

---

## CARACTÉRISATION DU DEVENIR DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES DANS LES SOLS VOLCANIQUES ANTILLAIS : APPLICATION À L'ÉVALUATION DU RISQUE DE CONTAMINATION DES EAUX

Thèse de Pauline **CAMPAN**<sup>1</sup>

Analysée par René **SEUX**<sup>2</sup> et Daniel **TESSIER**<sup>3</sup>

Directeur de thèse : Marc **VOLTZ**, Directeur de Recherche, UMR LISAH, INRAE Montpellier  
Co-encadrement : Anaïja **SAMOUELIAN**, chargé de recherche et David **CREVOISIER**, Ingénieur de recherche, UMR LISAH, INRAE Montpellier

Les Départements et Régions d'Outre-Mer, et plus particulièrement les Antilles françaises, sont aujourd'hui grandement touchés par la pollution des eaux de surface et souterraines par l'usage agricole des produits phytosanitaires. Les sols développés sur des matériaux volcaniques, en régions tropicales, apparaissent des situations à risque du fait de cultures intensives (banane et canne à sucre), et de conditions du milieu (pluviométrie en particulier) favorisant la dispersion des produits phytosanitaires après épandage.

L'évaluation des risques de contamination des eaux par les produits phytosanitaires aux Antilles, comme probablement d'autres territoires ultramarins comme l'Île de la Réunion, se distingue fortement des sols métropolitains car ils se sont développés sur des matériaux volcaniques. Ces sols sont en général, et dans une première phase de leur développement, très perméables, et ce, dans un contexte de forte pluviométrie. Ils sont plus ou moins récents et leur évolution conduit à des cortèges minéralogiques particuliers, corrélativement avec des teneurs en matières organiques variables. Il en résulte des propriétés de sorption et de dégradation des produits phytosanitaires particulières et encore mal connues.

De ce fait, les procédures d'évaluation du risque en cours aux plans européen et national qui se basent sur des démarches calibrées exclusivement sur des situations agropédoclimatiques d'Europe continentale, sont très différentes de celles présentes aux Antilles. Il était donc tout à fait important et pertinent d'obtenir des connaissances sur les processus de dégradation et de rétention des pesticides dans ce type de sol et d'évaluer les risques de contamination des eaux.

Le travail a porté sur l'acquisition de connaissances sur les processus de dégradation et de rétention des pesticides dans les sols volcaniques tropicaux, et sur l'évaluation d'un outil d'estimation des risques de contamination des eaux, TROPHY, développé par le laboratoire d'accueil, l'UMR LISAH de Montpellier, afin de prendre en compte les mécanismes de transfert d'eaux et de solutés en situations agropédoclimatiques typiques du milieu antillais.

---

<sup>1</sup> Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Institut agro Montpellier et de l'Université de Montpellier, en Sciences de l'Eau, École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Eau, portée par l'UMR LISAH, soutenue le 29 novembre 2022

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

<sup>3</sup> Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 5 « Interactions milieux-êtres vivants »

Pour répondre à ces objectifs, des expérimentations ont été menées au laboratoire sur la climatoséquence de sols plus ou moins évolués en fonction de leur caractéristiques pédologiques (andosol/nitisol/ferralsol). Des données issues de la littérature et d'études de flux de pesticides, menées dans des travaux antérieurs sur les sites d'étude, ont aussi été mobilisées.

Le mémoire comporte quatre chapitres, regroupés en trois parties, précédées d'une introduction générale présentant la problématique et les objectifs de la thèse.

La première partie - *Positionnement scientifique et contexte de l'étude* – nous présente un état de l'art sur les connaissances disponibles sur le devenir des pesticides dans les sols tropicaux en mettant en lumière le déficit de travaux par rapport au milieu tempéré. Ce chapitre rassemble des données spécifiques sur la distribution et la nature des sols (climato et toposéquence) et sur les suivis analytiques réalisés sur les transferts de pesticides dans les bassins versants en Guadeloupe (chapitre 1).

La seconde partie : *Estimation des propriétés physico-chimiques des molécules en contexte volcanique tropical*, est dédiée à :

- 1- l'estimation du paramètre utilisé en évaluation du risque pour prendre en considération la persistance - durée de demi-vie (DT50 en jours) - et la dépendance à la température des processus de mobilité et de dégradation (chapitre 2),
- 2- l'étude expérimentale en laboratoire des processus de sorption-désorption dans les sols volcaniques tropicaux (chapitre 3).

Enfin la troisième partie - *Evaluation du risque de contamination des eaux en contexte volcanique tropical* - (chapitre 4) est focalisée sur un travail de modélisation conduit avec l'outil TROPHY, développé au sein de l'UMR LISAH pour la simulation du risque de contamination des eaux souterraines et superficielles par les pesticides en milieu volcanique antillais.

Le chapitre 1 présente le milieu d'étude et souligne son caractère particulier avec la présence de cultures très consommatrices d'intrants (banane et canne à sucre) et responsables de processus hydriques particuliers avec des températures élevées et une forte pluviométrie, sous forme d'épisodes torrentiels. Les sols possèdent des propriétés spécifiques (teneur élevée en matières organiques, acidité, minéralogie induisant une charge électrique de surface variable en fonction du pH). Ils sont très filtrants avec la présence de macropores, responsables du transfert préférentiel vers les eaux souterraines. Ces sols sont considérés comme des zones à risque élevé de contamination des eaux superficielles et souterraines en engendrant un devenir bien particulier des produits phytosanitaires, notamment en termes de dégradation et de sorption.

Le développement d'un important dispositif de suivi expérimental à l'échelle de la parcelle et de la rivière en Guadeloupe a permis d'étudier une diversité de situations agropédoclimatiques caractéristiques du milieu volcanique tropical, en suivant sept matières actives actuellement utilisées en culture de banane et de canne à sucre, aux propriétés physico-chimiques contrastées dans trois compartiments environnementaux : sol, eaux superficielles et eaux souterraines.

Pour l'auteure, les données obtenues doivent permettre, d'une part, d'approfondir les connaissances sur le devenir *in situ* des substances phytosanitaires dans les sols volcaniques

tropicaux et, d'autre part, d'évaluer l'outil de modélisation TROPHY lors de son application aux compartiments environnementaux des Antilles.

Le chapitre 2 pose la question de la persistance dans les sols des matières actives en milieux tropicaux. Pauline CAMPAN discute du formalisme et des données utilisées dans les outils d'évaluation du risque, afin de corriger l'effet de la température sur la dégradation des produits phytosanitaires. Elle constate au terme de son expérimentation que les valeurs standards utilisés pour les sols européens ne sont pas valides sur toute la gamme des températures rencontrées, en particulier pour les températures supérieures à 20 °C. Au-dessus de ce seuil, elle montre que la valeur de 65,4 kJ.mol<sup>-1</sup> d'énergie d'activation utilisée dans l'équation d'Arrhénius, habituellement recommandée pour les sols des régions tempérées, doit être abaissée à la moyenne de 10,3 kJ.mol<sup>-1</sup>. Ce résultat souligne donc la nécessité d'adapter les pratiques de correction des vitesses de dégradation des produits phytosanitaires en tenant compte de la température lors de l'estimation du risque de contamination par modélisation en contexte tropical.

Les expérimentations parcellaires menées *in situ* ont permis de quantifier différents termes impliqués dans la dissipation des produits phytosanitaires. Le transfert des substances actives phytosanitaires vers les eaux et dans la colonne de sol par percolation et ruissellement est faible, ce qui conduit à accepter la dégradation comme le processus majoritaire de la dissipation au champ. Pour l'ensemble des sept matières actives étudiées, la dissipation moyenne parcellaire en contexte volcanique tropical est plus rapide, d'un à deux ordres de grandeur, qu'en conditions tempérées, résultant de l'impact combiné des caractéristiques agropédoclimatiques du milieu, notamment une température, une humidité et une teneur en carbone organique du sol plus importantes, favorisant l'activité microbienne et accélérant la dégradation des substances dans le sol. L'irradiation solaire plus intense et plus homogène à la surface du sol, accentue les réactions de photo dégradation. Ceci signifie que l'utilisation des DT50 standards du milieu tempéré lors de l'évaluation du risque de contamination maximise la persistance des stocks de produits phytosanitaires dans les sols volcaniques tropicaux, et par conséquent maximise artificiellement les risques de contamination des eaux et des sols. Elle conclut que l'étude de la persistance des produits phytosanitaires dans les sols volcaniques tropicaux implique d'adapter les outils européens d'évaluation du risque pour une utilisation en contexte volcanique tropical, à la fois en termes de DT50 utilisée comme variable d'entrée des modèles de transfert et de procédure de correction des effets de la température sur la dégradation des PP, basée sur la loi d'Arrhenius.

Mais ces considérations ne portent que sur les molécules initialement appliquées (matières actives) et pas du tout sur les métabolites résultant précisément de leur dégradation. Or, ce sont bien souvent ces métabolites (dont certains sont considérés pertinents sur le plan toxicologique) qui posent des problèmes pour l'utilisation en alimentation humaine des eaux souterraines, en particulier (comme ceux du S-métolachlore par exemple).

Le chapitre 3 consacré à la détermination au laboratoire des paramètres de sorption de quatre matières actives actuellement utilisées en agriculture antillaise, sur une séquence représentative des sols volcaniques tropicaux, montre que l'impact de la pédologie volcanique tropicale sur la sorption varie en fonction de la nature physico-chimique des pesticides testés. La sorption des acides faibles, 2,4-D et mésotrione, est particulièrement impactée par les évolutions de pH du sol et les teneurs en oxyhydroxydes métalliques. La sorption du zwitterion glyphosate est renforcée par la présence de cations divalents Ca<sup>2+</sup> sous l'effet du chaulage.

Les itinéraires techniques appliqués sur le terrain afin d'optimiser la production agricole peuvent donc impacter, parfois de façon considérable, la rétention des produits phytosanitaires

et par conséquent le transfert vers les compartiments aquatiques. L'adsorption de la difénoconazole, molécule neutre, est gouvernée par la teneur en carbone organique des sols. Le pH et la teneur en carbone organique des sols, seuls ou en combinaison, apparaissent donc des variables explicatives de la sorption. Tous ces résultats démontrent l'importance des charges électriques variables des constituants des sols en fonction du pH. En revanche, l'andosol montre un comportement atypique vis-à-vis de la sorption, notamment en raison de son cortège minéralogique particulier et de sa forte teneur en MO. La forte variabilité des propriétés pédologiques des sols tropicaux développés sur cendres volcaniques peut donc entraîner une variation non négligeable de la rétention des produits phytosanitaires, parfois à très courte échelle spatiale et pour une même classe de sol. Il est remarquable de voir que l'hystérèse de désorption d'un pesticide peut être prédite par le pH. L'auteure en déduit que la comparaison entre les contextes tropicaux et tempérés montre une rétention renforcée sur les sols volcaniques tropicaux pour trois des quatre matières actives étudiées, confirmant ainsi l'impact du cortège minéralogique et de la forte teneur en MO. Les données de référence, déterminées sur sols tempérés, semblent donc difficilement transposables aux conditions agropédoclimatiques volcaniques tropicales, notamment pour réaliser l'évaluation du risque de contamination des eaux. Pour les sols tempérés la présence de charges électriques permanentes des argiles, absentes dans les sols tropicaux issus des matériaux volcaniques, semble distinguer ces deux grands types distincts de comportements.

Le chapitre 4 (partie 3) du manuscrit de thèse se focalise sur l'évaluation du risque de contamination des eaux en évaluant, puis en améliorant l'outil TROPHY développé au sein de l'équipe d'encadrement, en faisant référence à la démarche FOCUS utilisé par l'UE pour l'évaluation du risque de contamination des eaux en Europe. Dans une première phase, les scénarios agropédoclimatiques sont décrits ainsi que les outils de modélisation des flux de surface et de percolation (outil TROPHY), puis le modèle est évalué en comparant les concentrations simulées aux concentrations mesurées lors des suivis parcellaires et en rivière. Dans un deuxième temps, le module de transfert parcellaire est amélioré pour certains paramètres et transfert de l'eau entre micro et macroporosité. Finalement, l'outil est utilisé pour évaluer les risques de contamination posés par chaque produit phytosanitaire étudié pour les eaux de surface et les eaux souterraines. Ce chapitre est détaillé et très complet, montrant un travail conséquent de simulations qui permettent de hiérarchiser l'importance des contextes agropédoclimatiques. En accord avec les données physico-chimiques des sols, l'Andosol se comporte différemment des deux autres types de sols, avec une inadéquation du modèle, surtout pour les eaux de percolation.

Le manuscrit se termine par une partie « Conclusion et perspectives » qui synthétise les principaux enseignements du travail sur les deux volets : compréhension des processus de dégradation et de rétention des pesticides dans les sols volcaniques tropicaux, et modélisation des transferts à l'aide du modèle TROPHY dans une perspective d'améliorer l'évaluation des risques de contamination des eaux.

Pauline Campan a fait preuve de grandes capacités pour relever le défi proposé par ce sujet de thèse vaste et ambitieux. Le travail est particulièrement conséquent, tant au plan expérimental que celui de la modélisation. On apprécie la prise de recul avec les limites identifiées. Elle a fait preuve de larges connaissances et d'une grande rigueur scientifique, qu'il s'agisse de la présentation de la démarche et de la maîtrise de l'utilisation des traitements statistiques pour exploiter les données expérimentales, comme dans la discussion des résultats, en particulier du travail de modélisation. Le résultat final est d'une qualité remarquable, ce qui justifie que cette analyse figure sur le site de l'Académie, à titre de valorisation de ces travaux.