur un paramètre ω_j , qui permet de corriger pour l'efficacité des mesures phytosanitaires obligatoires mises en œuvre dans la zone de confinement, qui ont pour conséquence de ralentir plus ou moins nettement la progression des populations de ravageurs. Ce paramètre prend une valeur de 1 dans la situation contrefactuelle en l'absence de lutte et tend vers $+\infty$ pour un confinement complet des chrysomèles (équation 1b). Notre programme prend par ailleurs en compte la situation

Figure 3. Densité de maïs et zones non adaptées à *Diabrotica*



Source : Uny D., IRSTEA UR ADBX. Données recensement agricole 2000 (SSP). Fond cartographique GéoFla 2007 (IGN).

Équation 1b. Dispersion des populations de chrysomèles

$$V_{ij} = \frac{V_{\max} \cdot K_i}{\omega_j}$$

$$K_i = \frac{2 \cdot SM_i}{SAU_i} \quad \text{si } SM_i \leq 0.5 \cdot SAU_i$$

$$K_i = 1 \quad \text{si } SM_i > 0.5 \cdot SAU_i$$

V_i	Vitesse de dispersion (km/an)
V_{\max}	Vitesse maximale de dispersion
K_i	Correction pour la densité maïs
SM_i	Superficie en maïs
SAU_i	Superficie agricole utile
ω_j	Efficacité de la réglementation
i	: Canton
j	: Scénario réglementaire

française en 2010 caractérisée par des foyers multiples.

Le modèle est programmé en *Arc Macro Language* (AML), un langage algorithmique propriétaire conçu par Esri, pour produire des applications dans ARC/INFO (ESRI, 1995). C'est un langage de programmation qui permet d'accéder à de nombreuses fonctionnalités, de l'automatisation des tâches courantes dans ARC/INFO, à la création des applications complètes multitâches, d'interfaces graphiques.

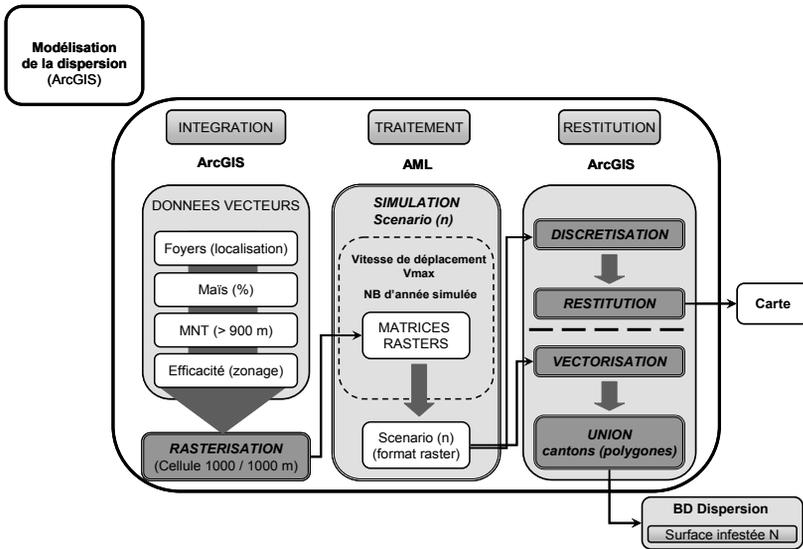
Le processus de modélisation sous SIG est présenté dans la *figure 4*. Les données en vecteurs telles que le pourcentage de maïs dans le canton et l'efficacité de la réglementation sont intégrées au SIG. Elles sont ensuite converties en format raster, c'est-à-dire sous la forme de cellules unitaires de 1 000 m par 1 000 m : par exemple, pour la densité en maïs, chaque pixel contient le taux moyen du canton sur lequel il est positionné. Le programme macro simule les différents scénarios réglementaires. La dispersion se fait de proche en proche et « à 360° » à partir des pixels infestés. Les résultats de simulation sont ensuite restitués, d'une part sous la forme de cartes présentées dans les résultats, d'autre part sous la forme de polygones représentant la surface infestée l'année N, N+1, N+2, etc. (*figure 4*). Une jointure est

ensuite réalisée à l'échelle du canton avec SAS 9 pour intégrer les impacts économiques, les actualiser et les agréger sur la période de projection.

La vitesse maximale de dispersion des populations V_{\max} et l'efficacité de la lutte collective ω_j ont été établies par le LSV dans un avis portant sur l'évaluation du confinement, après saisine par le ministère de l'Agriculture (Reynaud, 2010). La capacité de dispersion naturelle du ravageur en zone de culture intensive du maïs est un paramètre central du modèle. Baufeld et Enzian (2005a) retiennent une V_{\max} de 80 km/an pour l'Allemagne et l'Est de la France. Sur la base d'un atelier d'experts européens, Wesseler et Fall (2010) considèrent 60 km/an pour les zones de culture dense en l'absence de mesure de lutte. Robinet *et al.* (2012) considèrent 80 km/an comme hypothèse centrale pour l'ensemble de l'Europe.

Les observations de terrain mesurent plutôt une progression moyenne des populations. Hemerik *et al.* (2004) ont mesuré une vitesse moyenne de dispersion du coléoptère en Europe centrale entre 1992 et 2000 à 33,3 km/an. On notera la relation linéaire entre la racine carrée de l'aire occupée et le temps ($\sqrt{A} = r(t)\sqrt{\pi} = 33,3t\sqrt{\pi}$ ($R^2 = 0,98$) avec t le temps et $r(t)$ le rayon de l'aire occupé par *Diabrotica*),

Figure 4. Processus de modélisation sous système d'information géographique



Source : les auteurs.

qui traduit bien l'expansion concentrique dans une plaine agricole homogène.

Dans son analyse de risque, le LSV a retenu une V_{max} de 80 km/an, deux autres valeurs (40 et 120 km/an) permettant d'appréhender la sensibilité de l'analyse de risque phytosanitaire.

L'efficacité ω_j est calculée à partir d'un modèle de population développé par Reynaud au LSV (Reynaud, 2010). Celui-ci prend en compte les conditions initiales d'infestation dans le foyer alsacien, les paramètres biologiques de l'insecte (Toepfer, Kuhlman, 2006) et l'efficacité des méthodes de lutte associant rotation et larvicides (Barcic *et al.*, 2007 ; Delos, 2010 ; Gray *et al.*, 2009 ; Kiss *et al.*, 2005 ; Levine *et al.*, 1992). Les valeurs retenues sont respectivement 5 pour la mesure européenne et 1,43 pour la mesure nationale (une valeur de 5 correspondant à une division par 5 de la vitesse de déplacement du front d'attaque par rapport à une situation sans mesure).

3. Impacts économiques

Différentes méthodes pour évaluer les impacts

Plusieurs approches peuvent être mobilisées pour évaluer les impacts économiques des organismes nuisibles des cultures (Soliman *et al.*, 2010). La modélisation en équilibre partiel permet de considérer les différents impacts, tant sur l'offre de produits agricoles (*e.g.* hausse des coûts de production) que sur la demande (*e.g.* modifications des préférences des consommateurs). La variation de bien-être des producteurs et des consommateurs peut ainsi être évaluée à partir des déplacements des courbes d'offre et de demande, se traduisant par de nouveaux prix et quantités à l'équilibre. Ce type de modèle permet également d'évaluer l'impact des politiques phytosanitaires, par exemple les mesures d'éradication, les restrictions sur les exportations et les interdictions temporaires d'importation (Choi *et al.*, 2003 ; Hoddle *et al.* 2003).

Les modèles d'équilibre général calculable, qui simulent le fonctionnement de

l'économie dans son ensemble en intégrant les impacts sur l'emploi et le revenu global, sont peu utilisés pour évaluer les effets des organismes nuisibles pour des raisons méthodologiques – les activités agricoles et les unités géographiques sont généralement très agrégées – et parce que les bio-invasions ont rarement un impact justifiant une analyse à cette échelle (Soliman *et al.*, 2010).

Selon la revue de Soliman *et al.* (2010), c'est toutefois la méthode du budget partiel qui est privilégiée dans la très grande majorité des études publiées. Le budget partiel (*partial budgeting*) est une approche comptable à l'échelle de l'entreprise, de l'atelier voire de la parcelle agricole, permettant de mesurer un impact net, à partir des variations de recettes et de coûts du producteur. Elle est basée sur des coefficients fixes, avec des prix et des structures de coûts exogènes. Elle ne permet donc pas d'évaluer dans quelle mesure les impacts sur l'offre domestique sont en partie transmis au consommateur et aux concurrents des pays tiers *via* le système des prix. Les effets agrégés sur le revenu à l'échelle d'un territoire ou d'un pays sont évalués en additionnant les impacts pour les différentes catégories de producteurs. Par sa simplicité, l'approche en budget partiel se prête bien au couplage avec un modèle de dispersion : la méthodologie a été utilisée pour étudier les impacts économiques du flétrissement bactérien de la pomme de terre (Mumford *et al.*, 2000), du doryphore (Heikkila et Peltola, 2007), de la pourriture brune (Breukers *et al.*, 2008), de *Thrips palmi* (Macleod *et al.*, 2004), du nématode du pin (Soliman *et al.*, 2011) ou encore de la chrysomèle du maïs. Nous revenons dans la section suivante sur ces dernières études consacrées à *Diabrotica*.

Évaluation des coûts aux producteurs

On utilise la méthode du budget partiel pour évaluer l'impact potentiel des scénarios réglementaires sur le revenu de l'exploitant.

Les études publiées sur *Diabrotica* se fondent sur des impacts moyens nationaux, qui masquent la diversité des situations régionales. Baufeld et Enzian (2005b) considèrent des agriculteurs « passifs » subissant une perte de rendement moyen de 10 % dans les zones de monoculture, ce qui se traduit par une perte de 112 €/ha en Italie, de 104 €/ha en France et en Allemagne. Dans une étude récente pour la DG SANCO, le coût de la rotation est évalué à 150 €/ha en moyenne pour l'Italie, 175 €/ha pour la France, et 60 €/ha pour l'Allemagne (Van Nieuwenhuysse, 2009). En Hongrie, en l'absence de lutte, la perte moyenne est estimée à 176 €/ha pour le maïs grain (Dillen *et al.*, 2009).

Nous avons au contraire différencié les effets du ravageur par petite zone de production, de façon à prendre en considération à la fois les différences de vulnérabilité à l'insecte et de profitabilité relative du maïs pour les exploitants agricoles français. L'expérience des pays dans lesquels l'insecte est définitivement installé (États-Unis, Italie du Nord, Hongrie) montre en effet que les stratégies pour limiter les dégâts de chrysomèles sont diverses et dépendent des conditions agronomiques, des pratiques culturales et des conditions socio-économiques régionales (Borioni *et al.*, 2006 ; Thibord, 2013).

Dans la zone de confinement, la lutte est obligatoire et le coût dépend de la mesure phytosanitaire retenue par les autorités, c'est-à-dire de la fréquence d'interruption dans la monoculture du maïs et du prix des traitements phytosanitaires (*équation 2*). Le coût diffère d'un canton à l'autre, selon les marges brutes respectives du maïs et de la culture de substitution. Les sources de données sont disponibles en annexe (*tableau A1*).

Pour évaluer les coûts aux producteurs dans les zones infestées mais non réglementées, nous avons procédé en quatre étapes : (i) réunion du réseau d'experts du

Équation 2. Coût de la lutte obligatoire (EUR/ha)

$$CO_{ij} = \alpha_j \cdot (MM_i - MC_i) + \beta_j \cdot PT$$

CO_{ij}	Coût de la lutte obligatoire	i : canton
α_j	Proportion de maïs soumis à rotation	j : scénario réglementaire
MM_i	Marge brute du maïs grain	
MC_i	Marge brute de la culture de substitution	
β_j	Proportion de maïs traité	
PT	Coût du traitement larvicide	

ministère de l'Agriculture (DGAL, LSV, Arvalis-Institut du Végétal, AGPM) pour déterminer les critères de base permettant de déterminer le niveau de nuisibilité de l'insecte (Type de sol, variété, protection insecticide au semis, date de semis, irrigation, etc.), (ii) classement par les ingénieurs Arvalis des zones de production selon le potentiel de nuisibilité pondéré par le niveau de population (Thibord, 2013), à partir d'une typologie en 50 zones de production considérées comme homogènes du point de vue agronomique (AGPM, 2010), (iii) identification des tactiques de lutte possibles et de leur combinaison en trois stratégies principales, (iv) détermination de la stratégie optimale pour le producteur à partir des coûts et manque à gagner liés à l'application des stratégies.

Les trois principales options de lutte identifiées par les experts sont : (a) ne rien faire et tolérer la présence du ravageur, (b) pratiquer une rotation du maïs une année sur trois, (c) rotation une année sur six et lutte larvicide trois années sur six, ceci à partir de la troisième année consécutive de maïs. La première stratégie implique un dégât résiduel θ sur le rendement, fonction de la zone de production. Les deux dernières stratégies sont supposées toujours assurer le maintien du niveau de production ($\theta = 0$). Ces stratégies ont des coûts différents. La stratégie retenue par les producteurs est celle qui minimise le coût parmi les trois options possibles (équation 3).

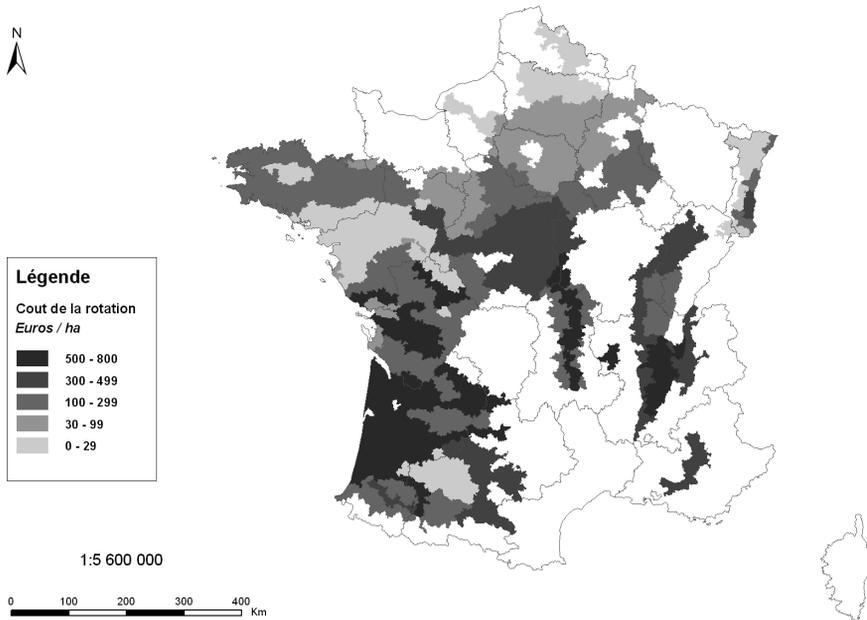
L'interruption de la monoculture peut être particulièrement pénalisante, par

Équation 3. Coût de la lutte volontaire (EUR/ha)

$$CL_i = \min_s CS_{is} \quad \text{avec} \quad CS_{is} = (\theta_{is} \cdot Y_i \cdot PM) + \alpha_s \cdot (MM_i - MC_i) + \beta_s \cdot PT$$

CL_i	Coût de la lutte volontaire	i : canton
CS_{is}	Coût de la stratégie de lutte	s : stratégie de lutte volontaire
θ_{is}	Dégât résiduel aux cultures	
Y_i	Rendement du maïs grain	
PM	Prix du maïs grain	
α_s	Proportion de maïs soumis à rotation	
MM_i	Marge brute du maïs grain	
MC_i	Marge brute de la culture de substitution	
β_s	Proportion de maïs traité	
PT	Coût du traitement larvicide	

Figure 5. Baisse de marge brute liée à la substitution entre le maïs et la seconde culture la plus rentable (EUR/ha/an)



Source : Uny D., IRSTEA UR ADBX. Données Arvalis, FranceAgriMer et Chambres d'agriculture. Fond cartographique GéoFla 2007 (IGN).

exemple dans certains territoires du Sud-Ouest comme les Landes et la vallée de l'Adour irriguée, en l'absence de cultures de substitution rentables (figure 5). Inversement, dans d'autres territoires, le blé tendre dégage une marge brute à l'hectare proche de celle du maïs et son introduction dans la succession de culture pose peu de problèmes techniques.

Agrégation des coûts sur la période

La dernière étape consiste à agréger les coûts aux producteurs en les actualisant (équation 4). L'aire concernée par la lutte contre l'insecte est calculée à partir du SIG, pour chaque canton, année et scénario. Le coût à l'hectare de maïs en monoculture dépend du statut du territoire, selon que celui-ci est placé en confinement et donc en lutte obligatoire, ou non.

Équation 4. Somme actualisée des coûts aux producteurs (EUR 2010)

$$SC_j = \sum_{it} \left(\frac{CH_{ijt} \cdot A_{ijt}}{(1+a \cdot t)^t} \right)$$

$$CH_{ijt} = CO_{ij} \text{ si canton en confinement}$$

$$CH_{ijt} = CL_i \text{ sinon}$$

SC_j	Somme actualisée des coûts
CH_{ijt}	Coût à l'hectare
CO_{ij}	Coût de la lutte obligatoire
CL_i	Coût de la lutte volontaire
A_{ijt}	Aire concernée par la lutte
a_t	Taux d'actualisation
i	: canton ; t : année
j	: scénario réglementaire

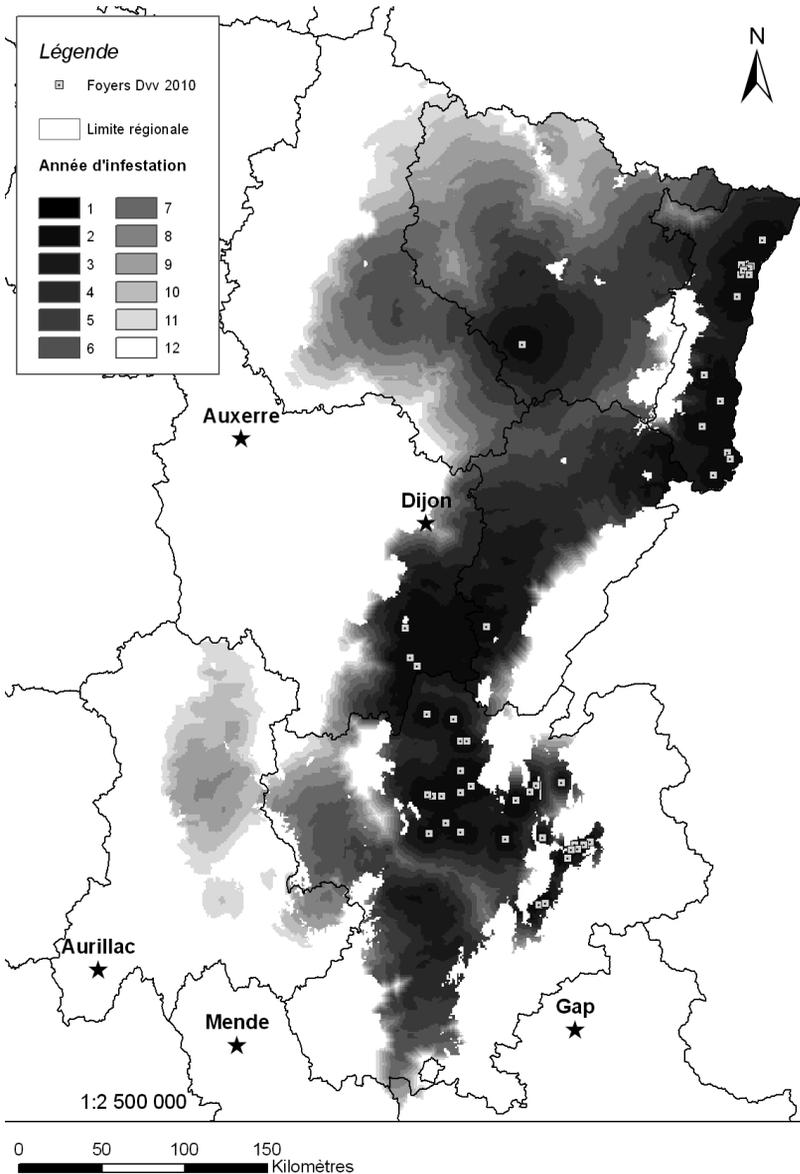
Résultats

1. Évolution des populations de ravageurs

Quand la mesure européenne est appliquée à la zone de confinement actuelle (S_{INT}), la simulation montre un ralentissement

initial du front d'attaque dans les départements frontaliers (*figure 6*). Toutefois, à un horizon de douze ans, la politique de lutte obligatoire n'empêche pas la dispersion des insectes vers le Massif central à partir des foyers Rhône-alpins, ni vers le

Figure 6. Mesure européenne appliquée à la zone de confinement (S_{INT})

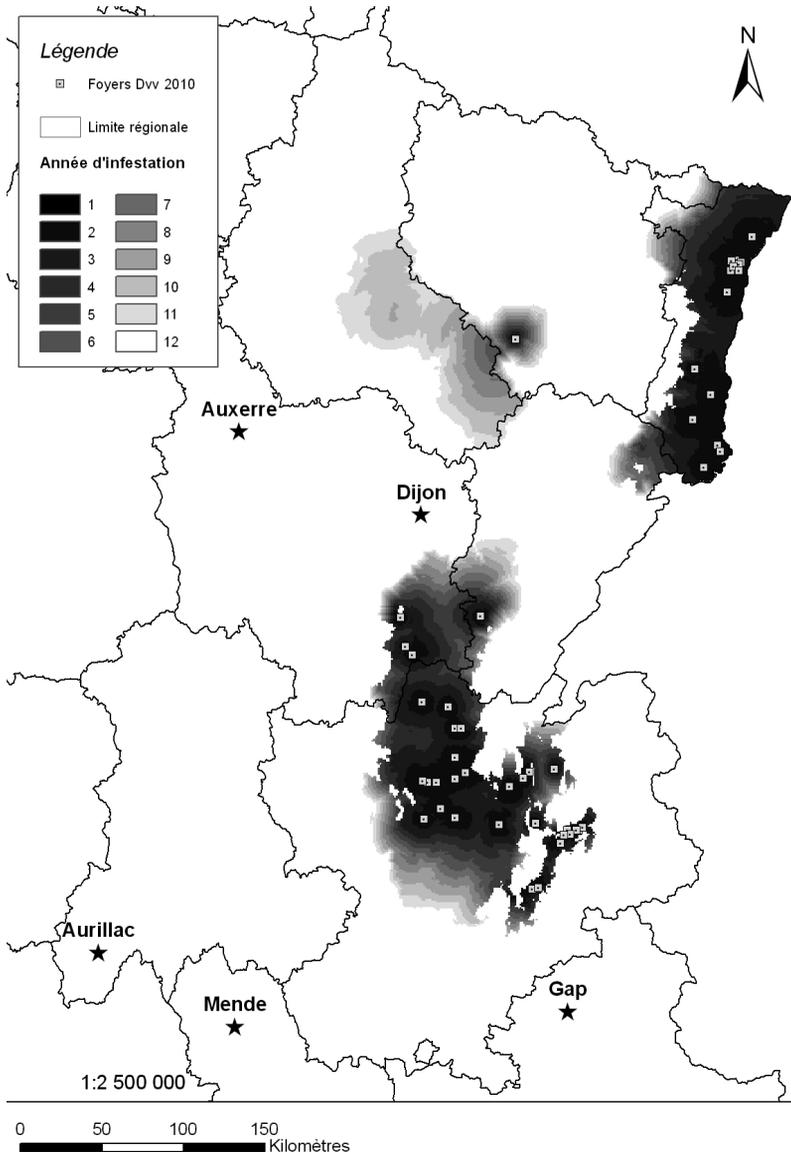


Source : Uny D., IRSTEA UR ADBX. Simulation AML. Fond cartographique Géofla 2007 (IGN).

bassin parisien à partir du foyer lorrain. Les contreforts orientaux du Massif central ne constituent pas une barrière infranchissable, les vallées facilitant le passage des populations de chrysomèles de la Loire au Puy-de-Dôme.

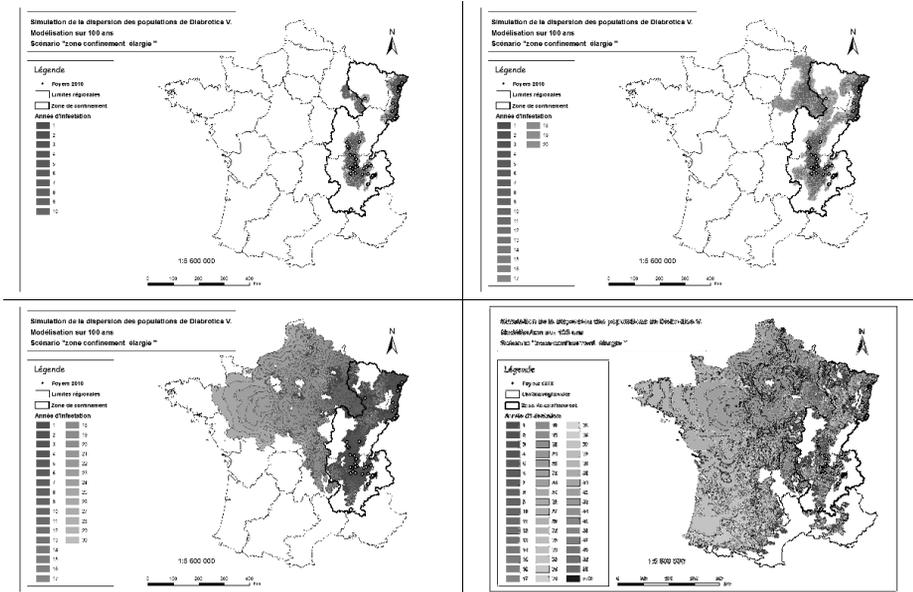
L'extension de la zone de confinement à 19 départements (S_{MAX}) permet de contenir plus efficacement les populations installées en incluant tous les foyers de chrysomèles et en faisant jouer un rôle tampon aux départements limitrophes comme la

Figure 7. Mesure européenne avec extension de la zone de confinement (S_{MAX})



Source : Uny D., IRSTEA UR ADBX. Simulation AML. Fond cartographique Géofla 2007 (IGN).

Figure 8. Mesure européenne avec extension de la zone de confinement (S_{MAX}).



Loire, qui ralentit l'arrivée dans la plaine de la Limagne auvergnate (figure 7).

À très long terme, les différences entre scénarios sont peu marquées. À l'horizon du siècle, en définitive seul le scénario S_{MAX} combinant l'intensification de la lutte et l'élargissement du confinement ralentit assez nettement l'invasion de Diabrotica, de sept ans par rapport aux autres scénarios, pour une V_{max} de 80 km/an. La dispersion moyenne simulée est alors de 16 à 19 km/an selon l'orientation du front de population.

Elle tombe à 7-12 km/an avec une hypothèse de V_{max} à 40 km/an et atteint 28-35 km/an avec une V_{max} de 120 km/an. Il convient de noter que cette vitesse moyenne est inférieure à celles enregistrées jusqu'à présent en Europe par les réseaux de biovigilance, ce qui s'explique par l'absence de continuité entre zones à forte concentration en maïs en France (Reynaud, 2010).

Quels que soient le scénario retenu et l'efficacité des mesures phytosanitaires, le

territoire hexagonal est à long terme entièrement infesté. Ainsi, dans le cas de S_{MAX} , les populations colonisent la zone de confinement élargie en une vingtaine d'années, se dispersent en Auvergne et dans le Nord durant la décennie suivante, le Sud-Ouest étant ensuite atteint en quelques années seulement (figure 8).

2. Résultats de l'analyse coût-bénéfice

Dans le scénario de référence (S_{REF}), les coûts subis par les producteurs sont de 574 M€ (2010) sur la période de projection, dont 193 M€ pour les agriculteurs situés dans les départements en zone de confinement (tableau 1). Bien que représentant un pourcentage limité des surfaces en monoculture, les producteurs de la ZC doivent mettre en place des mesures phytosanitaires de façon précoce, ce qui explique l'importance des coûts actualisés dans ces territoires. Le renforcement de la politique de confinement accroît logiquement les coûts pour les agriculteurs

Tableau 1. Coûts aux producteurs et valeur actuelle nette (VAN)

Scénario	Coûts aux producteurs (M€ 2010)			VAN (M€ 2010)
	ZC	Hors ZC	France entière	France entière
S _{REF}	193	381	574	référence
S _{EXT}	229	343	572	+2
S _{INT}	219	365	583	-9
S _{MAX}	260	297	557	+17

Source : les auteurs.

de la ZC, avec une accentuation de la contrainte de rotation ou une extension de la zone concernée par les mesures phytosanitaires. Dans le scénario S_{MAX}, les bénéfices à long terme pour les producteurs de l'Ouest situés loin des foyers « compensent » les surcoûts pour les exploitants en confinement par rapport à la poursuite de la politique actuelle ; la valeur nette du scénario est en effet positive de 17 M€ (tableau 1, dernière colonne). C'est également le cas avec le scénario S_{EXT} mais très modestement.

Pour tester la robustesse des résultats, nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur la vitesse maximale de déplacement des populations V_{max}, avec la valeur haute de 120 km/an et la valeur 40 km/an, qui est la fourchette basse selon les experts (tableau 2). Logiquement, l'impact économique de *Diabrotica* est d'autant plus important que V_{max} est élevée, puisque les territoires éloignés des foyers (en particulier l'Aquitaine et Midi-Pyrénées) seront

touchés plus précocement. On observe que la hiérarchie des scénarios reste la même avec une invasion biologique plus lente. En revanche, avec une dispersion naturelle rapide, c'est le scénario au fil de l'eau S_{REF} qui apparaît le plus efficace, tous les scénarios alternatifs ayant une VAN négative.

Le principal enseignement à retenir des résultats est que les écarts de coûts entre stratégies de lutte obligatoire sont modestes, moins de 5 % entre le scénario le plus pénalisant pour les producteurs et le scénario le moins coûteux (tableau 1). Par ailleurs, ces résultats ne résistent pas à une analyse de sensibilité sur un paramètre écologique élémentaire (tableau 2).

3. Discussion

Dans leur revue de la littérature sur la dynamique des populations de chrysomèle, Meinke *et al.* (2009) soulignent les lacunes scientifiques concernant la dispersion sur longue distance. Il est notamment difficile d'isoler et de pondérer les

Tableau 2. Sensibilité à l'hypothèse de dispersion maximale (VAN, France entière, M€ 2010)

Vmax Scénario	40 km/an	80 km/an	120 km/an
S _{REF}	référence	référence	référence
S _{EXT}	+1	+2	-6
S _{INT}	-22	-9	-26
S _{MAX}	+27	+17	-18

Source : les auteurs.

différents facteurs naturels et anthropiques facilitant la propagation (climat, topographie, densité en maïs, routes et autres infrastructures). En l'absence de calibration sur données d'observations, le modèle dérivé de Baufeld et Enzian (2005a) a donc ses limites. Nous avons représenté la dispersion des populations par un front d'attaque gagnant de proche en proche de façon concentrique, or l'expansion de *Diabrotica* se caractériserait plutôt par un processus de progression stratifiée, qui combine une dispersion à courte distance et des projections à longue distance par voie anthropique (Ciosi *et al.*, 2011 ; Gray *et al.*, 2009). Pour autant, l'évaluateur doit arbitrer entre le réalisme du modèle et la disponibilité des données. Sur ce point, les modèles simplifiés à extension radiale constituent selon un panel d'experts européens l'approche la plus prometteuse pour apprécier en routine la capacité de dispersion des organismes nuisibles (Robinet *et al.*, 2012).

Les impacts sur les producteurs ont été évalués avec la méthode du budget partiel, centrée sur les variations de marge brute. Cette approche est statique et décrit une activité isolée, elle n'intègre pas les contraintes de l'exploitation agricole dans le calcul du coût d'opportunité des activités ni les effets en retour sur les prix des produits agricoles.

L'analyse de sensibilité a montré que les résultats étaient sensibles à l'hypothèse sur la capacité naturelle de dispersion des populations. Les autres paramètres de risque et le taux d'actualisation sont également susceptibles de modifier la hiérarchie des scénarios.

En dehors de l'incertitude sur les paramètres de modélisation, qui est consubstantielle à l'analyse coût-bénéfice, des résultats peu concluants s'expliquent avant tout par la faible différenciation des scénarios. Nous n'avons pas étudié l'option d'un retour à la stratégie d'éradication

des populations installées dans l'Est de la France, ni à l'opposé, une déréglementation totale de *Diabrotica*. Les scénarios sont tous une variante de la stratégie de confinement décidée en 2010, dans lesquels les mesures phytosanitaires interviennent dans des départements avec populations installées ou en bordure immédiate.

*

**

L'article développe une analyse coût-bénéfice de différents scénarios de gestion du risque posé par la chrysome du maïs. Nous avons comparé la poursuite de la stratégie de confinement des populations de nuisibles, mise en œuvre à partir de 2011 dans six départements de l'Est de la France (scénario de référence), avec trois scénarios alternatifs de renforcement de cette stratégie préventive.

Le calcul économique s'appuie sur une démarche de modélisation de la dynamique des populations d'insectes sous système d'information géographique, couplée à une évaluation des impacts prenant en compte l'hétérogénéité spatiale, plus précisément la diversité des conditions de production du maïs selon le territoire, en termes de vulnérabilité à l'insecte et de rentabilité des options de lutte.

Les résultats de l'analyse coût-bénéfice ne permettent pas de recommander spécifiquement l'un des quatre scénarios envisagés par le commanditaire. Tout au plus peut-on remarquer qu'il n'apparaît pas impérieux au regard des résultats de renforcer la réglementation sur le confinement. Les pouvoirs publics sont par ailleurs toujours confrontés au dilemme souligné par Thomas et Gozlan (2006) entre la poursuite d'une stratégie de prévention et le passage à une stratégie d'adaptation au ravageur.

Les premiers résultats présentés dans l'article amènent des travaux complémentaires, sur des scénarios plus contrastés. La

fréquence de capture et le nombre d'individus capturés pourraient être des variables également intéressantes à prendre en compte, de manière à pondérer les impacts de dispersion des foyers. Sous réserve d'être en mesure de leur associer une loi de distribution de probabilités, des simulations stochastiques seraient envisageables, ce qui permettrait de mobiliser d'autres critères de décision que la valeur actuelle nette.

Encouragée par la rationalisation de l'action gouvernementale, l'évaluation

socio-économique peut contribuer à de meilleurs choix collectifs, en matière de gestion des organismes de quarantaine, comme dans d'autres secteurs des politiques agricoles et sanitaires. Des méthodes éprouvées telles que l'analyse coût-bénéfice sont mobilisables, en complément de l'analyse de risque. Notre étude illustre toutefois également les limites de l'approche et le besoin de progresser dans le dialogue interdisciplinaire, afin de mieux quantifier les impacts des ravageurs émergents et des politiques de lutte. ■

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGPM (2010). Segmentation de la production de maïs en France : un outil pour la filière. *AGPM-Info*, n° 369.
- Barcic J.I., Bazok R., Edwards C.R., Kos T. (2007). Western Corn rootworm adult movement and possible egg laying in fields bordering maize. *Journal of Applied Entomology*, vol. 131, p. 400-405.
- Baufeld P., Enzian S. (2005a). *Diabrotica virgifera virgifera*, its potential spread and economic and ecological consequences in Germany. In Alford D.V., Backhaus G.F. (Eds.), *Plant protection and plant health in Europe: introduction and spread of invasive species*. Berlin, Humboldt University.
- Baufeld P., Enzian S. (2005b). Maize Growing, Maize High-Risk Areas and Potential Yield Losses due to Western Corn Rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera*) Damage in Selected European Countries. In Vidal S., Kulhmann U., Edwards C.R. (Eds.), *Western Corn Rootworm. Ecology and Management*. Wallingford, CABI Publishing.
- Boriani M., Agosti M., Kiss J., Edwards C.R. (2006). Sustainable management of the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte (Coleoptera: Chrysomelidae) in infested areas: experiences in Italy, Hungary and the USA. *Bulletin OEPP*, vol. 36, n° 3, p. 531-537.
- Breukers A., Mourits M., Van der Werf W.V.D., Oude Lansink A. (2008). Costs and benefits of controlling quarantine diseases: A bio-economic modeling approach. *Agricultural Economics*, vol. 38, n° 2, p. 137-149.
- Carrasco L.R. (2009). *Modelling for Pest Risk Analysis: Spread and Economic Impacts*. Centre for Environmental Policy. PhD Thesis. Imperial College London.
- CE (2000). *Directive 2000/29/CE du Conseil du 8 mai 2000 concernant les mesures de protection contre l'introduction dans la Communauté d'organismes nuisibles aux végétaux ou aux produits végétaux et contre leur propagation à l'intérieur de la Communauté*.
- CE (2006a). *Décision communautaire 2006/564/CE du 11 août 2006 modifiant la décision 2003/766/CE sur les mesures d'urgence destinées à prévenir le développement de Diabrotica dans la communauté européenne*.
- CE (2006b). *Recommandation communautaire 2006/565/CE du 11 août 2006 sur les programmes de confinement destinés à limiter une nouvelle progression de Diabrotica dans les zones de la communauté où sa présence est confirmée*.
- CGP (2005). *Révision du taux d'actualisation des investissements publics. Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel*

- Lebègue. Commissariat Général du Plan, Paris.
- Choi J.-S., Sumner D.A., Webster R.K., Greer C.A. (2003). Economic Consequences of a New Exotic Pest: The Introduction of Rice Blast Disease in California. In Sumner D.A. (Ed.), *Exotic Pests and Diseases. Biology and Economics for Biosecurity*. Ames, Iowa State Press, p. 215-224.
- Ciosi M., Miller N.J., Toepfer S., Estoup A., Guillemaud T. (2011). Stratified dispersal and increasing genetic variation during the invasion of Central Europe by the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera*. *Evolutionary Applications*, vol. 4, n° 1, p. 54-70.
- DEFRA (2005). *UK Non-native organism risk assessment scheme*. User manual. Report: DEFRA.
- Delos M. (2010). *Intérêt comparé des substances actives pour le contrôle des larves de Diabrotica virgifera, autres options de lutte*. Communication personnelle (23/07/2010). Direction générale de l'alimentation, Sous-Direction de la qualité et de la Protection des Végétaux.
- Dillen K., Mitchell P.D., Tollens E. (2009). On the competitiveness of *Diabrotica virgifera virgifera* damage abatement strategies in Hungary: a bio-economic approach. *Journal of Applied Entomology*, vol. 134, n° 5, p. 395-408.
- ESRI (1995). *ARC Macro Language*. ESRI Press, 828 p.
- FAO (2004). *Analyse du risque phytosanitaire pour les organismes de quarantaine, incluant l'analyse des risques pour l'environnement et des organismes vivants modifiés*. Norme internationale pour les mesures phytosanitaires n° 11. Rome, FAO, Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux.
- FAO (2007). *Glossaire des termes phytosanitaires*. Norme internationale pour les mesures phytosanitaires n° 5. Rome, Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux.
- Governatori G. (2013). *Western Corn Rootworm in Italy: 15 years later the first finding*. Colloque Produire avec la chrysomèle du maïs, 20 ans après son arrivée en Europe, 28 novembre 2013, Strasbourg.
- Gray M.E., Sappington T.W., Miller N.J., Moeser J., Bohn M.O. (2009). Adaptation and Invasiveness of Western Corn Rootworm: Intensifying Research on a Worsening Pest. *Annual Review of Entomology*, vol. 54, p. 303-321.
- Heikkilä J., Peltola J. (2007). Phytosanitary measures under uncertainty. A cost-benefit analysis of the Colorado potato beetle in Finland. In Oude Lansink A. (Ed.), *New Approaches to the Economics of Plant Health*. Dordrecht, Springer, p. 131-144.
- Hemerik L., Busstra C., Mols P. (2004). Predicting the temperature-dependent natural population expansion of the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 111, n° 1, p. 59-69.
- Hoddle M.S., Jetter K.M., Morse J.G. (2003). The economic impact of Scirtothrips perseae Nakahara (Thysanoptera: Thripidae) on California avocado production. *Crop Protection*, vol. 22, n° 3, p. 485-493.
- Holmes T.P., Liebhold A.M., Kovacs K.F., von Holle B. (2010). A spatial-dynamic value transfer model of economic losses from a biological invasion. *Ecological Economics*, vol. 70, n° 1, p. 86-95.
- Jetter K.M., Civerolo E.L., Sumner D.A. (2003). Ex-Ante Economics of Exotic Disease Policy: Citrus Canker in California. In Sumner D.A. (Ed.), *Exotic Pests and Diseases. Biology and Economics for Biosecurity*. Ames, Iowa State Press, p. 121-149.
- Kiss J., Komaromi J.P., Bayar K., Edwards C.R., Hatala-Zseller I. (2005). Western Corn Rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte) and the Crop Rotation Systems in Europe. Western Corn Rootworm Ecology and management. In Vidal S., Kuhlmann U., Edwards C.R. (Eds.), *Western Corn Rootworm. Ecology and Management*. Wallingford, CABI Publishing, p. 189-220.
- Levine E., Oloumi-Sadeghi H., Ellis C.R. (1992). Thermal requirements, hatching patterns, and prolonged diapause in western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae)

- eggs. *Journal of Economic Entomology*, vol. 85, p. 2425-2432.
- MAP (2000). *Arrêté modifié du 31/07/2000 établissant la liste des organismes nuisibles aux végétaux, produits végétaux et autres objets soumis à des mesures de lutte obligatoire*.
- MAP (2008). *Arrêté modifié du 28 juillet 2008 relatif à la lutte contre Diabrotica*.
- MAP (2011). *Plan de contrôle Diabrotica virgifera virgifera LeConte en culture de maïs – Campagne 2011*. Note de service DGAL/SDQPV/N2011-8136 du 20 juin 2011.
- Macleod A., Head J., Gaunt A. (2004). An assessment of the potential economic impact of Thrips palmi on horticulture in England and the significance of a successful eradication campaign. *Crop Protection*, vol. 23, n° 7, p. 601-610.
- Macleod A., Baker R., Cannon R. (2005). Costs and benefits of European Community (EC) measures against an invasive alien species - current and future impacts of Diabrotica virgifera virgifera in England & Wales. In Alford D.V., Backhaus G.F. (Eds.), *Plant protection and plant health in Europe: introduction and spread of invasive species*. Wallingford, CABI Publishing, p. 167-172.
- Meinke L.J., Sappington T.W., Onstad D.W., Guillemaud T., Miller N.J., Komáromi J., Levay N., Furlan L., Kiss J., Toth F. (2009). Western corn rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte) population dynamics. *Agricultural and Forest Entomology*, vol. 11, p. 29-46.
- Mumford J.D., Temple M.L., Quinlan M.M., Gladders P., Blood-Smyth J.A., Mourato S.M., Makuch Z., Crabb R.J. (2000). *Economic Evaluation of MAFF's Plant Health Programme. Report to the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food*. London, ADAS Consulting Ltd & Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- OEPP (2009). *Schéma d'aide à la décision pour l'Analyse du Risque Phytosanitaire pour les organismes de quarantaine*. Norme PM 5/3(4). Paris, Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes.
- Oude Lansink A.G.J.M. (2011). Public and private roles in plant health management. *Food Policy*, vol. 36, n° 2, p. 166-170.
- Pearce D.W., Atkinson G., Mourato S. (2006). *Analyse coûts-bénéfices et environnement. Développements récents*. Paris, Éditions OCDE.
- Reynaud P. (2010). *Avis portant sur l'évaluation de différents scénarii de confinement de Diabrotica virgifera LeConte*. Expertise demandée le 25 août 2010 (LDL BSSV/2010_08-019) par la SDQPV. Angers, Laboratoire national de la protection des végétaux.
- Robinet C., Kehlenbeck H., Kriticos D.J., Baker R.H.A., Battisti A., Brunel S., Dupin M., Eyre D., Faccoli M., Ilieva Z., Kenis M., Knight J., Reynaud P., Yart A., Van der Werf W. (2012). A Suite of Models to Support the Quantitative Assessment of Spread in Pest Risk Analysis. *PLoS ONE*, vol. 7, n° 10, e43366.
- Rousset S., Zervo B., Mahé T. (2012). *Analyse socio-économique des politiques phytosanitaires : enjeux et applications*. Centre d'Études et de Prospective. Analyse n° 45, p. 1-4.
- Soliman T.A.A., Mourits M.C.M., Oude Lansink A.G.J.M., Van der Werf W. (2010). Economic impact assessment in pest risk analysis. *Crop Protection*, vol. 29, p. 517-524.
- Soliman T.A.A., Hengeveld G., Robinet C., Mourits M.C.M., Van der Werf W., Oude Lansink A.G.J.M. (2011). *A Risk Assessment Model on Pine Wood Nematode in the EU*. XIIIth Congress of the European Association of Agricultural Economists, August 30 to Sept. 2, 2011, Zurich, Switzerland, ETH Zurich.
- Thibord J.-B. (2013). *Évaluation du potentiel de nuisibilité de la chrysomèle du maïs en France*. Colloque Produire avec la chrysomèle du maïs, 20 ans après son arrivée en Europe, 28 novembre 2013, Strasbourg.
- Thomas A., Gozlan E. (2006). La stratégie d'évaluation des politiques de lutte contre les espèces envahissantes : inconvénients et difficultés de l'analyse coûts/bénéfices, méthodes alternatives de critères de décision. In Beauvais M.-L., Coléno A. (Eds),

Les espèces envahissantes dans l'archipel néo-calédonien. Un risque environnemental et économique majeur. Paris, IRD Éditions, Collection Expertise Collégiale.

Toepfer S., Kuhlmann U. (2006). Constructing life-tables for the invasive maize pest *Diabrotica virgifera virgifera* (Col. ; Chrysomelidae) in Europe. *Journal of Applied Entomology*, vol. 130, n° 4, p. 193-205.

Van Nieuwenhuysse L. (2009). *Analysis of the economic, social and environmental impacts of options for the longterm EU strategy against Diabrotica virgifera (Western*

Corn Rootworm), a regulated harmful organism of maize, to support the drafting of the Commission Impact Assessment. Final report for European Commission, DG SANCO. Brussels, Food Chain Evaluation Consortium, Civic Consulting, Van Dijk MC, Arcadia International, Agra CEAS, 170 p.

Wesseler J., Fall E.H. (2010). Potential damage costs of *Diabrotica virgifera virgifera* infestation in Europe; the 'no control' scenario. *Journal of Applied Entomology*, vol. 134, n° 5, p. 385-394.

ANNEXE

Tableau A1. Paramètres et sources des données

Variables	Définition	Unité	Source
V_{ij}	Vitesse de dispersion des populations	(km/an)	
V_{max}	Vitesse maximale de dispersion	(km/an)	(1)
K_i	Correction pour la densité en maïs	(0 - 1)	
ω_j	Efficacité de la réglementation	(1 - +∞)	(1)
SM_i	Superficie totale en maïs	(ha/canton)	(2)
SAU_i	Superficie agricole utile	(ha/canton)	(2)
CO_{ij}	Coût de la lutte obligatoire	(€/ha)	
CL_{ij}	Coût de la lutte volontaire	(€/ha)	
CS_{is}	Coût de la stratégie de lutte	(€/ha)	
θ_{is}	Dégât résiduel aux cultures	(%)	
α_s	Proportion de maïs en rotation	(%)	
β_s	Proportion de maïs avec traitement larvicide	(%)	
MM_i	Marge brute du maïs grain	(€/ha)	(3)
MC_i	Marge brute de la culture de substitution	(€/ha)	(3)
Y_i	Rendement du maïs grain	(q/ha)	(4)
PM	Prix du maïs grain	(€/q)	(5)
PT	Coût du traitement larvicide	(€/ha)	(4)
CH_{ijt}	Coût à l'hectare	(€/ha)	
A_{ijt}	Aire concernée par la lutte	(ha/canton)	
a_t	Taux d'actualisation	(%)	(6)
SC_j	Somme actualisée des coûts aux producteurs	(€ 2010)	

Sources : (1) Laboratoire de la santé des végétaux. (2) Ministère de l'Agriculture-SSP, recensement agricole 2000. (3) Chambres d'agriculture, analyses de groupe transmises par CA01, CA17, CA31, CA32, CA40, CA64, CA71, CA72, CRA Midi-Pyrénées, CRA Normandie, CRA Rhône-Alpes. (4) Arvalis-Institut du Végétal, segmentation maïs grain. (5) FranceAgriMer, enquête auprès des collecteurs de céréales (2005-2009). (6) CGP (2005).