



Pretag Initiative

Pesticide Reduction for Tropical Agricultures

CHAPITRE 1 : RENSEIGNER LES USAGES DE PESTICIDES DANS CINQ FILIERES TROPICALES ET EVALUER LES RISQUES LIES A CES USAGES

Référence à citer :

Le Bellec F., Le Bars M., Ouedraogo R., Lammoglia S.-K., Martin T., Babin R., Ten Hoopen M., Bertrand B., Villain L., Sester M., Linna N., Bureau-Point E., De Lapeyre L., Blouin A., Loeillet D., Côte F.X. 2025. Chapitre 1. Renseigner les usages de pesticides dans cinq filières tropicales et évaluer les risques liés à ces usages. In : Côte F.X., Le Bellec F., Martin T., Temple L., Blouin A., Loeillet D., Baufumé S., Ghneim-Herrera T. (eds.). Rapport final de l'initiative « Pesticide Reduction for Tropical Agricultures » (Pretag). Montpellier : CIRAD, p. 11-38. <https://doi.org/10.18167/agritrop/00829>.

Ce rapport a été élaboré dans le cadre du projet « Pesticide Reduction for Tropical Agriculture - Pretag ». Le projet a bénéficié d'un soutien financier de la Fondation Agropolis-One Science (Programme Investissements d'Avenir - ANR-10-LABX-001-01), de la Fondation FARM, et du Cirad.

COORDINATION ET CONTRIBUTEURS

Coordination :

Fabrice Le Bellec (fabrice.le_bellec@cirad.fr)

Contributeurs :

Indicateurs : Le Bellec Fabrice, Le Bars Marjorie, Ouedraogo Rahim, Lammoglia Sabine-Karen

Filière maraîchage : Martin Thibaud

Filière cacao : Babin Régis, ten Hoopen Martijn, Lammoglia Sabine-Karen

Filière café : Bertrand Benoit, Villain Luc

Filière riz : Sester Mathilde, Linna Ngang, Bureau-Point Eve

Filière banane : De Lapeyre Luc, Blouin Annaig, Loeillet Denis, Côte François

PRINCIPAUX OBJECTIFS

1. Connaître les usages des pesticides dans les 5 filières (banane, cacao, café, maraîchage et riz),
2. Identifier les substances actives les plus dangereuses pour la santé humaine et l'environnement,
3. Hiérarchiser les contraintes liées à l'usage des pesticides et identifier les substances à substituer.

RESUME

L'usage des pesticides s'est répandu de manière très importante avec le développement de l'agriculture intensive, tous les continents sont concernés. Selon la FAO, en 2022, près de 3.70 millions de tonnes de pesticide ont été utilisées par l'agriculture dans le monde contre moitié moins en 1990. Ces usages ne sont pas sans impacts sur l'environnement et sur la santé humaine. Par ailleurs, ces usages sont aussi nécessairement hétérogènes d'un pays à l'autre, d'une filière à l'autre. L'initiative Pretag vise à apporter des connaissances plus précises sur ces usages en réalisant un inventaire des pesticides utilisés dans cinq filières de production tropicales (banane, café, cacao, maraîchage et riz), à analyser leur utilisation et à évaluer les risques associés.

La mobilisation des résultats d'enquêtes menées dans de précédents projets ou dans certains cas de données spécialement acquises dans le cadre de Pretag dans des pays d'Amérique Latine, d'Afrique subsaharienne et du Sud Est Asiatique nous a permis d'inventorier l'utilisation de 300 produits phytopharmaceutiques lesquels sont constitués de 92 substances actives différentes. Sur la base de l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux de ces 92 substances réalisée à l'aide de cinq indicateurs (IRSA, BROWSE, ACV (Santé humaine et Environnement) et I-PHY), cette étude a permis d'identifier 39 d'entre elles comme préoccupantes. Nous avons affiné cette évaluation en confrontant les résultats de ces 5 indicateurs à ceux de 4 autres indicateurs de la base de données PPDB¹ (Human health, Ecotoxicity et Environmental fate) et le classement CMR². Au terme de cette analyse, cinq substances actives hautement préoccupantes ont été identifiées, trois insecticides : le chlorpyrifos, l'endosulfan et le terbufos ainsi que deux fongicides : le chlorothalonil et le cyproconazole. Toutes les filières étudiées sont concernées par au moins une de ces substances actives. Malgré les différences méthodologiques entre les indicateurs, on constate une convergence de classement selon la dangerosité d'un tiers des substances actives.

Différentes limites méthodologiques de cette étude sont discutées. Globalement, l'approche que nous proposons visant à combiner différents indicateurs pour évaluer les impacts sanitaires et environnementaux des pesticides permet de contrecarrer les limites de chaque indicateur pris isolément. Il est également important de considérer que la variable d'entrée des indicateurs est la substance active et ne considère pas la dangerosité des produits de dégradation de ces dernières souvent plus persistantes dans les milieux. Les indicateurs ne prennent pas en compte non plus les effets synergiques et/ou cumulatifs des substances actives ni même les effets de la formulation des pesticides et des co-formulants et/ou des adjuvants des produits commerciaux. Enfin, les scénarii d'usage choisis pour permettre les calculs de ces indicateurs se sont basés sur les conditions d'usage des bonnes pratiques phytosanitaires (applicateurs protégés, traitement au bon moment, à bonne distance d'un point d'eau...) ne reflétant très probablement pas la réalité et minimisant, de facto, les niveaux de risques que nous avons calculés.

Les suites possibles du WP1 sont ensuite abordées afin d'identifier : i) comment améliorer l'évaluation des usages des pesticides dans les filières de production tropicales pour en limiter les risques de transfert vers l'environnement, ii) comment limiter les risques pour la santé humaine en proposant notamment le développement d'un outil d'aide à la décision numérique pour permettre aux producteurs/applicateurs d'avoir accès eux-mêmes à la dangerosité des produits et iii) comment compléter l'approche par indicateurs par le déploiement d'outils d'échantillonnage à bas coûts de type EPI (échantillonneurs intégratifs passifs).

¹ <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>

² Substances Cancérogènes, Mutagènes et toxiques pour la Reproduction

SUMMARY

The expansion of intensive agriculture has been accompanied by widespread pesticide use, with global consumption reaching 3.7 million tons in 2022—double the amount recorded in 1990 (FAO). This trend spans all continents and presents considerable risks to both environmental and human health. However, pesticide use varies significantly across countries and agricultural systems. The PRETAG initiative aims to address these disparities by cataloging pesticide use in five tropical production sectors (banana, coffee, cocoa, vegetables, and rice), analyzing usage patterns, and evaluating the associated risks.

Data from prior projects, along with new information collected under PRETAG in countries across Latin America, sub-Saharan Africa, and Southeast Asia, revealed the use of 300 phytopharmaceutical products comprising 92 active substances. Using five indicators (IRSA, BROWSE, LCA for Human Health and Environment, and I-PHY), 39 substances were identified as concerning. Further refinement, incorporating additional criteria from the PPDB database³ (Human Health, Ecotoxicity, and Environmental Fate) and CMR classifications⁴, highlighted five highly hazardous substances: three insecticides (chlorpyrifos, endosulfan, and terbufos) and two fungicides (chlorothalonil and cyproconazole). All sectors studied were affected by at least one of these substances. Despite methodological differences between the indicators, rankings for approximately one-third of the substances were consistent in terms of hazard level.

The study also highlights several methodological limitations. While the proposed approach of combining multiple indicators to assess the health and environmental impacts of pesticides helps address the shortcomings of individual indicators, certain challenges remain. Notably, these indicators rely on active substances as input variables, failing to account for the toxicity of degradation products, which are often more persistent in the environment. Additionally, they do not consider the synergistic or cumulative effects of active substances, nor the impacts of pesticide formulations, co-formulants, or adjuvants in commercial products. Furthermore, the usage scenarios underlying these calculations assume optimal phytosanitary practices (e.g., use of protective equipment, precise application timing, and appropriate distance from water sources). These assumptions may not align with real-world practices, likely leading to an underestimation of the actual risk levels.

Finally, the next steps for WP1 are outlined, focusing on: i) improving the evaluation of pesticide use in tropical production sectors to reduce the risk of environmental transfer, ii) minimizing risks to human health by developing a digital decision-support tool to provide producers and applicators with direct access to product hazard information, and iii) complementing the indicator-based approach with the deployment of low-cost sampling tools such as passive integrative samplers (PIS).

³ <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>

⁴ Carcinogenic, Mutagenic, and Reproductive Toxic Substances

INTRODUCTION

L'usage des produits phytopharmaceutiques (nommés « pesticides » dans la suite du rapport) s'est répandu de manière très importante avec le développement de l'agriculture intensive, mais aussi dans le cadre de la lutte antivectorielle. Si tous les continents sont concernés, les dynamiques d'usage des pesticides sont très différentes d'une région à l'autre du monde. Selon la FAO⁵, les usages ont, entre les années 1990 et 2022, notablement augmentés en Amérique du Sud et Centrale, en Afrique et en Océanie (entre 40 et 120 %), et dans une moindre mesure en Asie, en Amérique du Nord et en Europe. En 2022, près de 3.70 millions de tonnes de pesticide ont été utilisées par l'agriculture dans le monde contre moitié moins en 1990. La pression d'usage de ces pesticides (kg par hectare) varie d'un continent à l'autre, l'Afrique a la plus faible pression (moins d'1kg/ha) – même si elle est en progression régulière depuis 10 ans (+68 %) - tandis qu'en Amérique les quantités ont quasiment triplé sur la période 1990-2022 dépassant les 5 kg/ha (rapport « Pesticides use and trade » 1990-2022 de la FAO³). Ces statistiques illustrent l'ampleur de l'usage des pesticides à travers le monde et dans les filières de production. Cependant, les situations d'usage sont nécessairement hétérogènes d'un pays à l'autre, d'une filière à l'autre. L'initiative Pretag vise à apporter des connaissances plus précises de ces usages. L'utilisation des pesticides dans les contextes tropicaux revêt certaines spécificités. Tout d'abord le développement de bioagresseurs y est important, principalement du fait de la richesse des interactions biotiques en milieu tropical, mais aussi de la présence de conditions climatiques favorables au développement des bioagresseurs toute l'année, conditions exacerbées par les effets du changement climatique. Par ailleurs, la législation sur les pesticides dans les Pays En Développement (PED) est généralement moins contraignante et favorise l'emploi de produits génériques peu chers permettant d'augmenter la productivité des exploitations agricoles à bas prix. Leur composition et leurs usages sont souvent mal connus, et font l'objet d'importants écarts vis-à-vis de la réglementation. Ce contexte aggrave les conséquences négatives des usages des pesticides dans les PED en termes de santé humaine (agriculteurs, riverains et consommateurs), de réduction de la biodiversité et d'apparition de résistances aux pesticides chez les bioagresseurs. Malgré la volonté des acteurs des filières alimentaires dans les PED de s'engager dans des transitions agroécologiques, le recours aux pesticides entraîne des pollutions des différents compartiments environnementaux (eaux de surface, eaux souterraines, air, sol) et menace la santé des populations et du monde animal sur le court et long terme. Face à ces enjeux, il est important de quantifier les risques de ces usages. Des indicateurs existent au niveau national, européen et international permettant d'évaluer ces risques mais les critères sont nombreux et souvent difficiles à utiliser dans les PED où les données sont quasi inexistantes ou peu structurées. Les objectifs du WP1 de l'initiative Pretag ont été d'établir les usages des pesticides dans les 5 filières (banane, cacao, café, maraîchage et riz), d'identifier à l'aide d'indicateurs les substances actives les plus dangereuses pour la santé humaine et l'environnement en tenant compte des caractéristiques des pesticides et de leurs recommandations d'utilisation, de hiérarchiser les contraintes liées à l'usage des pesticides et identifier les substances à substituer et de réunir ces informations dans une base de données.

⁵ <https://openknowledge.fao.org/items/262b96c8-eef0-4810-9c23-d8639a5dbf1b>

1. Développement d'une base de connaissances des usages des pesticides dans les filières

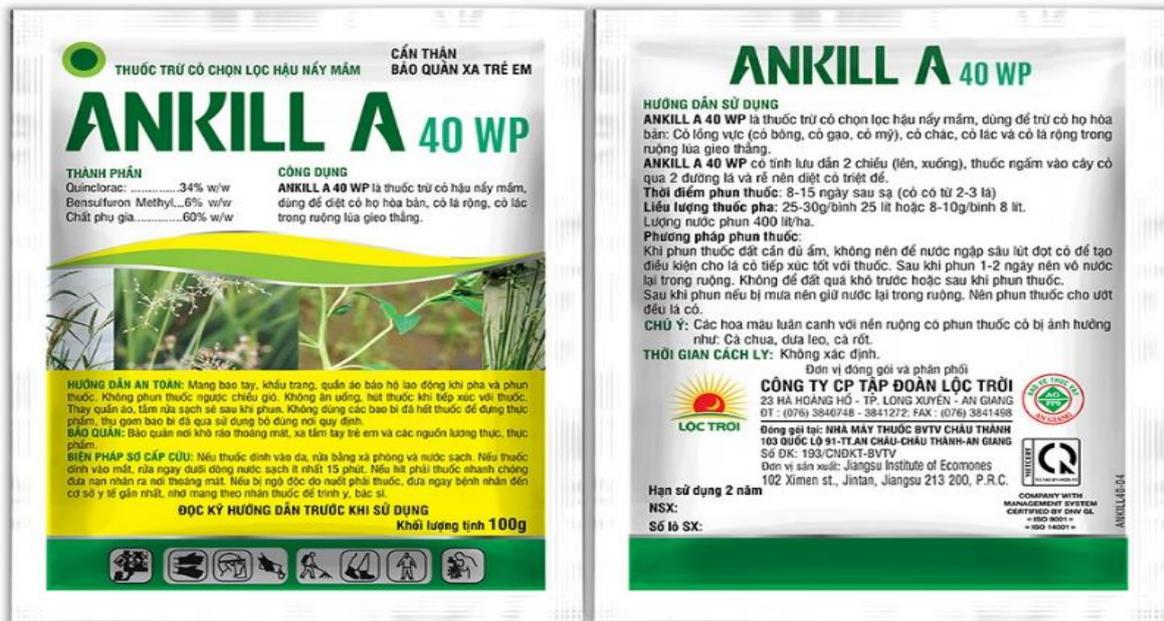
Une base de données des principaux usages des pesticides pour les 5 filières étudiées de 11 pays d'Afrique, d'Amérique Centrale et du Sud, de la Caraïbe et d'Asie du Sud Est a été élaborée. Le recueil de ces connaissances a été permis en mobilisant des données d'enquête auprès de producteurs de ces territoires et dans le cadre de projets ou de partenariats préexistants et de données spécifiquement acquises dans le cadre du projet dans le cas de la filière riz. Le **tableau 1** ci-dessous détaille l'origine de ces données d'usage des pesticides pour les 5 filières.

Tableau 1 : Origine des données sur l'usage des pesticides dans les 5 filières.

| Filière | Pays | Année | Nbre jeu de données | Nbre de producteurs | Type de collecte | Projet associé |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|--|--|
| Banane | Amérique Latine, Caraïbe, Afrique. | 2020-2024 | >15 | Confidentiel | Suivi annuel, cahier de suivi des traitements | Contrats privés |
| Cacao | Côte d'Ivoire | 2017-2023 | 3 | 354 | Enquêtes semi-directives | Cocoa4Future (UE) |
| Café | Brésil, Mexique, Nicaragua, Vietnam | 2020-2023 | 7 | 130 | Enquêtes semi-directives | ECOFFEE |
| Maraîchage | Côte d'Ivoire | 2018-2023 | 1 | 100 | Enquêtes semi-directives | MARIGO (UE) |
| Riz | Cambodge | 2019-2023 | 2 | 221 | Suivi annuel, tous les 15-30 j ou Enquêtes semi-directives | Wat-health (FSPI) Fond. de France PRETAG 23-24 |

Les données sont issues soit de l'analyse de cahiers de traitement des exploitations lorsqu'ils existent soit d'un relevé réalisé à partir des emballages vides, soit du discours des producteurs lors d'enquêtes semi-directives. Les données de base collectées se résument en général au nom du produit commercial utilisé, sa dose d'usage et sa fréquence d'utilisation. Selon les filières, la donnée acquise avec certitude est celle du produit commercial (photo de l'emballage à l'appui, **figure 1**), la dose et la fréquence sont plus rares sauf dans le cas des suivis réguliers (suivi annuel par exemple nombre de producteurs) ou de filières pour lesquelles les emplois de pesticides sont encadrés par des services techniques.

Figure 1 : Exemple d'emballage d'un produit commercial : Ankill A 40 WP, composé de quinclorac et de bensulfuron-méthyl, un herbicide utilisé en riziculture.



L'analyse des données contenues sur les emballages permet d'extraire la ou les substances actives (s.a.) composant le produit commercial, la concentration de ces substances dans le produit, la formulation du produit, et la ou les doses préconisées en fonction de la culture concernée.

Ce sont ces données que nous avons compilées dans notre base de connaissance des usages des pesticides des 5 filières. Les données relatives aux fréquences d'utilisation, aux méthodes d'application et aux bioagresseurs visés par l'utilisation du produit n'étant pas suffisamment précises pour la plupart des filières, nous ne les avons pas retenues pour la suite de l'étude. Les enquêtes ont permis de répertorier 300 produits commerciaux différents utilisés par les producteurs desquels nous avons extrait les substances actives (s.a.). Nous n'avons pas considéré les molluscicides et les bactéricides, par manque de données les concernant ou par inaptitude de certains modèles à les considérer. Au total ce sont donc 92 s.a. qui, d'après nos recensements, sont utilisées dans les filières étudiées. Les **tableaux 2** et **2 bis** présentent ces s.a. ainsi que le type d'usage associé ; sont dénombrés : 38 fongicides, 37 insecticides et 17 herbicides. La filière banane utilise 36 de ces s.a. (en grande majorité des fongicides), la filière cacao 24 (en majorité des insecticides), la filière café 9 (autant d'insecticides que de fongicides), la filière maraîchage 27 (autant d'insecticides que de fongicides) et la filière riz 36 (avec notamment 14 herbicides différents sur les 17 répertoriés mais aussi 11 insecticides). Seulement 4 s.a. sont communément utilisées par les 5 filières étudiées, il s'agit du chlorpyrifos, de l'imidaclopride, du thiamethoxam, trois insecticides à large spectre et du glyphosate, un herbicide non sélectif des adventices. La grande majorité des autres s.a. (69) n'est utilisée que par une seule filière.

Tableau 2 : Liste des substances actives entrant dans la composition des produits commerciaux utilisés dans les 5 filières ; types d'usage associés (herbicide, fongicide ou insecticide/acaricide) ; UE : substances autorisées dans l'UE et classement CMR (cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction).

| Substance active | Type | Filières | UE | CMR |
|------------------------------|-------------|------------------------------|-----|-------------|
| 2,4 D | herbicide | rice | oui | CMR1 |
| abamectine | insecticide | rice, vegetable | oui | CMR2 |
| acephate | insecticide | cocoa, rice, vegetable | non | |
| acetamiprid | insecticide | rice | oui | CMR2 |
| alpha-cypermethrin | insecticide | vegetable | non | |
| azoxystrobin | fongicide | coffee, vegetable, banana | oui | |
| benalaxyl | fongicide | cocoa | oui | |
| benomyl | fongicide | cocoa | non | CMR1 |
| bensulfuron methyl | herbicide | rice | oui | |
| bentazone | herbicide | rice | oui | CMR2 |
| bifenthrin | insecticide | banana, cocoa, vegetable | non | CMR2 |
| bispyribac | herbicide | rice | non | |
| boscalid | fongicide | banana | oui | |
| butachlor | herbicide | rice | non | |
| carbendazim | fongicide | rice, vegetable | non | CMR1 |
| cartap | insecticide | cocoa | non | |
| chlorantraniliprole | insecticide | rice, vegetable | oui | |
| chlorothalonil | fongicide | banana, vegetable | non | CMR2 |
| chlorpyrifos | insecticide | banana, cocoa, coffee, rice, | non | |
| copper oxychloride | fongicide | cocoa, vegetable | oui | |
| cyhalofop-butyl | herbicide | rice | oui | |
| cypermethrin | insecticide | cocoa, rice, vegetable | oui | |
| cyproconazole | fongicide | coffee | non | CMR1 |
| deltamethrin | insecticide | cocoa, vegetable, banana | oui | |
| diazinon | insecticide | cocoa | non | |
| diethofencarb | fongicide | banana | non | |
| difenoconazole | fongicide | banana, vegetable | oui | CMR2 |
| dimethoate | insecticide | cocoa | non | |
| dimethomorph | fongicide | cocoa | oui | CMR1 |
| diuron | herbicide | banana | non | CMR1 |
| dodine | fongicide | banana | oui | |
| emamectin benzoate | insecticide | rice, vegetable | oui | |
| endosulfan | insecticide | cocoa | non | |
| epoxiconazole | fongicide | banana, coffee | non | CMR1 |
| ethoxysulfuron | herbicide | rice | non | |
| fenobucarb | insecticide | cocoa, rice | non | |
| fenoxanil | fongicide | rice | non | |
| fenoxaprop-P-Ethyl | herbicide | rice | oui | |
| fenpicoxamid | fongicide | banana | oui | |
| fenpropathrin | insecticide | rice | non | |
| fenpropidin | fongicide | banana | oui | |
| fenpropimorph | fongicide | banana | non | CMR2 |
| fipronil | insecticide | Rice, banana | non | |
| florpyrauxifen-benzyl | herbicide | rice | oui | |

| | | | |
|---------------|-------------|-----------|-----|
| flubendiamide | insecticide | vegetable | oui |
| fluopyram | insecticide | banana | oui |

Tableau 2bis : Suite de la liste des substances actives entrant dans la composition des produits commerciaux utilisés dans les 5 filières ; types d'usage associés (herbicide, fongicide ou insecticide/acaricide) ; UE : substances autorisées dans l'UE et classement CMR (substances Cancérogènes, Mutagènes et toxiques pour la Reproduction).

| Substance active | Type | Filières | UE | CMR |
|--------------------|--------------|------------------------------|-----|------|
| flupyradifurone | insecticide | cocoa | oui | |
| flutriafol | fongicide | Coffee, banana | non | |
| fluxapyroxad | fongicide | banana | oui | |
| fosetyl | fongicide | vegetable | oui | |
| fosthiazate | insecticide | banana | oui | |
| gluphosinate | herbicide | banana | non | |
| glyphosate | herbicide | banana, cocoa, coffee, rice, | oui | |
| hexaconazole | fongicide | rice | non | |
| imidacloprid | insecticide | banana, cocoa, coffee, rice, | non | |
| indoxacarbe | insecticide | vegetable | non | |
| isoprocarb | insecticide | rice | non | |
| isoprothiolane | fongicide | rice | non | |
| isopyrazam | fongicide | banana | non | CMR1 |
| lambda-cyhalothrin | insecticide | cocoa, vegetable, banana | oui | |
| malathion | insecticide | cocoa, rice | oui | |
| mancozeb | fongicide | banana, cocoa, vegetable | non | CMR1 |
| maneb | fongicide | cocoa, vegetable | non | CMR2 |
| metalaxyl | fongicide | cocoa | oui | |
| metiram | fongicide | banana | oui | |
| niclosamide | insecticide | rice | non | |
| oxamyl | Insecticide, | banana | non | |
| paraquat | herbicide | banana | non | |
| parathion-methyl | insecticide | cocoa | non | |
| penoxulam | herbicide | rice | oui | |
| pretilachlor | herbicide | rice | non | |
| profenofos | insecticide | vegetable | non | |
| propanil | herbicide | rice | non | |
| propiconazole | fongicide | banana | non | CMR1 |
| pymetrozine | insecticide | rice | non | CMR2 |
| pyraclostrobin | fongicide | banana, coffee, rice | oui | |
| pyrimethanil | fongicide | banana | oui | |
| quinclorac | herbicide | rice | non | |
| spirotetramat | insecticide | Vegetable, banana | non | CMR2 |
| spiroxamine | fongicide | banana | oui | CMR2 |
| tebuconazole | fongicide | banana | oui | CMR2 |
| teflubenzuron | insecticide | vegetable | non | |
| terbufos | insecticide | banana | non | |
| thiacloprid | insecticide | vegetable | non | CMR1 |
| thiamethoxam | insecticide | banana, cocoa, coffee, rice, | non | CMR2 |
| thiophanate methyl | fongicide | banana | non | CMR2 |
| thiram | fongicide | banana | non | |

| | | | |
|------------------------|-------------|--------|------------|
| triadimenol | fongicide | banana | non |
| tricyclazole | fongicide | rice | non |
| tridemorph | fongicide | banana | non |
| trifloxystrobin | fongicide | banana | oui |
| zoxamide | insecticide | banana | oui |

Sur ces 92 s.a., 52 ne sont plus autorisées en Europe (56 %)⁶, 25 sont classées comme des Substances Cancérogènes, Mutagènes et toxiques pour la Reproduction (CMR), et plus précisément 11 s.a. sont classées CMR1⁷ et 14 en CMR2⁸. Sur les 40 s.a. encore autorisées en Europe, 9 sont classées CMR dont 2 CMR1 et 7 CMR2 (voir **tableau 2 et 2bis**).

2. Choix et présentation des indicateurs pour l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux

Cinq indicateurs ont permis d'évaluer les risques des substances actives (s.a.) contenues dans les pesticides répertoriés i) 3 indicateurs évaluant les risques pour la santé humaine et ii) 2 indicateurs sur les risques de transfert et les impacts sur les écosystèmes. Ces indicateurs ont été choisis pour leur complémentarité dans l'évaluation.

1.1. IRSA : INDICATEUR DE RISQUE POUR LA SANTE APPLICATEURS

L'Indicateur de Risque pour la Santé Appicateurs (IRSA) permet d'évaluer le risque potentiel d'une matière active contenue dans une préparation commerciale donnée et selon son utilisation⁹. Cet indicateur tient compte des principaux critères de toxicité aiguë et de toxicité chronique des matières actives ainsi que du potentiel de bioaccumulation dans l'organisme humain. Une matière active n'a pas nécessairement le même IRSA d'une préparation commerciale à une autre. Le calcul de l'indice de risque pour la santé tient compte aussi de certaines particularités des préparations commerciales (type de formulation : concentré soluble, granulés à disperser dans l'eau...) et des concentrations des matières actives dans les produits commerciaux. L'IRSA dépend donc de deux facteurs : (i) un facteur lié aux propriétés physicochimiques des matières actives (IRT) et (ii) un facteur lié au produit commercial et aux techniques d'applications. L'IRT tient compte de : (i) la toxicité aiguë qui correspond à ce qui est perçu directement par l'Homme lors de l'application des pesticides. Elle est déterminée selon les 6 critères suivants : Toxicité orale (en fonction de la DL50), toxicité cutanée (en fonction de la DL50), toxicité inhalation (en fonction de la CL50), irritation cutanée, irritation oculaire

⁶ <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>

⁷ Substances dont le potentiel cancérigène, mutagène ou reprotoxique pour l'être humain est avéré ou supposé.

⁸ Substances dont le potentiel cancérigène, mutagène ou reprotoxique pour l'être humain est suspecté.

⁹ Le Bars M., Maïga A., Sacko M., Koïta O. (2022) Pesticide contamination of water used for urban market gardening in Bamako (Mali). *Current Research in Environmental Sustainability*.

Le Bars M, Sissako A, de Montgolfier A, Sidibe Y, Diarra A, Sagara A, Koïta O. (2022). Usage des pesticides et impacts sur la santé des applicateurs en zone cotonnière du Mali. *Cah. Agric.* 31: 24.

Mghirbi O., Ellefi K., Le Grusse Ph., Mandart E., Fabre J., Ayadi H., Bord., Jp. (2014) « Assessing Plant Protection Practices Using Pressure Indicator And Toxicity Risk Indicators: Analysis Of The relationship Between These Indicators For Improved Risk Management, Application In Viticulture” *Environmental Science And Pollution Research* 22(11):8058 - 8074

et de sensibilisation ; (ii) la toxicité chronique qui correspond aux risques sur le long terme suite à l'application de pesticides. Elle est déterminée selon les 5 critères suivants : cancérigène, perturbateur endocrinien, reproduction, neurotoxique, effets cumulés. L'IRSA dépend en plus de l'IRT de 3 autres facteurs : Le facteur de formulation (FPf) a une importance majeure en matière d'exposition. Selon leur type de formulation, les produits peuvent se répartir en deux groupes : ceux à risque d'exposition faible (par exemple ; les granulés solubles (SG), les granulés mouillables (WG)...) et ceux à risque d'exposition élevé (par exemple ; les poudres mouillables (WP), les suspensions (SU)...) ; le facteur de pondération lié à la dose appliquée (FCP). La concentration de la matière active dans la préparation commerciale ainsi que la dose appliquée représentent des éléments importants de modulation du niveau de risque d'exposition. Le facteur FCP est déterminé à partir de la Dose Repère Appliquée (DRA) et permet de comparer les produits entre eux sur une base uniforme. Ceci est d'autant plus important que les étiquettes des différentes préparations commerciales ayant une matière active commune n'ont pas nécessairement toute la même prescription en matière de dose d'application. La DRA (ml/ha ou g/ha) est déterminée pour chacune des matières actives à partir de l'étiquette de la préparation commerciale, et enfin, le facteur lié à la technique et/ou du lieu d'application. Dans le cadre de cette étude, nous avons comparé les 92 s.a. entre elles en ne considérant qu'une unique dose d'application par produit commercial et en y associant la formulation d'un produit commercial de référence. Le choix du mode d'application testé pour l'ensemble des s.a. a été le pulvérisateur à dos à pompe manuelle.

1.2. BROWSE (BYSTANDERS, RESIDENTS, OPERATORS AND WORKERS EXPOSURE MODELS FOR PLANT PROTECTION PRODUCTS)

Le modèle BROWSE (Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure models for plant protection products) est un modèle mécaniste et probabiliste qui calcule l'exposition humaine aux pesticides et évalue les risques des produits phytosanitaires pour la santé humaine (Ellis et al., 2017¹⁰). Il a été développé dans le cadre du projet européen BROWSE (www.browseproject.eu) en suivant les directives européennes visant à réduire les risques sanitaires et environnementaux des produits phytopharmaceutiques (Kennedy et al., 2015¹¹). Contrairement à la plupart des modèles d'évaluation de l'exposition de la population humaine aux pesticides, le modèle BROWSE fournit la distribution de l'exposition, laissant le choix à l'utilisateur quant aux percentiles pertinents. Quatre grands groupes de populations sont considérés dans le modèle BROWSE : les opérateurs, les travailleurs, les passants et les résidents.

Pour les opérateurs, le modèle d'exposition BROWSE a été élaboré en tenant compte des trois principales voies d'exposition : l'inhalation, l'exposition cutanée et l'ingestion. L'exposition cutanée se produit suite (1) au contact entre la peau (les mains ou tout le corps) et les produits phytosanitaires contenus dans l'air, (2) au contact entre la peau et les surfaces contaminées par les produits phytosanitaires, et (3) au contact direct avec des éclaboussures ou de fines particules de produits phytosanitaires solides ou liquides.

¹⁰ Ellis, M. C. B., Van De Zande, J. C., Van Den Berg, F., Kennedy, M. C., O'sullivan, C. M., Jacobs, C. M., ... & Charistou, A. (2017). The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of plant protection products: An overview. *Biosystems Engineering*, 154, 92-104.

¹¹ Kennedy, M. C., Glass, C. R., Bokkers, B., Hart, A. D., Hamey, P. Y., Kruisselbrink, J. W., ... & van Klaveren, J. D. (2015). A European model and case studies for aggregate exposure assessment of pesticides. *Food and Chemical Toxicology*, 79, 32-44.

Pour l'estimation des concentrations en produits phytosanitaires dans l'atmosphère, BROWSE utilise le couplage PEARL-OPS (van den Berg et al., 2016¹²). Le modèle PEARL décrit la volatilisation des produits phytosanitaires, tandis que le modèle OPS simule les processus atmosphériques tels que l'émission, la dispersion, le transport, la dégradation chimique et le dépôt des produits phytosanitaires.

Pour réaliser ses simulations, BROWSE nécessite des données sur les propriétés spécifiques des pesticides qui influencent leur persistance dans l'environnement et leur interaction avec le corps humain (comme la solubilité, la pression de vapeur et les coefficients d'absorption cutanée et inhalée). À partir de ces données sur les quantités de pesticide dans l'air, BROWSE calcule les quantités de pesticide susceptibles d'être absorbées par le corps humain, en considérant les trois voies d'exposition. À ce stade, le modèle prend en compte les conditions d'application des pesticides, qui influencent de manière significative l'exposition des opérateurs : l'utilisation d'un pulvérisateur manuel ou d'un tracteur, la présence ou non d'une cabine sur le tracteur, la densité du couvert végétal, la vitesse du vent au moment de la pulvérisation, l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI), etc. Les EPI comme les gants, les masques, les lunettes, les bottes, les combinaisons, etc., sont pris en compte au travers de coefficients de transfert qui réduisent l'exposition de l'opérateur selon le type d'EPI utilisé. Le modèle ajuste enfin l'exposition en fonction des spécificités des individus exposés, en tenant compte du poids corporel, de la fréquence de contact main-bouche (notamment pour les enfants) et des taux de respiration. En comparant l'exposition totale de chaque groupe de personnes (opérateurs, travailleurs, passants ou résidents) à l'AOEL (Acceptable Operator Exposure Level), un indice de risque pour la santé humaine est obtenu. Un HR inférieur à 100 % est considéré comme acceptable, tandis qu'un HR supérieur à 100% indique un risque inacceptable pour la santé humaine (Lammoglia et al., 2017¹³). Dans le cadre de cette étude, le modèle BROWSE a permis d'évaluer l'exposition des opérateurs à chacune des 92 molécules de pesticides, en considérant uniquement l'exposition cutanée. Pour chaque molécule, nous avons fait l'hypothèse que l'opérateur applique un produit commercial de référence à la dose homologuée, et n'avons considéré que la formulation et les concentrations en matières actives de ce produit commercial de référence. Nous avons également fait l'hypothèse que les agriculteurs appliquent le pesticide à l'aide d'un pulvérisateur à dos et portent l'ensemble des équipements de protection recommandés.

1.3. ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet d'évaluer tous les impacts potentiels sur l'environnement, et ce pour toutes les étapes (ex. fabrication, distribution, utilisation et gestion des déchets) du cycle de vie d'un produit. Le calcul de ces impacts nécessite des données quantifiées pour tous les matériaux utilisés, les ressources consommées et les polluants émis vers l'environnement. Dans le cadre de notre étude, les indicateurs basés sur l'ACV sont donc issus de la quantification des flux de matière et d'énergie liés aux différentes étapes de cycle de vie de chaque matière active contenue dans un produit phytopharmaceutique de synthèse (pesticide chimique). Il permet ainsi d'évaluer et de comparer sur plusieurs critères (ex. changement climatique, écotoxicité et toxicité), les impacts environnementaux et humains des pesticides chimiques, en utilisant le logiciel d'ACV SimaPro et en mobilisant des modèles, notamment USEtox (<https://usetox.org/>) dans notre étude. Ainsi, les résultats issus de USEtox (indicateurs ACV) nous montrent les différents impacts potentiels par rapport à la substance active la plus préoccupante pour la santé humaine et environnementale. L'ACV regroupe

¹² van den Berg, F. C. M. J., Jacobs, C. M. J., Ellis, M. B., Spanoghe, P., Ngoc, K. D., & Fragkoulis, G. (2016). Modelling exposure of workers, residents and bystanders to vapour of plant protection products after application to crops. *Science of the Total Environment*, 573, 1010-1020.

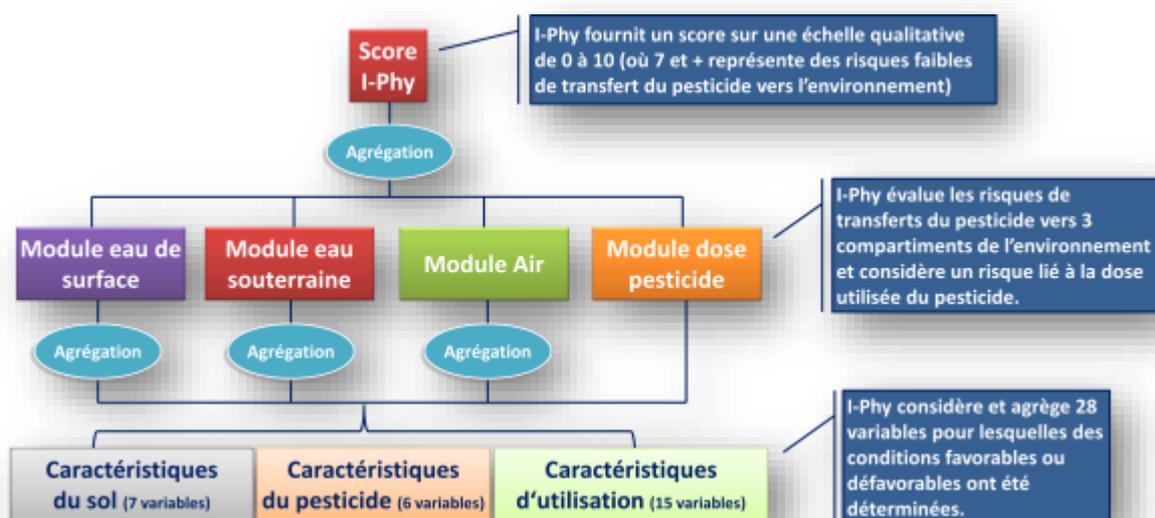
¹³ Lammoglia, S. K., Kennedy, M. C., Barriuso, E., Alletto, L., Justes, E., Munier-Jolain, N., & Mamy, L. (2017). Assessing human health risks from pesticide use in conventional and innovative cropping systems with the BROWSE model. *Environment International*, 105, 66-78.

une importante communauté de scientifiques et repose sur un cadre méthodologique normé (ISO 14040 et 14044). Elle constitue également le socle de l’affichage environnemental. Toutefois, une des limites de l’ACV est le manque de processus adaptés au contexte tropical. En effet, les bases de données mobilisées (ecoinvent et Agribalyse) correspondent principalement aux climats tempérés même si des travaux ont contribué récemment à mieux prendre en compte les conditions tropicales (e.g. projet OLCA-Pest, <https://orbit.dtu.dk/en/projects/olca-pest/>). Le modèle USEtox propose deux indicateurs que nous mobiliserons indépendamment pour notre étude : indicateur de toxicité humaine et indicateur de toxicité sur les écosystèmes exprimés respectivement en nombre de vie humaine et en nombre d’espèces impactés par application d’une substance active donnée.

1.4. OUTIL D’AIDE A LA DECISION PHYTO’AIDE / I-PHY

PHYTO’AIDE (<https://smartis.re/PHYTOAIDE>) est un outil d’aide à la décision développé par le Cirad évaluant les risques de transfert des pesticides vers l’environnement tout en déterminant les différents leviers et marges de progrès pour les limiter¹⁴. PHYTO’AIDE repose sur les résultats de l’indicateur d’évaluation I-PHY de la méthode d’évaluation Indigo® développée par l’INRAE¹⁵. Cet indicateur modélise les différents transferts du pesticide vers l’environnement (eaux de surface et souterraine et air) en agrégeant 28 variables (caractéristiques du pesticide, de la parcelle, les conditions environnementales et le matériel utilisé) pour aboutir à un score agrégé sur une échelle qualitative de 0 à 10 (voir figure 2).

Figure 2 : Arbre d’agrégation des variables d’entrée conduisant au score I-Phy.



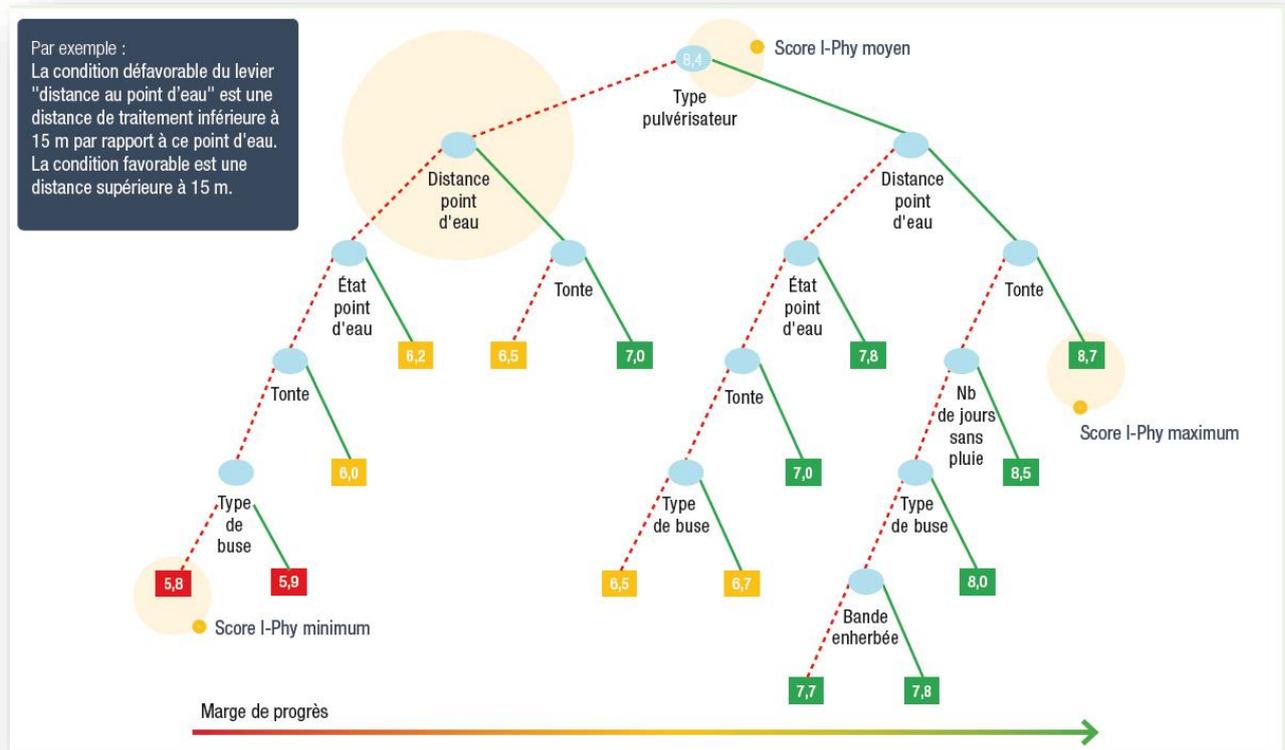
PHYTO’AIDE est un outil de simulation rapide qui permet une visualisation sous la forme d’un arbre de régression (voir figure 3) des scores I-PHY de tous les scénarii d’utilisation du pesticide testés. PHYTO’AIDE propose grâce à cet arbre une identification des leviers majeurs pour limiter les risques

¹⁴ Le Bellec F., Vélou A., Fournier P., Le Squin S., Michels T., Tendero A., Bockstaller C., 2015. Helping farmers to reduce herbicide environmental impacts. *Ecological Indicators*, 54, 207–216.

¹⁵ Van der Werf H.M.G., Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 2225-2249.

de transfert. Dans le cadre de cette étude, nous avons comparé les 92 s.a. une à une grâce à une simulation de leur utilisation dans un contexte donné (caractéristiques pédologiques : sol plutôt sableux, profondeur superficiel (<30cm), valeur du pH $5 \leq \text{pH} < 5.5$, matière organique (%) moyenne : $2 \leq \text{MO} < 5$, pas de présence d'argile gonflante, pente faible (<5%), sol filtrant). Dans une première phase d'analyse, nous n'avons retenu que les scores « minimum » (I-Phy min) et « maximum » (I-Phy-max) de l'indicateur pour chaque s.a. (« chemins » tracés par les branches en pointillés rouges de l'arbre de régression (score I-Phy min) ou vertes (I-Phy max), ces « chemins » sont déterminés en fonction des conditions défavorables ou favorables d'usage des pesticides de 10 paramètres techniques ou environnementaux, voir figure 3). Le score I-Phy Min correspond au risque de transfert de la substance active vers l'environnement le plus élevé. Le score I-Phy Max correspond au risque de transfert de la substance active vers l'environnement le moins élevé. Dans une seconde phase d'analyse, nous avons approfondi les risques de transfert des pesticides pour deux filières et deux types de pesticides (Banane/fongicide et Riz/Herbicide) à l'aide des arbres de régression fournis par PHYTO'AIDE en s'appuyant sur la connaissance des pratiques de ces filières.

Figure 3 : Exemple d'un arbre de régression construit par l'outil PHYTO'AIDE (<https://smartis.re/PHYTOAIDE>). L'interface web PHYTO'AIDE permet de renseigner la substance active à tester et les caractéristiques du sol sur lequel il est appliqué. Le modèle calcul ensuite tous les scores de l'indicateur I-PHY associé (plus de 1000 scénarios d'usage) en faisant varier 10 paramètres techniques (pulvérisateur, distance au point d'eau...). La représentation des résultats est traduite sous la forme de cet arbre de régression qui permet, selon les conditions favorables (branches vertes de l'arbre) ou défavorables (branches rouges en pointillés) de ces 10 paramètres, d'accéder au score de risque de transfert du pesticide vers l'environnement. L'utilisateur peut rapidement déterminer les paramètres d'importance pour améliorer ce score



3. Doses d'utilisation des pesticides et valeurs seuils ou de référence des indicateurs

Idéalement, l'évaluation des risques à l'aide des indicateurs devrait s'appuyer sur les pratiques réelles des producteurs. Ces pratiques sont malheureusement extrêmement difficiles à recenser avec précision. Nous avons donc choisi pour nos calculs d'utiliser la dose de pesticide correspondant à une dose homologuée du produit commercial multipliée par la concentration de la ou des substances actives le composant. La dose homologuée peut dépendre du bioagresseur ciblé et/ou de la culture mais aussi des conditions d'épandage. Par exemple, les doses homologuées pour certains pesticides peuvent être à l'hectolitre au lieu d'une dose à la surface (ha). De ce fait, selon le matériel d'épandage mais aussi de l'âge de la culture (et de son développement végétatif), le producteur peut utiliser de 300-400 à 1200-1500 litres de bouillie de traitement par ha ; dans ces conditions la dose appliquée peut varier d'un facteur 5. Par ailleurs, nous avons aussi fait le choix de considérer que les traitements étaient réalisés à la dose homologuée et à l'ensemble de la parcelle. Ce qui correspond théoriquement à un indice de fréquence de traitement (IFT) de 1¹⁶. Pour toutes ces raisons, la dose testée dans cette étude n'est qu'indicative et ne reflète pas totalement la variabilité des usages en cours dans les différentes filières.

Quel que soit l'indicateur, la s.a. est la donnée d'entrée principale et elle est considérée seule. Par ailleurs, les scores des différents indicateurs sont issus d'une agrégation de variables souvent hétérogènes. Au-delà donc de la valeur du score, l'intérêt de notre étude est bien de comparer les s.a. entre-elles, testées dans les mêmes conditions avec les mêmes indicateurs. Pour les indicateurs IRSA et ACV, il n'existe pas de valeur seuil de référence, nous proposons donc un classement hiérarchique des s.a., des plus impactantes au moins impactantes. Pour le modèle BROWSE et l'indicateur AOEL (Niveau d'exposition acceptable de l'opérateur en mg kg⁻¹ bw d⁻¹), la valeur seuil est fixée à 100 %. Au-delà de ce pourcentage, la s.a. présente un risque d'exposition important. Pour PHYTO'AIDE/I-PHY, le risque de transfert est donné sur une échelle qualitative d'un score de 0 à 10 où un score supérieur à 7 est considéré comme limitant les risques de transfert. Pour toutes ces raisons, les scores des indicateurs doivent être considérés avec précaution.

4. Résultats des indicateurs pour l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux

Les **tableaux 3** et **3bis** présentent les scores des indicateurs à la dose de pesticide testée. Les scores des indicateurs de Risque pour la Santé des Applicateurs (IRSA) et AOEL varient respectivement de 12 à près de 1940 pour l'IRSA et de 0 à 8000 % pour l'AOEL illustrant une gamme étendue de risques pour les utilisateurs. Pour l'indicateur AOEL, seules 8 s.a. dépassent le seuil de 100% mais les scores de 18 s.a. n'ont pas été calculés par manque de données sur ces s.a. Par ailleurs, il existe un facteur de 4.5 de risque entre les s.a. évaluées par ACV-Santé Humaine et un facteur de 43 pour l'indicateur ACV-Ecosystème discriminant de fait les s.a. entre elles. Pour ces deux indicateurs, les scores de 9 s.a. n'ont pas pu être calculés par manque de données. De même que le risque lié à la famille chimique de la s.a. a été considéré pour certaines d'entre-elles par manque de connaissances précises sur la s.a. considérée. S'agissant de l'indicateur I-Phy les scores varient de 4 à 9.8 selon les conditions d'application. En considérant les conditions les plus défavorables d'application des pesticides (score I-Phy min), seules 10 s.a. dépassent le score-seuil de 7 sans jamais dépasser le

¹⁶ L'indice de fréquence de traitement (IFT) est calculé selon la formule suivante :

$$\text{IFT} = \text{Dose de produit commercial appliqué sur la parcelle} * \text{surface traitée} / \text{dose homologuée de produit commercial} * \text{surface de la parcelle}$$

score de 8. Ces scores suggèrent que toutes les s.a. présentent un risque important de transfert vers l'environnement si les conditions d'application sont mal maîtrisées. Globalement, les résultats de ces indicateurs sont difficilement comparables entre eux du fait des objectifs d'évaluation très différents que ces indicateurs doivent remplir. Nous proposons donc de les considérer un à un tout en proposant des règles de décision pour identifier les s.a. les plus préoccupantes.

Tableau 3 : Scores des différents indicateurs par substance active. Dose : dose testée. Formu. Formulation du pesticide, EC : Emulsifiable concentrate ; FC = SC ; GR : Granule ; OD : Oil dispersion ; OL : Oil miscible liquid ; SC : Suspension concentrate (=flowable concentrate) ; SE : Suspo-emulsion ; SL : Soluble concentrate ; SP : Water soluble powder ; WG : Water dispersible granules ; WP : Wetttable powder. NA : calcul impossible à cause de données manquantes.

| Substance active | Dose | Form | Indicateurs santé | | | Indicateurs environnement | | |
|--------------------|------|------|-------------------|----------|------|---------------------------|-----------|-------------|
| | | | IRSA | ACV | AOEL | I-Phy | I-Phy Max | ACV |
| 2,4 D | 1,00 | SL | 852,80 | 2,6189E- | 1% | 5,2 | 8,2 | 4,9666E-08 |
| abamectine | 1 | EC | 927,38 | 2,6217E- | 7% | 6,8 | 7,6 | 5,29541E-08 |
| acephate | 0,78 | SP | 133,79 | 3,4478E- | 8000 | 6,4 | 9,3 | 5,29833E-08 |
| acetamiprid | 0,75 | WG | 42,47 | 2,901E- | 4% | 7,3 | 9,8 | 5,85217E-08 |
| alpha- | 0,24 | SC | 496,04 | 2,622E- | 33% | 6,8 | 7,6 | 6,75233E-08 |
| azoxystrobin | 1 | SC | 245,70 | 4,3492E- | 0% | 6,2 | 9,3 | 7,81367E-08 |
| benalaxyl | 2 | WP | 35,60 | 4,3492E- | 0% | 5,5 | 7,2 | 7,43091E-08 |
| benomyl | 0,4 | WP | 483,60 | 4,3496E- | - | 5,5 | 7,2 | 7,51842E-08 |
| bensulfuron | 0,4 | WP | 33,15 | 2,5569E- | 3% | 6,3 | 9,4 | 4,87004E-08 |
| bentazone | 2,5 | SL | 235,20 | 2,5941E- | 0% | 3,9 | 7,6 | 4,89866E-08 |
| bifenthrin | 1 | EC | 1905,0 | 2,6326E- | 23% | 7,2 | 8,6 | 5,51075E-08 |
| bispyribac | 0,3 | SC | 27,23 | 2,5563E- | 47% | 6,3 | 9,4 | 4,87004E-08 |
| boscalid | 0,5 | SC | 178,75 | 3,5149E- | 3% | 6,1 | 9,3 | 3,83635E-08 |
| butachlor | 2 | EC | 47,20 | 2,5563E- | NA | 3,3 | 4,2 | 5,10908E-08 |
| carbendazim | 0,5 | SC | 266,75 | 3,6062E- | NA | 4,8 | 6,4 | 4,39446E-08 |
| cartap | 2 | SP | 157,50 | 2,8706E- | NA | 6,1 | 9,2 | 1,74344E-07 |
| chlorantraniliprol | 0,07 | WG | 11,76 | 2,6217E- | 1% | 6,7 | 9,6 | 5,29541E-08 |
| chlorothalonil | 1,5 | SC | 1938,8 | 3,7048E- | 2% | 4,3 | 5,8 | 2,90215E-07 |
| chlorpyrifos | 1 | EC | 1417,5 | 6,4767E- | 33% | 5 | 7,2 | 6,95084E-07 |
| copper | 5 | WP | 1300,0 | NA | 0% | 5,2 | 9 | NA |
| cyhalofop-butyl | 0,3 | OD | 10,68 | 2,5563E- | 4% | 5 | 7 | 4,87004E-08 |
| cypermethrin | 1 | EC | 751,10 | 2,6219E- | 1% | 6,7 | 8,1 | 5,91421E-08 |
| cyproconazole | 0,4 | SL | 130,38 | 4,3492E- | 2% | 7,4 | 8,9 | 7,43091E-08 |
| deltamethrin | 0,5 | EC | 494,59 | 2,622E- | 1% | 7,2 | 8,4 | 5,33666E-08 |
| diazinon | 6 | SL | 838,10 | 3,8268E- | 139% | 4,3 | 6,3 | 7,89542E-08 |
| diethofencarb | 0,25 | SC | 284,38 | NA | 0% | 6,5 | 8,6 | NA |
| difenoconazole | 0,4 | EC | 202,40 | 3,6003E- | 1% | 6,2 | 9,7 | 4,49502E-08 |
| dimethoate | 0,75 | EC | 243,60 | 2,8953E- | 12% | 6,1 | 9,5 | 6,35906E-08 |
| dimethomorph | 0,40 | EC | 202,38 | 4,3492E- | 3% | 5,7 | 8,1 | 7,44196E-08 |
| diuron | 0,3 | SE | 492,21 | 2,6119E- | 0% | 4,4 | 8,9 | 5,16524E-08 |
| dodine | 0,75 | SC | 281,30 | 3,5152E- | 3% | 6,6 | 9,4 | 4,02572E-08 |
| emamectin | 2 | WG | 316,87 | 2,6217E- | 50% | 7,8 | 10 | 5,29541E-08 |
| endosulfan | 1,5 | SL | 1896,5 | 2,894E- | 930% | 4,5 | 5,8 | 6,91918E-08 |
| epoxiconazole | 0,1 | SC | 114,10 | 3,5149E- | 10% | 7,4 | 9,4 | 3,87455E-08 |
| ethoxysulfuron | 0,3 | SE | 107,43 | NA | 2% | 4 | 6,5 | NA |
| fenobucarb | 1 | EC | 445,30 | NA | NA | 4,2 | 5,4 | NA |

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|----|--------|----------|------|-----|-----|-------------|
| fenoxanil | 0,3 | WP | 25,59 | NA | NA | 6,3 | 8,2 | NA |
| fenoxaprop-P- | 1 | OD | 297,95 | 2,5563E- | 1% | 4,7 | 7 | 5,04305E-08 |
| fenpicoxamid | 1,5 | EC | NA | NA | 0% | 5,6 | 7,8 | NA |
| fenpropathrin | 0,9 | EC | 234,95 | 2,9051E- | 72% | 4,7 | 6,2 | 1,04044E-07 |
| fenpropidin | 0,4 | EC | 455,30 | 3,5149E- | 14% | 4,9 | 6,7 | 3,83635E-08 |
| fenpropimorph | 0,45 | OL | 229,54 | 3,5149E- | 419% | 4,5 | 5,8 | 3,83635E-08 |
| fipronil | 1 | SC | 1584,7 | 3,671E- | 5% | 6,5 | 7,3 | 5,85217E-08 |
| florpyrauxifen- | 1,2 | EC | NA | NA | 0% | 6,8 | 8,5 | NA |
| flubendiamide | 0,3 | SC | 299,16 | 2,6217E- | NA | 5,9 | 7,3 | 5,29541E-08 |
| fluopyram | 0,62 | SC | 140,25 | 2,7951E- | 3% | 5,4 | 7,6 | 5,62488E-08 |

Tableau 3bis : Scores des différents indicateurs par substance active. Dose : dose testée. Formu. Formulation du pesticide, EC : Emulsifiable concentrate ; FC = SC ; GR : Granule ; OD : Oil dispersion ; OL : Oil miscible liquid ; SC : Suspension concentrate (=flowable concentrate) ; SE : Suspo-emulsion ; SL : Soluble concentrate ; SP : Water soluble powder ; WG : Water dispersible granules ; WP : Wetttable powder. NA : calcul impossible à cause de données manquantes.

| Substance active | Dose | Form | Indicateurs santé | | | Indicateurs environnement | | |
|------------------|-------|------|-------------------|------------|-------|---------------------------|-----------|----------------|
| | | | IRSA | ACV Santé | AOE L | I-Phy Min | I-Phy Max | ACV Ecosystème |
| flupyradifuron | 0,25 | EC | 98,70 | 2,8548E-05 | 0% | 7,4 | 9,6 | 5,7374E-08 |
| flutriafol | 2 | SC | 438,63 | 4,3492E-05 | 0% | 5,9 | 9,4 | 7,4309E-08 |
| fluxapyroxad | 0,3 | SC | 105,56 | 3,5149E-05 | 0% | 6,1 | 9,5 | 3,8363E-08 |
| fosetyl | 4 | WP | 548,00 | 3,6003E-05 | 0% | 6,7 | 9,1 | 3,9331E-08 |
| fosthiazate | 30 | GR | 1096,00 | 2,7951E-05 | 134% | 4,3 | 7,8 | 5,6249E-08 |
| gluphosinate | 6 | SL | 634,50 | 2,6446E-05 | 173% | 6 | 9,2 | 5,2674E-08 |
| glyphosate | 4 | SL | 616,56 | 3,5757E-05 | 2% | 5,7 | 9,1 | 6,6443E-08 |
| hexaconazole | 1 | SC | 218,40 | 1,9802E-05 | NA | 5 | 6,5 | 3,8184E-08 |
| imidacloprid | 0,5 | SC | 254,15 | 2,6264E-05 | 0% | 6,3 | 9,5 | 5,3443E-08 |
| indoxacarbe | 0,125 | EC | 973,86 | 2,6217E-05 | 32% | 6,5 | 8 | 5,3869E-08 |
| isoprocarb | 1 | EC | 186,20 | 2,901E-05 | NA | 4,2 | 5,8 | 6,0341E-08 |
| isoprothiolane | 0,3 | WP | 51,92 | NA | NA | 5,8 | 7,4 | NA |
| isopyrazam | 0,75 | EC | 307,97 | 3,5149E-05 | 1% | 5,9 | 7,6 | 3,8363E-08 |
| lambda- | 0,5 | EC | 588,84 | 2,6217E-05 | 314% | 7 | 7,9 | 5,8159E-08 |
| malathion | 0,9 | EC | 408,60 | 2,9017E-05 | 5% | 7,4 | 9,1 | 6,3313E-08 |
| mancozeb | 1,1 | WP | 257,31 | 3,6336E-05 | 0% | 4,3 | 7,5 | 7,2108E-08 |
| maneb | 0,5 | EC | 307,67 | 3,6083E-05 | 0% | 5 | 8,4 | 4,3129E-08 |
| metalaxyl | 2,5 | WP | 26,75 | 4,3533E-05 | 21% | 6,5 | 8,2 | 7,4565E-08 |
| metiram | 1,4 | WG | 103,74 | 3,5545E-05 | 6% | 5,2 | 8,3 | 7,607E-08 |
| niclosamide | 2 | WP | 359,60 | 2,901E-05 | NA | - | - | 4,4835E-07 |
| oxamyl | 5,4 | SL | 1095,17 | 2,8858E-05 | 46% | 5,4 | 9 | 9,2343E-08 |
| paraquat | 20 | SC | 2006,40 | 2,613E-05 | 8% | 5,3 | 9,2 | 5,1477E-08 |
| parathion- | 1,00 | SL | 1176,40 | 3,2196E-05 | NA | 5,1 | 7 | 6,1876E-08 |
| penoxulam | 3 | OD | 26,35 | NA | 0% | 6 | 9,4 | NA |
| pretilachlor | 2 | EC | 261,44 | 2,5563E-05 | NA | 4,8 | 6,4 | 2,5905E-07 |
| profenofos | 5 | EC | 563,13 | 5,0292E-05 | NA | 5 | 7,2 | 1,6653E-06 |
| propanil | 2 | EC | 416,15 | 2,6641E-05 | 12% | 5,1 | 7,4 | 5,3347E-08 |
| propiconazole | 0,1 | EC | 93,38 | 3,5193E-05 | 1% | 6,6 | 8,1 | 3,8642E-08 |
| pymetrozine | 0,32 | WG | 126,25 | 2,901E-05 | 1% | 6,5 | 9,4 | 5,8522E-08 |

| | | | | | | | | |
|------------------------|------|----|--------|------------|------|-----|-----|------------|
| pyraclostrobin | 1,2 | SC | 176,80 | 3,5149E-05 | 4% | 6,8 | 9,4 | 3,8363E-08 |
| pyrimethanil | 2 | SC | 68,40 | 3,5149E-05 | 1% | 4,9 | 6,7 | 4,0229E-08 |
| quinclorac | 0,4 | WP | 202,27 | 2,5563E-05 | NA | 4,3 | 7,1 | 4,87E-08 |
| spirotetramat | 1 | OD | 186,90 | 2,6217E-05 | 0% | 6,8 | 9,6 | 5,2954E-08 |
| spiroxamine | 0,4 | EC | 165,76 | 3,5149E-05 | 1760 | 5,1 | 6,8 | 3,8363E-08 |
| tebuconazole | 0,75 | EC | 172,73 | 3,5338E-05 | 28% | 5,8 | 8,6 | 3,9741E-08 |
| teflubenzuron | 0,24 | SC | 199,24 | 2,7366E-05 | 3% | 6,9 | 7,9 | 6,1772E-08 |
| terbufos | 5,4 | FC | 800,72 | 0,00029039 | NA | 4,2 | 5,9 | 3,8766E-07 |
| thiacloprid | 0,5 | SC | 140,42 | 2,6217E-05 | 4% | 6,4 | 9,7 | 5,2954E-08 |
| thiamethoxam | 0,2 | WG | 31,61 | 2,6217E-05 | 11% | 6,6 | 9,5 | 5,2954E-08 |
| thiophanate | 1,5 | OL | 904,40 | 3,5331E-05 | 17% | 5 | 7,7 | 4,2772E-08 |
| thiram | 1,5 | SC | 632,13 | 3,5179E-05 | 21% | 4,8 | 6,6 | 4,7132E-08 |
| triadimenol | 0,25 | EC | 257,03 | 3,6025E-05 | 1% | 7,3 | 9,2 | 3,9477E-08 |
| tricyclazole | 0,3 | WP | 80,24 | 3,6003E-05 | NA | 5,6 | 9,2 | 3,9808E-08 |
| tridemorph | 0,5 | OL | 611,94 | 3,6003E-05 | NA | 4,5 | 5,7 | 6,9947E-07 |
| trifloxystrobin | 1 | OL | 186,90 | 3,6003E-05 | 1% | 6,2 | 8,1 | 3,9331E-08 |
| zoxamide | 0,5 | SC | 74,34 | 2,6217E-05 | 1% | 5,9 | 7,6 | 5,2954E-08 |

Une classification des s.a. les plus impactantes au regard de ces scores a donc été réalisée en considérant les règles de décision suivantes : i) Indicateur IRSA : les s.a. les plus impactantes dont le score est supérieur à 1000, ii) indicateur AOEL (méthode Browse) : score > à 100 %, iii) indicateur ACV Santé Humaine : les s.a. les plus impactantes dont le score est supérieur à 4^{-5} , iv) indicateur I-Phy : score < 7 dans les conditions optimales d'usage (I-Phy max) et v) indicateur ACV Ecosystème : les s.a. les plus impactantes dont le score est supérieur à 1^{-7} . Le **tableau 4** présente les 39 s.a. préoccupantes selon nos règles de décision, en précisant les filières concernées et les indicateurs qui ont permis de les identifier.

Cette classification des substances actives les plus préoccupantes par les indicateurs répertorie 17 fongicides dont 3 s.a. sont identifiées par des indicateurs « santé humaine » et « environnement » (chlorothalonil, fenpropimorphe et spiroxamine). Parmi ces 17 fongicides, 8 sont encore autorisés par l'UE. Toujours parmi ces 17 fongicides, 7 d'entre-eux sont classés CMR (4 CMR1 et 3 CMR2) mais un seul CMR est autorisé dans l'UE (dimethomorphe, CMR1 utilisé par la filière cacao). Toutes les filières sont concernées par l'usage de ces 17 fongicides. De cette classification, 17 insecticides ont aussi été identifiés comme « préoccupants » par les indicateurs, 4 le sont conjointement par les indicateurs « santé humaine » et « environnement » (chlorpyrifos, endosulfan, profenofos et terbufos) ; seulement 2 s.a. sur 17 sont encore autorisés par l'UE. Toutes les filières sont concernées par l'usage de ces insecticides. Enfin, 5 herbicides utilisés en riziculture et en bananeraie ont été identifiés comme préoccupants soit par les indicateurs « environnement » (butachlor, ethoxysulfuron et pretilachlor) soit par les indicateurs « santé humaine » (gluphosinate ammonium et paraquat). Plus aucune de ces s.a. n'est autorisée dans l'UE.

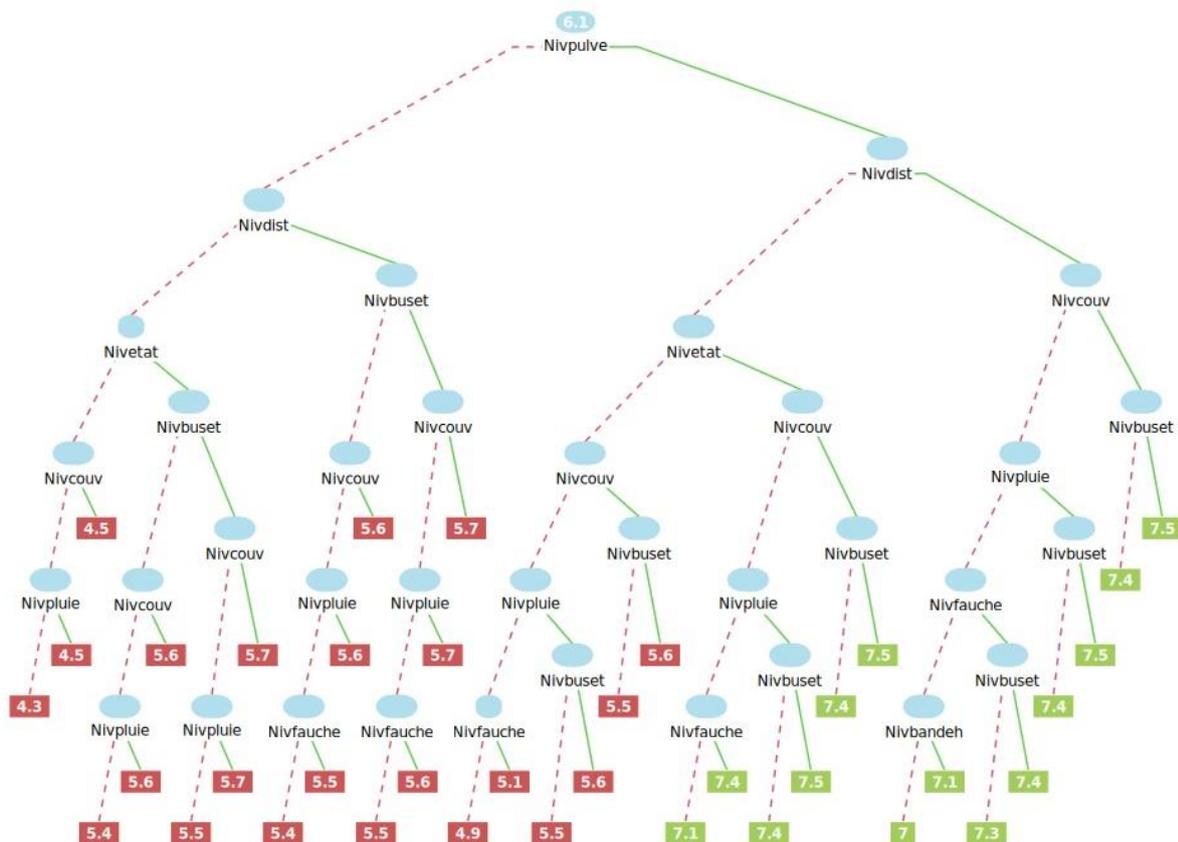
Tableau 4 : Substances actives classées comme les plus impactantes par les indicateurs en fonction des règles de décision ou valeurs seuils. Indicateur IRSA : les 10 s.a. les plus impactantes, Indicateur AOEL (méthode Browse) : score > à 100 %, Indicateur ACV-H (Santé Humaine) : les 10 s.a. les plus impactantes ; Indicateur I-Phy : score < 7 dans les conditions optimales d'usage (I-Phy max) ; Indicateur ACV-E (Ecosystème) : le 9 s.a. les plus impactantes.

| Substance active (s.a.) | Indicateur | Type | filières concernées |
|--------------------------------|------------------|-------------|---------------------------|
| acephate | AOEL | insecticide | cacao, riz, maraîchage |
| azoxystrobine | ACV-H | fongicide | Banane, café, maraîchage |
| benalaxyl | ACV-H | fongicide | cacao |
| benomyl | ACV-H | fongicide | cacao |
| bifenthrine | IRSA, | insecticide | Banane, cacao, maraîchage |
| butachlor | IPHY | herbicide | riz |
| carbendazime | IPHY | fongicide | riz, maraîchage |
| cartap | ACV-E | insecticide | cacao |
| chlorothalonil | IRSA, ACV-E, | fongicide | banane, maraîchage |
| chlorpyrifos | IRSA, ACV-H, | insecticide | banane, cacao, café, riz, |
| cuivre de l'oxychlorure | IRSA, | fongicide | cacao, maraîchage |
| cyproconazole | ACV-H | fongicide | café |
| diazinon | AOEL | insecticide | cacao |
| dimethomorphe | ACV-H | fongicide | cacao |
| endosulfan | IRSA, AOEL, IPHY | insecticide | cacao |
| ethoxysulfuron | IPHY | herbicide | riz |
| fenobucarb | IPHY | insecticide | cacao, riz |
| fenpropathrin | ACV-E, IPHY | insecticide | riz |
| fenpropidine | IPHY | fongicide | banane |
| fenpropimorphe | AOEL, IPHY | fongicide | banane |
| fipronil | IRSA, | insecticide | riz |
| flutriafol | ACV-H | fongicide | banane, café |
| fosthiazate | IRSA, AOEL | insecticide | banane |
| gluphosinate | AOEL | herbicide | banane |
| hexaconazole | IPHY | fongicide | riz |
| isoprocarb | IPHY | insecticide | riz |
| lambda-cyhalothrin | AOEL | insecticide | cacao, maraîchage |
| metalaxyl | ACV-H | fongicide | cacao |
| niclosamide | ACV-E | insecticide | riz |
| oxamyl | IRSA | insecticide | banane |
| paraquat | IRSA | herbicide | banane |
| parathion-methyl | IRSA | insecticide | cacao |
| pretilachlor | ACV-E, IPHY | herbicide | riz |
| profenofos | ACV-H, ACV-E | insecticide | maraîchage |
| pyrimethanil | IPHY | fongicide | banane |
| spiroxamine | AOEL, IPHY | fongicide | banane |
| terbufos | ACV-H, ACV-E, | insecticide | banane |
| thiram | IPHY | fongicide | banane |
| tridemorph | ACV-E, IPHY | fongicide | banane |

Cette classification des s.a. préoccupantes a été réalisée en considérant des scénarios d'utilisation des pesticides maîtrisés et notamment en faisant les hypothèses que les applicateurs respectaient

les « bonnes pratiques phytosanitaires », à savoir : le port d'équipement de protection individuelle (EPI), le respect des doses homologuées, l'utilisation d'un appareil d'épandage régulièrement étalonné, sa bonne utilisation (pression, vitesse d'avancement, débit des buses, hauteur d'application, conditions météorologiques...), le respect des distances de traitement par rapport à des zones sensibles... A titre d'exemple, si ces règles ne sont pas respectées, il conviendrait de considérer les scores I-Phy min au lieu des scores I-Phy max (voir **tableau 3** et **3 bis**) et seules 10 s.a. sur 92 dépasseraient le score-seuil de 7 considérant des risques de transfert « acceptables ». L'arbre de régression de la figure 4 présente l'exemple du mancozèbe avec un I-phy min de 4.3 et un I-Phy max de 7.5, scores variant en fonction de ses conditions d'application.

Figure 4 : I-Phy min est atteint lorsque les conditions d'application ne sont pas optimales : Nivpulve : types de pulvérisateur (par exemple un traitement aérien ou atomiseur), Nivdist : distance à un point d'eau < à 15m, Nivetat : point d'eau en eau, Nivcouv : sol nu, Nivpluie : nombre de jour sans pluie < 3. Voir pour plus d'explication le tutoriel de Phyto'Aide : https://smartis.re/medias/Tutoriel_PhytoAide.pdf



De même, les scores AOEL (Acceptable Operator Exposure Level) et IRSA (Indicateur de Risque pour la Santé Applicateurs) ont été calculés dans des conditions où l'utilisateur portait des équipements de protection individuelle adaptés limitant son exposition. La photo ci-dessous (figure 5) prise en Côte d'Ivoire illustre parfaitement le manque de protection vis-à-vis des pesticides dont font preuve de nombreux producteurs en Afrique¹⁷. Compte tenu de ce qui précède, les scénarios

¹⁷ Ngowi, A. V. F., Mbise, T. J., Ijani, A. S., London, L., & Ajayi, O. C. (2007). Smallholder vegetable farmers in Northern

de notre étude ont donc probablement largement minimisé les risques à la fois pour la santé humaine et pour l'environnement.

Figure 5 : Manipulation de pesticide sans gant ni autres protections individuelles d'un producteur maraîcher de Côte d'Ivoire. Photo Raphaël Belmin, Cirad.



Le **tableau 5** propose une classification sur une échelle qualitative (risque faible (en vert), modéré (en orange) ou fort (en rouge)) des scores des différents indicateurs calculés dans le cadre de notre étude et les confrontent à ceux d'autres indicateurs (Classement CMR et indicateurs environnementaux, d'écotoxicité et de santé humaine de la base PPDB¹⁸). Au total, les résultats de 9 indicateurs peuvent être comparés. Une convergence de risque entre tous ces indicateurs peut être observée notamment pour certaines molécules. Notamment un tiers des 39 s.a. sont identifiées comme à fort risque par au moins 4 indicateurs sur 9. Les 10 s.a. (tableau 5) encore autorisées en Europe ne sont identifiées à fort risque que par au maximum 4 indicateurs et seulement 2 sont classées CMR (diméthomorphe, CMR1 et spiroxamine, CMR2). Le cas du diméthomorphe (fongicide systémique) peut interroger. En effet, il n'est identifié comme à fort risque que par 2 indicateurs sur 9 ; 6 autres le classent cependant comme à risque modéré. Ce que confirme les données de la PPBD : le diméthomorphe présente une faible solubilité dans l'eau et une faible volatilité. Il est modérément persistant dans les sols et les eaux. Les risques pour la biodiversité sont généralement modérés à faibles. Il présente une faible toxicité pour les mammifères mais est irritant. Malgré des risques évalués comme globalement modérés, le classement de cette s.a. a été réévalué récemment (12/2022) et elle a été classée en CMR1 de catégorie 1B, substance présumée toxique pour la reproduction humaine.

¹⁸ Indicateurs PPDB : les règles de décision de cette classification n'ont pas été trouvées et ne sont pas publiées.

Tableau 5 : Représentation qualitative des scores (vert : faible, orange : modéré, rouge : fort) des différents indicateurs de l'étude (IRSA, AOEL, ACV-H, ACV-E et I-Phy), du classement CMR (vert : non classé CMR, orange : CMR2, rouge : CMR1) et des indicateurs proposés par la base de données PPDB (PPDB-Ecotox : Ecotoxicity, PPDB-Envirt : Environmental fate, PPDB Human : Human health). Les scores des indicateurs IRSA, AOEL, ACV-H, ACV-E et I-Phy ont été classés en rouge (substances préoccupantes précédemment identifiées par les règles de décision) ou orange lorsque le score était supérieur à la médiane de l'ensemble des s.a. ; en vert lorsque les scores étaient inférieurs à cette médiane.

| Substances actives (s.a.) | UE | CMR | IRSA | AOEL | ACV-H | PPDB Human | ACV-E | I-PHY | PPDB Envirt | PPDB Ecotox |
|-----------------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|-------------|-------------|
| acephate | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| azoxystrobine | oui | vert | vert | vert | rouge | orange | orange | vert | rouge | orange |
| benalaxyl | oui | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | orange |
| benomyl | non | rouge | orange | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| bifenthrine | non | orange | rouge | orange | vert | rouge | orange | vert | rouge | rouge |
| butachlor | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| carbendazime | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| cartap | non | rouge | rouge | rouge | vert | orange | rouge | vert | rouge | rouge |
| chlorothalonil | non | orange | rouge | vert | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| chlorpyrifos | non | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | orange | rouge |
| cuivre de l'oxychlorure de cuivre | oui | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | orange | orange | rouge |
| cyproconazole | non | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | rouge | rouge |
| diazinon | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| dimethomorphe | oui | rouge | rouge | orange | rouge | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| endosulfan | non | rouge | rouge | rouge | vert | rouge | orange | rouge | rouge | rouge |
| ethoxysulfuron | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| fenobucarb | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| fenpropathrin | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| fenpropidine | oui | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| fenpropimorphe | non | orange | rouge | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| fipronil | non | rouge | rouge | orange | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| flutriafol | non | rouge | orange | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| fosthiazate | oui | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| gluphosinate ammonium | non | rouge | orange | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| hexaconazole | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| isoprocarb | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | rouge | rouge | rouge |
| lambda-cyhalothrin | oui | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| metalaxyl | oui | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| nicosamide | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| oxamyl | non | rouge | rouge | orange | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| paraquat | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| parathion-methyl | non | rouge | rouge | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| pretilachlor | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | rouge |
| profenofos | non | rouge | orange | rouge | rouge | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| pyrimethanil | oui | rouge | rouge | orange | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| spiroxamine | oui | orange | rouge | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| terbufos | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| thiram | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |
| tridemorph | non | rouge | orange | rouge | orange | rouge | orange | orange | orange | rouge |

Nous donnons ci-après une analyse des 5 s.a. dont au moins 5 indicateurs les classent à fort risque pour la santé humaine et pour l'environnement. Il s'agit de 3 insecticides (chlorpyrifos, endosulfan et terbufos) et de 2 fongicides (chlorothalonil et cyproconazole) concernant les 5 filières. Ces 5 s.a. sont aujourd'hui interdites d'utilisation en Europe.

Le chlorpyrifos est classé à fort risque par 5 indicateurs (IRSA, ACV-H, PPDB- Human health, ACV-E et PPDB- Ecotoxicity), à risque modéré par 2 indicateurs (I-PHY et PPDB- Environmental fate) et à faible risque par 2 indicateurs (AOEL et CMR). Le chlorpyrifos est peu soluble dans l'eau, peu mobile et présente donc un faible risque de lessivage dans les eaux souterraines. Il est relativement volatil. Ces comportements dans l'environnement sont en accord avec les scores I-PHY (min : 5 et max : 7.2). Il est également irritant pour la peau et les yeux et toxique en cas d'ingestion (phrase de risque du classement CLP : H301¹⁹) en accord avec le classement à fort risque par l'indicateur IRSA. Par ailleurs, il est hautement toxique pour les mammifères, et classé comme toxique pour la reproduction, inhibiteur de l'acétylcholinestérase et neurotoxique. Il est aussi hautement toxique pour les oiseaux, les poissons, les invertébrés aquatiques et les abeilles et modérément pour les plantes aquatiques, les algues et les vers de terre. Le CLP le classe comme très toxique pour les organismes aquatiques (H400) entraînant des effets néfastes à long terme (H410). Cette écotoxicité le classe comme à risque fort par les indicateurs ACV-H, PPDB- Human health, ACV-E et PPDB- Ecotoxicity. Il est par contre surprenant que cette s.a. ne soit pas considérée comme un CMR1. Le chlorpyrifos est un insecticide organophosphoré à large spectre d'action utilisé par toutes les filières de notre étude alors que des résistances chez certains ravageurs, notamment des cultures maraîchères, sont rapportées (*Bemisia argentifolii*, *Helicoverpa armigera*, *Plutella xylostella*, *Spodoptera litura*...). La s.a. est ancienne et utilisée depuis 1965.

L'endosulfan est classé à fort risque par 6 indicateurs (IRSA, AOEL, PPDB- Human health, I-PHY, PPDB- Environmental fate et PPDB- Ecotoxicity), à risque modéré par l'indicateur ACV-E et à faible risque par 2 indicateurs (ACV-H et CMR). L'endosulfan a une faible solubilité dans l'eau mais est volatil. Ses propriétés chimiques expliquent des risques de transfert importants vers les eaux souterraines, ceci en accord avec les scores I-PHY quel que soit les conditions de son application (I-PHY min : 4.5, I-PHY max : 5.8). Trois des cinq indicateurs santé humaine le classe comme très préoccupant avec les phrases de risque H300 (mortel en cas d'ingestion), H312 (nocif par contact cutané) et H330 (mortel par inhalation). Globalement, il est hautement toxique pour les mammifères, c'est une neurotoxine et peut-être un mutagène. Il est surprenant que cette s.a. ne soit pas considérée comme un CMR1. Il est modérément toxique pour les oiseaux, les abeilles et les vers de terre, mais légèrement plus toxique pour les organismes aquatiques. L'endosulfan est un insecticide/acaricide organochloré utilisé principalement par la filière cacao. De nombreux cas de résistance d'insecte à cette molécule sont rapportés, notamment des pucerons (*Aphis gossypii*, *Myzus persicae*), aleurodes (*Bemisia tabaci*), cécidomyies (*Dasineura tetensi*) ou encore le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*). La s.a. est très ancienne et utilisée depuis 1956.

Le terbufos est classé à fort risque par 5 indicateurs (ACV-H, PPDB- Human health, ACV-E, I-PHY et PPDB- Ecotoxicity), à risque modéré par 2 indicateurs (IRSA et PPDB- Environmental fate) et à faible risque par l'indicateur CMR tandis que le score AOEL n'a pas pu être calculé. Le terbufos est peu soluble dans l'eau, peu mobile et présente donc un faible risque de lessivage dans les eaux souterraines. Par contre il est très volatil particulièrement s'il est appliqué directement sur les plantes

¹⁹ Mention de danger (phrase H) du [règlement \(CE\) n°1272/2008 du 16 décembre 2008](#) dit « CLP » pour « classification, labelling, packaging » : dangers physiques : H200 à H290 ; dangers pour la santé : H300 à H373 ; dangers pour l'environnement : H400 à H420.

ou le sol. Le risque de dérive est préoccupant et des mesures d'atténuation sont recommandées, ce risque est identifié par l'indicateur I-PHY (I-PHY min : 4.2, I-PHY max : 5.9). L'analyse des leviers via cet indicateur (outil d'aide à la décision PHYTO'AIDE) identifie le type de pulvérisateur comme prépondérant pour limiter le risque de dérive de la s.a. vers l'environnement. Trois des cinq indicateurs santé humaine le classent comme préoccupant ou très préoccupant, les phrases de risque H300 (mortel en cas d'ingestion) et H310 (mortel par contact cutané) expliquant ce classement. Par ailleurs, il est hautement toxique pour les mammifères, et classé comme toxique pour la reproduction, inhibiteur de l'acétylcholinestérase et neurotoxique. Il est aussi hautement toxique pour les poissons, les invertébrés aquatiques et les vers de terre. Le CLP le classe comme très toxique pour les organismes aquatiques (H400) entraînant des effets néfastes à long terme (H410). Cette écotoxicité le classe comme à risque fort par les indicateurs ACV-H, PPDB- Human health, ACV-E et PPDB- Ecotoxicity. Le terbufos est un insecticide/nématicide organophosphoré utilisé par la filière banane dans notre étude. La s.a. est ancienne et utilisée depuis 1974. Des cas de résistance d'insecte à cette molécule sont rapportés, notamment pour la chrysomèle maculée du concombre (*Diabrotica undecimpunctata*) et puceron des céréales (*Schizaphis graminum*).

Le chlorothalonil est classé à fort risque par 5 indicateurs (IRSA, PPDB- Human health, ACV-E, I-PHY et PPDB- Ecotoxicity), à risque modéré par 3 indicateurs (ACV-H, PPDB- Environmental fate et CMR) et à faible risque par l'indicateur AOEL. Le chlorothalonil est faiblement soluble dans l'eau et légèrement mobile (érosion) ; globalement il présente un faible risque de lessivage dans les eaux souterraines. Il est par contre volatil avec un risque de dérive préoccupant demandant des mesures d'atténuation, ce risque est identifié par l'indicateur I-PHY (I-PHY min : 4.3, I-PHY max : 5.8). L'analyse des leviers via cet indicateur (outil d'aide à la décision PHYTO'AIDE) identifie le type de pulvérisateur comme important pour limiter le risque de dérive. De même, la distance de traitement à un point d'eau sera également prépondérante pour limiter les transferts de la s.a. vers l'environnement. Trois des cinq indicateurs santé humaine le classe comme préoccupant ou très préoccupant. C'est un irritant reconnu provoquant des allergies cutanées (H317) mais provoque aussi des lésions oculaires graves (H318) et peut irriter les voies respiratoires (H335). Il est mortel par inhalation (H330) et est classé CMR2 comme substances suspectées d'être cancérogènes pour l'homme. En terme d'écotoxicologie, le chlorothalonil a une faible toxicité pour les mammifères, mais son potentiel de bioaccumulation suscite certaines inquiétudes. Il est enfin modérément toxique pour les oiseaux, les abeilles et les vers de terre, par contre il est très toxique pour les organismes aquatiques (H400) entraînant des effets néfastes à long terme (H410). Le chlorothalonil est un fongicide à large spectre utilisé dans les filières maraîchage et banane. La s.a. est ancienne et utilisée depuis 1964.

Le cyproconazole est classé à fort risque par 5 indicateurs (CMR, ACV-H, PPDB- Human health, PPDB- Environmental fate, PPDB- Ecotoxicity), à risque modéré par l'indicateur ACV-E et à faible risque par 3 indicateurs (AOEL, IRSA et I-PHY). Il est modérément soluble dans l'eau mais volatil. En raison de ses propriétés physico-chimiques, le cyproconazole présente un risque élevé de lessivage dans les eaux souterraines, ce que l'indicateur I-PHY n'identifie pas réellement à la différence de l'indicateur PPDB- Environmental fate. Trois des cinq indicateurs santé humaine le classent comme très préoccupant alors que les deux autres le considèrent à faible risque. En tout état de cause, il est classé toxique en cas d'ingestion (H301) avec des risques présumés d'effets graves pour les organes (H373) et des effets sur les fœtus (H360D). Il est d'ailleurs classé CMR1 (catégorie 1B, substances présumées toxiques pour la reproduction humaine). Le cyproconazole peut être persistant dans les sols et les systèmes aquatiques. Le CLP le classe d'ailleurs comme très toxique pour les organismes aquatiques (H400) entraînant des effets néfastes à long terme (H410). Il est par contre modérément toxique pour les mammifères, les vers de terre et les abeilles mais hautement toxique pour les oiseaux. Le cyproconazole est un fongicide couramment utilisé et notamment dans la filière café de notre étude. La s.a. est utilisé depuis 35 ans.

5. Limites de l'étude

Certains biais méthodologiques peuvent d'ores et déjà être avancés. Nous avons fait le choix de comparer les substances actives entre-elles sans distinguer les types d'usages ou même les filières. La liste des substances actives répertoriées dans notre étude représente en elle-même une limite puisqu'elle n'est pas exhaustive (plus d'un millier de substances actives utilisé en milieu agricole)²⁰, des substances actives plus préoccupantes (d'autres filières, d'autres pays...), pourraient modifier le classement que nous proposons. Par ailleurs, les règles de décision appliquées pour identifier les substances préoccupantes de notre liste de 92 substances actives, notamment lorsque les indicateurs ne renseignent pas de valeur seuil de dangerosité (IRSA, ACV), ont minoré la dangerosité de certaines substances notamment dans certaines filières. Par exemple, en appliquant les mêmes règles de décision filière par filière, une substance active comme le mancozeb aurait été classée préoccupante pour les filières banane, cacao et maraîchage. De même, une analyse par type d'usage aurait par exemple classé les herbicides tels l'ethoxysulfuron ou le paraquat comme préoccupant pour les filières riz et banane. Ce choix a été fait car pour justifier une analyse plus fine par filière des données précises sur les pratiques (doses d'usage, matériel d'épandage, position d'application du pesticide, conditions météorologiques, etc.) mais aussi sur le niveau de protection des applicateurs ou encore les conditions pédoclimatiques auraient été nécessaires. Enfin, la fréquence d'utilisation par filière devrait aussi être prise en compte. Par exemple, le mancozèbe fait l'objet de grandes fréquences d'utilisation en banane ce qui devrait largement faire remonter le caractère préoccupant de ce fongicide dans cette filière, et probablement dans d'autres également. Ces données n'étaient pas accessibles pour toutes les filières car dépendantes des données d'enquête qui n'ont pas été menées avec cet objectif. Notre analyse a donc été menée en première intention avec des scénarii d'usage de ces pesticides avec des données globalisées gommant de facto la diversité des situations entre filière mais aussi au sein des filières. Ce choix nous a permis cependant d'évaluer les différentes substances actives dans les mêmes conditions et d'identifier un ensemble de substances actives les plus préoccupantes.

Plus globalement, sur les indicateurs, nous ne constatons une convergence de classement selon la dangerosité des substances actives que pour un tiers des 92 répertoriées. A cet égard, plutôt que de se fier aux résultats d'un seul indicateur ou modèle, nous pensons que notre démarche visant à combiner différents indicateurs à plusieurs niveaux, afin de mieux évaluer les impacts sanitaires et environnementaux des pesticides permet de contrecarrer les limites de chaque indicateur individuellement. Cependant, cela ne doit pas nous empêcher de noter les limites actuelles de ces indicateurs. D'une part, la variable d'entrée des indicateurs est la substance active et ne considère pas la dangerosité des produits de dégradation de ces dernières souvent plus persistantes dans les milieux. D'autre part, les indicateurs ne prennent pas en compte non plus les effets synergiques et/ou cumulatifs des substances actives ni même les effets de la formulation des pesticides et des co-formulants et/ou des adjuvants dans la volatilisation de ceux-ci. Enfin, les connaissances sur les substances actives sont pour certaines imparfaites empêchant le calcul des scores de certains indicateurs (molluscicides et antibiotiques par exemples).

6. Suites possibles des recherches

La poursuite de l'étude pourrait selon nous s'intéresser aux risques par filière, en s'appuyant sur des données réelles de pratiques et d'itinéraires techniques. Cette approche aurait le mérite de caractériser plus finement les risques dans les différents contextes de production et de probablement mieux sensibiliser les acteurs de chaque filière à ces risques.

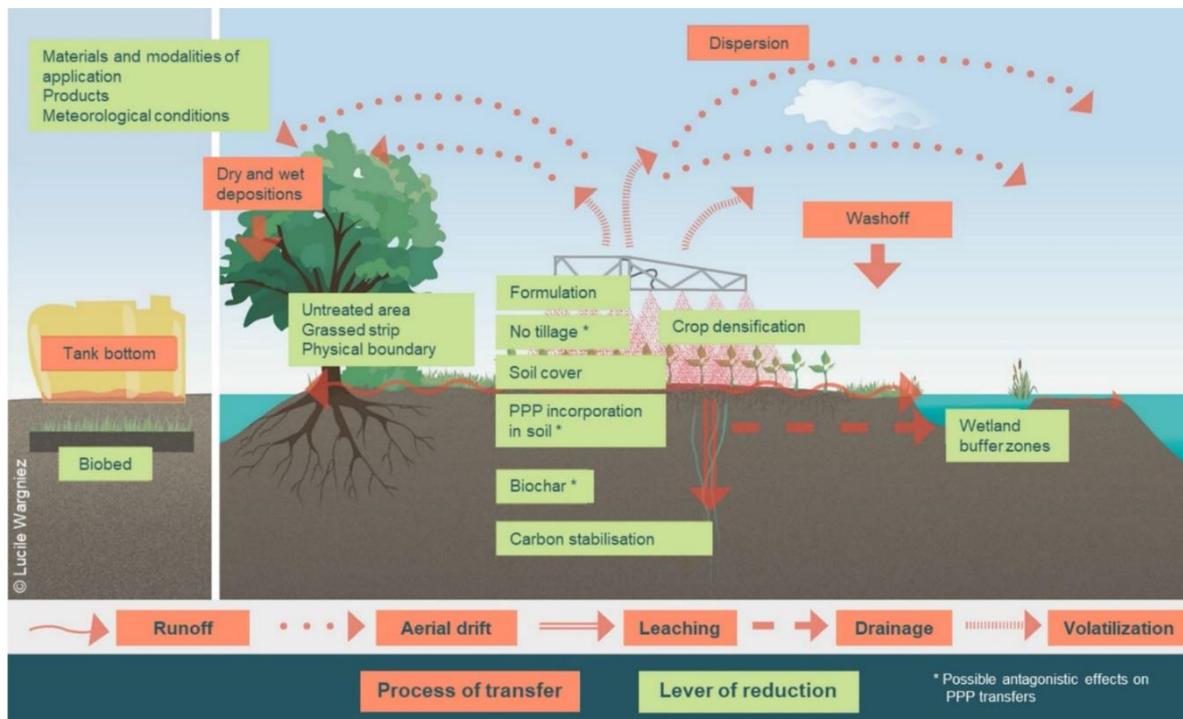
²⁰ Inserm (dir.). Pesticides : Effets sur la santé. Synthèse et recommandations. Synthèse et recommandations. Paris : Les éditions Inserm, 2013, XII-146 p. - (Expertise collective).

Nous précisons également dans la suite de ce document de nouvelles pistes d'études complémentaires.

5.1. LIMITER LES RISQUES DE TRANSFERT DES PESTICIDES

Les producteurs doivent et devront encore faire face à des impasses techniques motivant encore l'utilisation des pesticides. La question du devenir et du transfert des pesticides à l'échelle parcellaire reste donc d'actualité. Dans ce cadre, quelles sont les pratiques agricoles, à portée du producteur, favorisant ou au contraire défavorisant ces transferts ? Il convient de préciser que ces pratiques sont indissociables de l'itinéraire technique qui lui-même influe sur les facteurs importants en matière de transferts comme les quantités de pesticides appliquées, la couverture du sol, la structure du sol ou encore la matière organique du sol. Les voies de transferts ne sont pas uniques et la limitation de l'une peut en favoriser une autre (Tournebize et al., 2024²¹). Cependant, à la parcelle, deux principes généraux peuvent être établis : i) moins vite les pesticides seront en contact direct avec le sol et plus ce sol sera riche en matière organique plus leurs transferts vers les eaux de surface et souterraine seront atténués et ii) plus les pesticides seront appliqués au plus près de leur cible avec des formulations adaptées à l'usage et au bon moment moins ils seront sujets à une dérive dans l'air. Ces deux principes peuvent apparaître évidents car finalement en accord avec les bonnes pratiques agricoles mais, dans la réalité, l'agriculteur subit des contraintes opérationnelles l'empêchant de les appliquer entièrement ayant, in fine, pour conséquence des transferts de pesticides en dehors de sa parcelle (Figure 6).

Figure 6 : Principales voies de transfert des pesticides après application (rectangles oranges) et solutions de réduction des risques de ces transferts (rectangles verts). Figure extraite de Tounebize et al., 2024.



²¹ Tournebize J., Bedos C., Corio-Costet M-F., Douzals J-P., Gouy V., Le Bellec F., Achard A-L., Mamy L., 2024. Prevention and management of plant protection product transfers within the environment: A review. Environmental Science and Pollution Research, in press

La proportion de pesticides transférée vers les différents compartiments environnementaux par rapport à celle appliquée est mal connue. Même s'il s'agit probablement de quelques pourcents ceux-ci suffisent à polluer puisque nul ne peut contredire les pollutions avérées des cours d'eau, du sol et de l'air... (Pesce et al., 2023)²². Notre étude a identifié un certain nombre de substances actives préoccupantes pour lesquelles les risques de transfert des pesticides vers l'environnement pourraient être minimisés par les pratiques culturales. L'indicateur I-PHY et son interface d'aide à la décision Phyto'Aide²³ constitue un outil opérationnel d'accompagnement des producteurs à cet égard apportant des solutions à leur portée pour réduire leur utilisation et minimiser les risques de transfert. Cependant, si les processus de transfert sont plutôt bien caractérisés, la spécificité des situations d'usages notamment liée aux conditions pédoclimatiques tropicales est mal prise en compte et nécessiterait probablement l'ajustement de certains modèles (Basset C., 2016)²⁴. De même, l'impact positif sur la réduction des doses et/ou la réduction de la dérive des nouvelles technologies d'application des pesticides, comme les drones de pulvérisation, doit être conforté afin de les prendre en compte dans les modèles de transfert (Tournebize et al., 2024).

5.2. LIMITER LES RISQUES POUR LA SANTE

Ces nouvelles méthodes d'application questionnent aussi l'exposition des applicateurs, les réduisent-elles réellement ou déportent-elles le risque par une volatilisation plus importante ? En tout état de cause les différents indicateurs mobilisés dans notre étude ont identifié des risques d'exposition aiguë ou chronique confortés par les phrases de danger des substances concernées. La question du port des équipements de protection individuelle (EPI) par les applicateurs des pesticides doit être prioritaire de même que le respect des bonnes pratiques de traitement (proximité d'habitation, exposition passive d'enfants ou d'adultes pendant les traitements, contamination d'eau de consommation à cause de distances de traitement à un point d'eau non respectée...). Le port des EPI par les applicateurs reste un sujet préoccupant car ceux-ci sont peu adaptés aux conditions tropicales, souvent peu accessibles mais surtout très onéreuses. Les modèles IRSA (Indicateur de Risque pour la Santé Applicateurs) et BROWSE (Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure models for plant protection products) prennent bien en compte ces risques pour la santé des applicateurs et/ou riverains exposés à condition d'accéder aux données d'utilisation des pesticides. L'accès à toutes ces données précises est primordial et doit faire l'objet d'une attention particulière pour la suite du projet. Pour faciliter l'accès à ces données d'usage, un outil d'aide à la décision numérique pourrait être développé pour permettre aux producteurs/applicateurs de considérer la dangerosité des produits, de l'emballage du produit aux scores des indicateurs de risque par analyse d'images. Ces données d'usage pourraient alimenter une base de données des usages sur un mode participatif et être accessible via un smartphone.

5.3. COMPLETER L'APPROCHE INDICATEURS PAR DES ECHANTILLONNAGES

Le principal reproche généralement opposé aux indicateurs d'évaluation des risques consiste à dire que leurs scores n'ont pas été validés par des mesures. Cette validation est quasiment impossible tant les situations d'usage sont nombreuses nécessitant des expérimentations de longue durée et très coûteuses. Cependant, des outils alternatifs d'échantillonnage des eaux existent et notamment

²² Pesce S., Mamy L., Sanchez W., et al. 2023. Main conclusions and perspectives from the collective scientific assessment of the effects of plant protection products on biodiversity and ecosystem services along the land-sea continuum in France and French overseas territories. *Environmental Science and Pollution Research* : 16 p.

²³ <https://smartis.re/PHYTOAIDE>

²⁴ Basset C., 2016. Emissions au champ de pesticides vers l'air en conditions tropicales : état de l'art et perspectives de recherche : Ademe, 38.

des échantillonneurs intégratifs passifs (EIP) de type POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler). Ces EIP permettent de caractériser un large éventail de contaminants organiques comme les pesticides ainsi que des résidus médicamenteux. Ces échantillonneurs ont été comparés aux résultats de l'observatoire des pollutions de Martinique (bassin-versant du Galion du dispositif OPALE). L'étude a permis de montrer que l'utilisation d'EIP de type POCIS constitue un substitut pertinent à l'échantillonnage composite hebdomadaire d'eaux du bassin-versant, car il permet de réaliser des échantillons intégratifs stables, facile à stocker et à exporter, avec des limites de détection analytiques *in fine* plus basses en raison de leur caractère intégratif dans le temps. L'utilisation de ces EIP ont même permis de constater la présence de molécules, jusqu'alors non quantifiées dans les suivis de l'observatoire, qui contaminent de façon globale le bassin-versant – c'est notamment le cas du tolyltriazole, utilisé comme agent anticorrosif dans les liquides de refroidissement. Les rejets de station d'épuration d'eau potable pourraient également être responsables de la présence de molécules pharmaceutiques retrouvés lors de ces analyses (carbamazépine, oxazépam, etc.) et destinées à la santé humaine²⁵. S'agissant, de la qualité sanitaire des produits alimentaires, les méthodes d'immunolocalisation d'immunodosage (ELISA) en cours de développement permettront également d'apporter des données fiables sur la contamination des produits alimentaires (ou tout autre matrice) par les pesticides. Même si les outils de diagnostic sont en cours de développement ceux-ci nécessiteront de pouvoir bénéficier d'anticorps fiables, ce qui est le cas aujourd'hui pour quelques substances actives comme le 2-4D, l'atrazine, le glyphosate et l'AMPA et l'acétamipride et en cours pour la chlordécone et ses produits de dégradation (projet FEROCE-France2030).

7. Documents consultables

- Le Bellec, F et al. (2025). Base de données des usages des pesticides de synthèse et indicateurs de risques associés. <https://agritrop.cirad.fr/612156/>
- Ruf F., Kiendré J., Galo A., Kra N., Gnangon E., N'Guessan C., Kouakou H., Dorgeles, 2024. Base de données « Intrants chimiques et organiques cacao Côte d'Ivoire 2012-2022 » (Base de données). CIRAD, Montpellier, France.

²⁵ Le Bellec F. (coord.), Espinasse F. (coord.), André P., Andrieu N., Beillouin D., Bourgeois R., Catherine Y., Cattan P., Cerdan C., Darnaudery M., Dorel M., Dorey E., Fréguin-Gresh S., Goebel R., Lemeilleur S., Mottes C., Poser C., Parrot L., Pak L-T., Ripoché A., Sourisseau J-M., 2024. Rapport final d'exécution du projet Territoires Durables. CIRAD, Montpellier, 127 p.