

VERS UNE MEILLEURE MODELISATION DES EMISSIONS ET IMPACTS DES PESTICIDES AGRICOLES DANS LES CONDITIONS TROPICALES AFIN D'AMELIORER LES BASES SCIENTIFIQUES DE L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES SYSTEMES AGROALIMENTAIRES TROPICAUX

ADVANCING EMISSION AND IMPACT MODELING FOR AGRICULTURAL PESTICIDES UNDER TROPICAL CONDITIONS, TO IMPROVE SCIENTIFIC FOUNDATION OF THE ENVIRONMENTAL EVALUATION OF TROPICAL AGRI-FOOD SYSTEMS

Thèse de Céline **GENTIL-SERAGENT**¹

Analysée par René **SEUX**²

Directeurs de thèse : Claudine **BASSET-MENS**, Chargée de recherche CIRAD, et Peter **FANTKE**, Associate Professor, Danish Technical University (Danemark)

Si les produits phytosanitaires utilisés par l'agriculture ont pour objectif premier de protéger les productions de leurs agresseurs et d'assurer la sécurité des produits alimentaires, ils posent de sérieuses difficultés pour limiter leurs actions aux cibles initiales (céréales, fruits et légumes, *etc...*). La contamination des différents compartiments de l'environnement et des denrées alimentaires par leurs résidus est une réalité qu'il convient de bien cerner et de prévenir le mieux possible, dès la délivrance des autorisations de mise sur le marché de ces substances toxiques par nature.

Dans ce contexte, Céline GENTIL-SERAGENT propose des outils et des méthodes pour évaluer les impacts des pesticides dans l'analyse du cycle de vie des produits agricoles en régions tropicales.

Dans ces régions d'Amérique latine, d'Afrique sub-saharienne et d'Asie du Sud-Est, les fermes sont des exploitations familiales (de moins de 5 ha) qui assurent 70 % des apports caloriques de ces territoires. Pour combattre les ravageurs, maladies et adventices, une grande diversité de substances phytosanitaires est utilisée, parfois à haute intensité (en moyenne 5 kg de substances actives sont appliqués par hectare cultivé et par an en Amérique Latine), souvent sans protection pour l'utilisateur qui les applique. Les pesticides utilisés, parfois interdits depuis longtemps en Union Européenne à cause de leur toxicité, sont responsables d'exposition de l'homme et de contamination de

¹Thèse pour obtenir le grade de docteur de Montpellier Supagro, en Sciences Agronomiques, École doctorale GAIA portée par l'Unité de recherche HortSys du CIRAD, présentée et soutenue le 14 décembre 2020

² Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 5 « Interactions milieux-êtres vivants »

ANALYSE DE THÈSE

l'environnement. Les Antilles offrent un exemple de ce type de contamination de l'environnement et de la chaîne alimentaire avec la chlordécone, insecticide appliqué auparavant dans les bananeraies.

Ici, le terme "pesticide" désigne la substance active qui compose un produit commercial et le terme "région, ou condition, tropicale" a été défini selon la classification des climats de Koppen-Geiger, comme ayant des températures moyennes mensuelles supérieures à 18°C, pas de saison hivernale et de fortes précipitations annuelles.

Pour évaluer des systèmes de production alimentaire à la fois performants et respectueux de l'environnement et de la santé humaine, la méthode normalisée par l'ISO de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), est largement utilisée. L'ACV est une méthode d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux, comme le changement climatique, l'eutrophisation, la toxicité humaine, *etc.*, associés à une fonction donnée, par exemple la production d'1 kg de céréales. Tout au long de la vie d'un produit, les flux entrants et sortants sont recensés et quantifiés. C'est une des méthodes de référence pour évaluer les impacts environnementaux des produits alimentaires ou des productions agricoles. Mais un des principaux défis, pour les productions agricoles, reste la comptabilisation correcte des émissions et des impacts des pesticides utilisés.

Pour estimer les émissions et les impacts des pesticides en ACV, Céline GENTIL-SERGENT a sélectionné des outils et des modèles existants : PestLCI Consensus, dynamiCROP et USEtox, qui sont scientifiquement les plus avancés et répondent aux critères du cadre conceptuel de l'ACV.

Dans la phase d'inventaire, le modèle consensuel d'estimation des émissions de pesticides vers l'environnement, est le modèle **PestLCI Consensus**. Il permet d'évaluer les fractions de pesticides émises vers l'air, le sol de la parcelle, la culture, les eaux souterraines et les surfaces hors champ. Ce modèle permet d'estimer les fractions de pesticides émises quelques minutes après l'application. Il s'agit de la distribution initiale ou primaire. Ensuite, d'autres processus peuvent être étudiés, par défaut jusqu'à 1 jour après l'application, comme la volatilisation, la dégradation dans l'air des substances appliquées produisant des fractions d'émissions dites secondaires. Ces deux distributions se succèdent.

Ces émissions sont ensuite converties en impacts, à l'aide du modèle **USEtox**, issu d'un consensus scientifique international. Ce modèle global et générique permet d'évaluer les effets toxiques et écotoxiques des émissions de substances chimiques, dont les pesticides, vers l'environnement. Enfin, un troisième modèle, appelé **dynamiciCROP**, qui est à l'interface entre la phase d'inventaire et la phase d'évaluation des impacts, permet d'estimer le prélèvement par la plante.

Ces modèles ont tous été développés en Europe pour des conditions de production agricole sous climat dit tempéré. Ils constituent pour ce travail une base conceptuelle intéressante, qui est revue et adaptée pour évaluer des productions agricoles en conditions tropicales.

Pour définir les questions de recherches et les objectifs spécifiques de la thèse, une revue bibliographique a été réalisée sur les caractéristiques et les processus déterminant les émissions de pesticides en conditions tropicales. La phase d'inventaire étant centrale, les équations du modèle PestLCI ont été étudiées en détail. Pour le modèle dynamiciCROP et

USEtox, seules les données d'entrées et de sorties du modèle ont été évaluées. Par ailleurs, l'étude du modèle PestLCI a mis en lumière des pistes pour améliorer les ACV de produits agricoles tropicaux, en ajoutant les caractéristiques de cultures tropicales et en incluant des courbes de dérives spécifiques au couple culture – méthode d'application. La modélisation des flux d'eau a montré de nombreuses limites au regard des conditions tropicales avec, notamment, des domaines de validité limitée aux conditions tempérées. Enfin, concernant l'évaluation des impacts avec USEtox, deux compartiments environnementaux sont manquants : les eaux souterraines et la plante elle-même. Parmi ces grands enjeux pour prendre en compte les conditions tropicales dans l'estimation des émissions et impacts des pesticides, le travail de thèse s'est concentré sur la phase d'inventaire, c'est-à-dire sur l'estimation des émissions de pesticides vers l'environnement et sur le couplage cohérent des modèles entre eux afin de prendre en compte l'exposition due à l'ingestion de résidus.

Cette revue bibliographique a fait l'objet d'une publication dans la revue *The International Journal of Life Cycle Assessment* (<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01685-9>).

Ce travail bibliographique a permis de définir les questions de recherches et les objectifs de la thèse :

(1) Quels paramètres de l'inventaire sont à l'origine de la variabilité des résultats de fractions d'émissions et de score d'impacts des pesticides ?

Pour répondre à cette question, une analyse de sensibilité du modèle PestLCI a été réalisée.

(2) Est-il possible d'évaluer de manière cohérente les émissions et les impacts (éco-)toxiques des applications de pesticides dans des conditions tropicales dans le cadre de l'ACV, en tenant compte des résidus de pesticides dans les cultures consommées ?

Dans cette partie, une combinaison cohérente des modèles d'émission et d'impact pour caractériser les pesticides dans l'ACV a été proposée en incluant l'exposition aux résidus de pesticides dans les cultures.

(3) Comment quantifier les fractions initiales d'émission de pesticides pour les cultures cultivées dans des conditions tropicales ?

(4) Comment prendre en compte les pratiques agroécologiques dans la modélisation des émissions de pesticides ?

Pour cela, la modélisation de la couverture du sol dans le modèle d'émission des pesticides a été proposée.

Un couplage des modèles entre eux, illustré avec un cas d'étude sur la production plein champ de tomate en Martinique, dans les Antilles Françaises a été réalisé.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Journal of Cleaner Production* (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124099>).

L'ACV de la tomate plein champ de Martinique a été réalisée du berceau à la porte de la ferme, en incluant les impacts liés aux résidus de pesticides présents dans la tomate consommée. Des enquêtes ont été réalisées dans six fermes de Martinique. L'unité fonctionnelle de l'étude est le kg de tomates fraîches récoltées. Deux catégories d'impacts ont particulièrement été étudiées, la toxicité humaine et l'écotoxicité en eau douce. Par ailleurs, les modèles PestLCI et dynamiCROP ont été paramétrés aux conditions locales, en considérant les conditions spécifiques du sol et du climat de chaque exploitation agricole.

Comment les modèles ont-ils été connectés entre eux ?

Les émissions vers l'air de PestLCI ont été affecté au compartiment air rural de USEtox, celle à la surface du sol de la parcelle au compartiment sol agricole, et les émissions hors champs ont été réparties dans trois compartiments de USEtox : sol agricole, sol naturel, et compartiment eau douce, selon l'occupation moyenne du sol du lieu d'étude. Enfin, faute de compartiment eaux souterraines, ces émissions ont été affectées au compartiment eau douce de USEtox. La nouveauté de ce couplage réside dans l'utilisation des fractions de distributions initiales des pesticides issues de PestLCI dans le modèle dynamiCROP, au lieu d'utiliser des fractions d'émissions par défaut. Ainsi, les émissions vers l'air sont affectées au compartiment air de dynamiCROP, les émissions vers la surface du sol de la parcelle vers le compartiment sol de dynamiCROP et enfin les émissions sur la surface des feuilles de la culture sont réparties vers le compartiment surface des feuilles et des fruits du modèle dynamiCROP, selon l'indice de surface foliaire et l'indice de surface en fruit.

Un calcul de score d'impact a été utilisé pour évaluer la toxicité ou l'écotoxicité d'une substance (somme des produits de la masse émise d'un pesticide vers un compartiment environnemental avec un facteur de caractérisation de cet impact). Dans dynamiCROP, le facteur de caractérisation est calculé en multipliant trois facteurs : la fraction de pesticide dans la partie récoltée en fonction de la masse de pesticides émis dans un compartiment donné et ce au cours du temps (hF), multiplié par le facteur de transformation des aliments (XF), par exemple le lavage à l'eau, et enfin par le facteur d'effet par pesticide (EF). La fraction hF a été adaptée aux fractions de distribution de PestLCI (hF est la somme des résidus de pesticide dans le produit récolté au cours du temps, divisé par la masse émise de pesticide pour un compartiment donné).

Au lieu d'utiliser des émissions par défaut, les masses de pesticides émises par compartiment sont transférées entre les différents compartiments de la plante, grâce à une matrice permettant l'estimation des prélèvements de pesticides par les différentes parties de la plante. Ainsi, la distribution initiale est répartie en quatre fractions d'émissions, qui sont ensuite attribuées à chaque compartiment correspondant, avec une répartition entre les fruits et les feuilles pour les émissions vers la culture.

Pour illustrer cette procédure, sur un pied de tomates mûres, la fraction émise vers les feuilles contribue à environ 8 % des résidus présents dans le produit récolté, et les émissions vers la surface du fruit pour près de 90 % des résidus présents dans la tomate consommée.

Les résultats montrent que la toxicité humaine provient principalement des résidus de pesticides dans la tomate, issus des émissions vers la tomate elle-même, mais aussi vers le sol de la parcelle. Les émissions vers l'eau douce et le sol naturel ont peu d'impact sur la toxicité humaine, alors que les émissions vers l'air ont un impact intermédiaire.

Ces travaux sont novateurs en ACV pour deux raisons :

(1) C'est la première fois que les résidus de pesticides de la culture sont reliés de manière cohérente avec les émissions de pesticides lors de l'application,

(2) Le modèle PestLCI, dans sa dernière version Consensus, a été testé pour la première fois en conditions tropicales. Cela a permis d'adapter quelques processus, comme le calcul de la capacité au champ et d'identifier des pistes d'améliorations du modèle en conditions tropicales.

Mais le couplage cohérent entre les fractions de la distribution secondaire de PestLCI avec dynamiCROP et USEtox nécessite des recherches complémentaires.

Détermination des fractions d'émission des pesticides pour les conditions tropicales

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Chemosphere* (<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130014>).

Une analyse de la littérature a été réalisée pour obtenir des courbes de dérives répondant à un certain nombre de critères définis pour des applications de pesticides en conditions tropicales et en plein champ, répondant également aux normes de l'ISO.

Huit études ont pu être sélectionnées avec mise en œuvre d'un pulvérisateur à rampe sur le haricot et le soja au Brésil, d'un applicateur à dos et un applicateur bas volume sur du coton au Bénin, d'application aérienne (avion) sur du soja, sorgho, millet, maïs et coton au Brésil et enfin avec un pulvérisateur à jet d'air sur du café au Brésil et sur de la papaye au Mexique.

Les quatre configurations identifiées sont :

(1) application au-dessus de la canopée, réalisée par les traitements aériens ou avec un pulvérisateur à rampe par exemple, la fraction pouvant être interceptée par la culture est égale à la fraction du champ couverte par les feuilles de culture définies à partir de l'indice de surface foliaire de la culture ;

(2) application sous la canopée, ne visant pas la culture, et généralement réalisée avec un applicateur manuel, moins de 5 % des émissions peuvent être interceptées par la culture ; ce qui correspond à la fraction émise par dérive aérienne pour les méthodes d'applications manuelles ;

(3) application au sol, aucun pesticide n'est émis vers la culture, il s'agit d'application de granulés ou des poudres ;

(4) application dite « plante-par-plante », il s'agit d'une application ciblée réalisée avec une méthode d'application manuelle, la fraction pouvant être interceptée par la culture est donc proche de 1.

A partir de cette documentation, un ensemble de fraction d'interception foliaire pour une large gamme de culture tropicale a été produit, pour trois stades de croissance et de développement de la culture : l'installation, le développement et la phase de reproduction – maturation, en fonction de l'indice de surface foliaire et de la technique d'application.

Ces fractions estimées pour un ensemble de scénarios d'application en conditions tropicales peuvent être utiles pour les utilisateurs d'ACV ayant peu d'informations sur les pratiques phytosanitaires réalisées dans leurs études.

Introduction de la gestion de la couverture du sol dans la modélisation des émissions de pesticides

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Integrated Environmental Assessment and Management* (<https://doi.org/10.1002/ieam.4482>).

Dans cette dernière partie, une approche pour prendre en compte la couverture du sol dans la modélisation des émissions de pesticides, en allant jusqu'à l'évaluation des impacts d'écotoxicité eau douce, est proposée.

Deux scénarios ont été examinés : un scénario de production plein champ de tomates en Martinique et un scénario de production viticole en région de Loire en France. Dans chaque scénario, deux types de couvert ont été utilisés : un couvert spontané composé de graminées et un couvert planté composé de légumineuses. Ensuite, deux stades de

développement de la culture principale (tomate et de vigne) ont été étudiés : à l'installation de la culture et lors de la phase de floraison - maturation. Deux pesticides homologués sur la tomate et la vigne ont été testés : le mancozèbe (fongicide) et le pyriproxifène (insecticide). La distribution secondaire a été fixée par défaut à un jour.

Les résultats d'émissions ont montré que, de manière logique, plus la fraction effective de couvert est élevée, plus la fraction émise vers le sol de la parcelle est faible. Les fractions d'émissions vers le sol agricole sont réduites d'un facteur trois en moyenne avec la présence d'un couvert.

Les principales contributions de la thèse sont :

- Un état des lieux et une meilleure compréhension des enjeux liés à la quantification des émissions et impacts des pesticides pour les ACV des produits agricoles.

- Une nouvelle pratique agricole a été introduite dans le modèle d'émission PestLCI, il s'agit de la gestion de la couverture du sol, rarement nu en conditions tropicales, qui va influencer les émissions et les impacts des pesticides.

- La contribution majeure de cette thèse réside dans le couplage des modèles d'émissions et d'impacts des pesticides, en particulier la connexion cohérente entre la distribution initiale du modèle PestLCI et du modèle dynamicroP, permettant de prendre en compte l'impact lié aux résidus de pesticides présents dans les produits récoltés et consommés. Toutefois, ces modélisations ne couvrent pas l'ensemble des processus de diffusion et d'évolution des produits phytosanitaires dans les différents compartiments de l'environnement et cela est tout particulièrement vrai pour les eaux souterraines.

Compte tenu des contributions apportées, de l'originalité et de la portée des travaux de cette thèse, corroborés par les appréciations élogieuses du jury sur le manuscrit, la présentation et la soutenance, elle mérite d'être retenue et justifie que son analyse figure sur le site de l'Académie à titre de valorisation de ces travaux.