

Utilisation de l'indicateur I-PHY comme outil d'aide à la décision en verger d'agrumes à la Réunion - Le cas de la lambda-cyhalothrine

Le Bellec F.¹, Vélu A.¹, Le Squin S.², Michels T.¹

¹CIRAD, UR HortSys, Station de Bassin-Plat, B.P. 180, F-97455 Saint-Pierre Cedex, Ile de la Réunion,

² CIRAD, UMR PVBMT, Pôle de Protection des Plantes, 7 chemin de l'Irat, F- 97410 Saint-Pierre, Ile de la Réunion

Correspondance : lebellec@cirad.fr

Résumé

I-PHY de la méthode INDIGO® est un indicateur qui permet d'évaluer les impacts des pesticides sur l'environnement à l'échelle de la parcelle. Basé sur un système expert, il prend en compte les caractéristiques des substances actives (sa), de la parcelle et les conditions d'application. Il renvoie un score I-PHYsa sous la forme d'une note sur 10. Dans ces conditions, I-PHY est un indicateur robuste dont les résultats permettent d'identifier des pratiques à risque pour l'environnement. Cependant, le simple résultat sous la forme d'un score ne fait pas pour autant d'I-PHY un outil d'aide à la décision en l'état. Nous proposons dans cet article d'utiliser les marges de progrès entre les différents scores (I-PHY min et max) pour construire des arbres de régression permettant d'identifier les variables à l'origine du score et d'utiliser I-PHY comme outil d'aide à la décision. A titre d'illustration de notre méthode, nous avons étudié les risques environnementaux liés à l'usage de la lambda-cyhalothrine chez trois producteurs d'agrumes à la Réunion. Cette analyse nous a permis d'identifier les leviers techniques mobilisables par ces producteurs.

Mots-clés : indicateur agri-environnementaux, pesticide, évaluation, arbre de régression, aide à la décision.

Abstract: Use of I-PHY indicator as a decision tool in citrus orchards in the Reunion Island- The case study of lambda-cyhalothrin

I-PHY, from the INDIGO® method, is an indicator which makes it possible to estimate pesticide impacts on the environment, at a field scale. Based on an expert system, it takes into account the features of the active ingredient (ai), the features of the plot into account and the conditions of application. It gives a score ranging from 0 and 10. Under these conditions, I-PHY is a robust indicator; its results allow the identification of practices generating environmental risk. However, its simple result, in the form of a score, does not mean that I-PHY is already a decision aid tool. In this paper, we suggest the use of the progress margin between the different scores (I-PHYai min and max) in order to develop regression trees, which would allow the use of I-PHY as a decision aid tool. As an example of our method, we studied the environmental risks linked with the use of the lambda-cyhalothrin with three citrus growers in Reunion Island. This analysis made it possible to identify the technical levers available to these producers thanks to the establishment of the decision trees specific to their situations.

Keywords: environmental risk indicator, pesticide, assessment, regression tree, decision tool.

Introduction

Même si les pesticides permettent de lutter efficacement contre les principaux bio-agresseurs des cultures, leur usage est de plus en plus décrié. En effet, de nombreuses études ont montré les effets secondaires et néfastes de leur utilisation notamment sur la santé humaine ou animale (Bolognesi et Merlo, 2011 ; Landau-Ossondo *et al.*, 2009 ; Séralini *et al.*, 2012) ou encore sur l'environnement (Floch *et al.*, 2011 ; Pedlowski *et al.*, 2012 ; Reichenberger *et al.*, 2007). En écho, le plan national 'Ecophyto' (<http://agriculture.gouv.fr/ecophyto>), mis en place par le ministère de l'agriculture et de la pêche, a pour objectif d'identifier, de concevoir et de diffuser des systèmes de production économes en intrants, de façon à réduire durablement l'usage des pesticides sur le territoire national. L'indice de fréquence de traitement (IFT) a été retenu comme indicateur de mesure de ces usages à l'échelle de la parcelle. L'IFT comptabilise le nombre de doses homologuées de pesticides utilisées sur un hectare au cours d'une campagne mais il ne considère pas les caractéristiques de ce pesticide et encore moins son devenir dans l'environnement. Or, si l'intention de réduire les doses épandues est louable, la prise en compte de la molécule utilisée n'en n'est pas moins importante. En effet, une réduction des doses épandues accompagnée d'une substitution des pesticides par d'autres plus efficaces mais peut-être plus dangereux, pourrait impacter plus gravement l'environnement.

De nombreux indicateurs ont été développés pour prédire ou évaluer les risques liés à l'usage des pesticides sur l'environnement (Bockstaller *et al.*, 2009). Ces outils et méthodes permettent notamment de fournir aux utilisateurs des informations simples qui leur permettent de prendre les décisions appropriées en vue de la réalisation de leurs objectifs (Mitchell *et al.*, 1995). Ces indicateurs agrègent plus ou moins de variables et considèrent plus ou moins les conditions d'application (Devilliers *et al.*, 2005). Reus *et al.* (2002) ont comparé les résultats apportés par huit indicateurs développés en Europe et concluent que la plupart des indicateurs testés, bien que de construction différente, prédisent des risques de transfert des pesticides vers l'environnement globalement concordants. Cependant, certains de ces indicateurs sont plus sensibles et notamment considèrent mieux les pratiques agricoles et les conditions d'application. C'est en particulier le cas d'I-PHY de la méthode INDIGO® (Bockstaller et Girardin, 2006), indicateur que nous avons retenu pour notre étude. Cet indicateur évalue les risques de transfert des pesticides sur trois compartiments de l'environnement : les eaux de surface, les eaux souterraines et l'air. Les variables prises en compte sont liées aux caractéristiques de la substance active, au contexte agro-environnemental de la parcelle (conditions climatiques, caractéristiques du sol et aménagement de la parcelle) et aux conditions d'application. Les méthodes d'agrégation utilisées dans ce type d'indicateurs rendent difficile la démarche qui consiste à traduire le score obtenu en préconisation.

Dans le cadre de nos travaux, nous proposons de nous appuyer sur une analyse de l'indicateur I-PHY et sa version adaptée à la culture des agrumes (Boullenger *et al.*, 2004) pour déterminer l'influence de chaque variable. Notre démarche est basée sur l'analyse des gains obtenus sur le score de cet indicateur, en fonction des valeurs des variables constitutives et de leurs interactions. Cette approche permet de sélectionner et de hiérarchiser les variables en fonction de leur poids sur le score. Elles deviennent alors autant de leviers techniques sur lesquels les producteurs, en connaissance de cause, pourront porter leurs efforts pour réduire les impacts environnementaux à l'échelle de leur parcelle. Cette analyse porte sur les risques liés à l'usage d'un insecticide, la lambda-cyhalothrine, une des rares molécules homologuées sur les cultures fruitières pérennes tropicales (Agrumes et manguier). Cette analyse a été réalisée chez trois agrumiculteurs impliqués dans un projet de recherche & développement financé dans le cadre du FEADER Réunion, projet ECOFRUT (nouveaux systèmes de culture ECOlogiques et durables pour des productions FRUitières de qualité en milieu Tropical). Notre objectif est de les aider à identifier les leviers techniques qui permettent de limiter les pollutions de l'environnement liés à l'usage de cet insecticide sur leur parcelle.

1. Matériels et Méthodes

I-PHY est un indicateur d'évaluation environnementale des impacts liés à l'utilisation de pesticides sur la parcelle (Bockstaller et Girardin, 2006). Cet indicateur attribue un score sur une échelle qualitative de 0 à 10 sur laquelle des scores supérieurs à 7 sont 'environnementalement' acceptables. Ce score est construit par des agrégations successives de variables selon des règles de décision définies à dire d'experts (Van der Werf et Zimmer, 1998). I-PHY agrège 28 variables d'entrée simples au sein de 4 modules de risque ('Eau Souterraine', 'Eau de Surface', 'Air' et 'Dose') (figure 1). Chaque module comprend de 1 à 5 variables simples (comme la DT50) ou composées (comme le 'Potentiel de dérive' du module 'Eau de Surface'). Ces variables composées proviennent de l'agrégation de variables d'entrée simples, ce sont généralement des variables qualitatives transformées à dire d'experts en variables quantitatives après agrégation entre elles. Par exemple, les variables constituant le 'Potentiel de dérive' du module 'Eau de Surface' agrège 3 variables d'entrée simples (la position d'application du pesticide, la distance du traitement à un point d'eau et l'état de ce point d'eau au moment du traitement) ; les différentes combinaisons de ces 3 variables sont ensuite positionnées à dire d'experts sur une échelle de risque de 0 (risque important) à 1 (risque faible). Notons que certaines variables d'entrée simples peuvent être utilisées dans plusieurs modules.

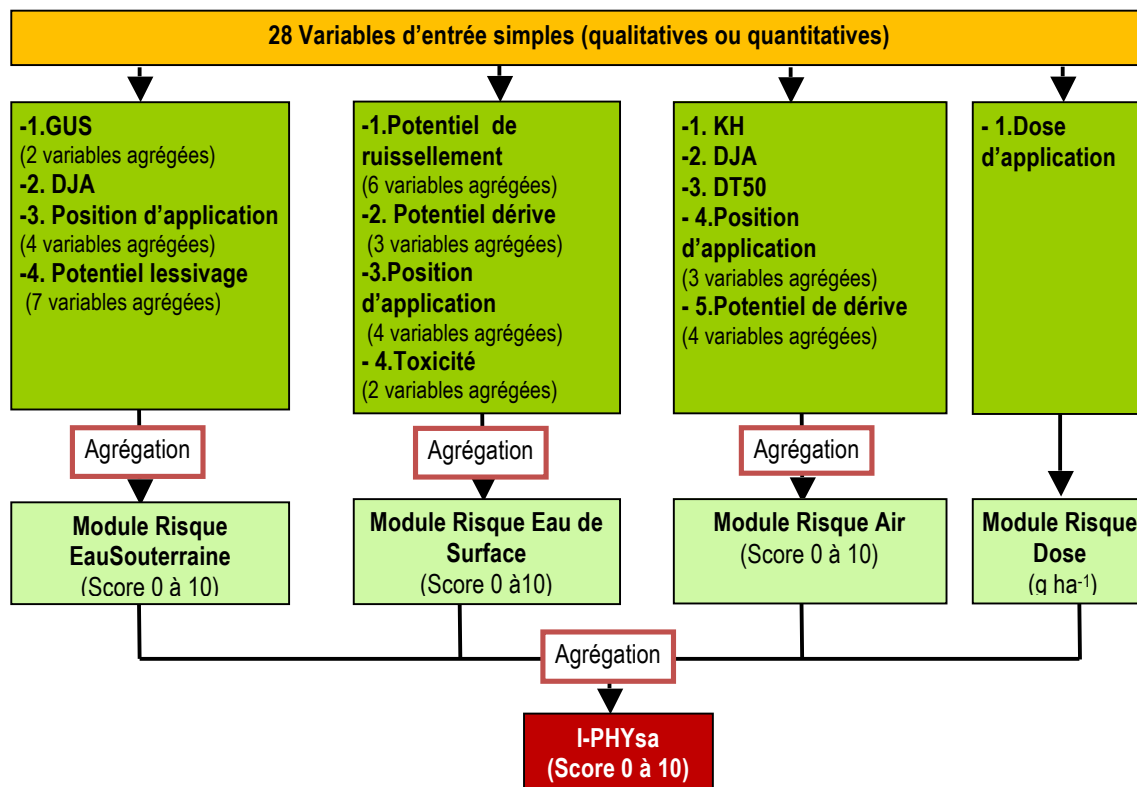


Figure 1 : Structuration d'I-PHY avec agrégation des variables. Un module de risque agrège plus ou moins de variables d'entrée simples et en plus ou moins d'étapes. Finalement, les 3 scores de 0 à 10 des 3 modules environnementaux (Eau Souterraine, Eau de Surface et Air) et la dose d'application sont agrégés pour donner un score I-PHYsa (substance active) sur une échelle de 0 à 10 pour laquelle les scores supérieurs à 7 sont 'environnementalement' acceptables.

Les variables simples ou composées des modules de risques environnementaux (Eaux et Air) sont ensuite agrégées entre elles pour donner un score de risque sur une échelle de 0 (risque important) à 10 (risque faible). Cette agrégation est réalisée en plusieurs étapes.

Premièrement, à chacune des variables simples ou composées sont attribuées des valeurs favorable et défavorable prises par cette variable déterminant ainsi deux limites de classes : une classe favorable (1)

et une classe défavorable (0). Le concept de logique floue, issu de la théorie des ensembles flous développée pour traiter l'incertitude du langage naturel (Zadeh, 1965), permet ensuite de calculer, en fonction de la valeur de la variable, un degré d'appartenance à l'une des classes dans l'intervalle [0 ; 1]. Ce calcul utilise, dans le cas d'I-PHY, une fonction sigmoïdale ; un exemple de ce calcul est fourni sur la Figure 2.

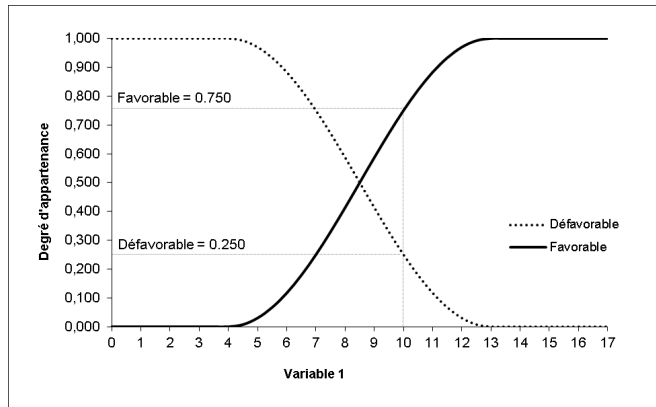


Figure 2 : Exemple de calcul du degré d'appartenance (classes favorable et défavorable) pour une variable par la logique floue. Dans cet exemple, les limites favorable et défavorable de la variable 1 sont respectivement 13 et 4. Ainsi pour une valeur 10 de cette variable 1, les degrés d'appartenance sont respectivement 0.750 pour la classe favorable et 0.250 pour la classe défavorable selon les fonctions sigmoïdales considérées.

Deuxièmement et indépendamment de la première étape, des règles de décision (de type 'Si'... 'Alors'...) permettent de déterminer une valeur de conclusion (un score de 0 à 10 dans le cas d'I-PHY) à toutes les combinaisons possibles des conditions favorables et défavorables des différentes variables agrégées entre elles. Le Tableau 1 reprend les règles de décision de l'agrégation des 3 modules de risques environnementaux et du module de risque dose d'I-PHY.

Enfin, la dernière étape permet de calculer le score final de l'indicateur par la méthode d'inférence de Sugeno (Sugeno, 1985). Cette méthode met en relation les degrés d'appartenance aux classes favorables et défavorables des variables agrégées et les conclusions des règles de décision précédemment définies selon la formule :

$$I\text{-PHY} = \frac{\sum \text{conclusion de la règle} * \min(\text{degrés d'appartenance des prémisses de cette règle})}{\sum \min(\text{degrés d'appartenance des prémisses de chaque règle})}$$

Nous utiliserons ce score agrégé pour notre étude que nous nommons I-PHY_{sa} (substance active). Les 28 variables nécessaires au calcul de ce score sont liées aux caractéristiques de la substance active utilisée, aux caractéristiques du milieu receveur de ce pesticide (terrain), ainsi qu'aux conditions d'application de cette substance active (climat, aménagement de la parcelle, type de pulvérisateur...). Nous avons regroupé ces différentes variables en trois catégories : i) variables caractérisant les sols de notre étude, ii) variables caractérisant la substance active étudiée et iii) variables de création de scénarios d'utilisation de la substance active.

Tableau 1 : Règles de décision de l'agrégation des 3 modules de risques environnementaux et du module de risque dose d'I-PHY en fonction de leurs conditions favorable (F) ou défavorable (D). La conclusion de chacune des règles conduit à un score de 0 à 10.

Risque Eau Souterraine	Risque Eau de Surface	Risque Air	Risque Dose	Conclusion de la règle
F	F	F	F	10
F	F	F	D	9
F	F	D	F	7
F	F	D	D	2
F	D	F	F	7
F	D	F	D	2
F	D	D	F	6
F	D	D	D	1
D	F	F	F	7
D	F	F	D	2
D	F	D	F	6
D	F	D	D	1
D	D	F	F	6
D	D	F	D	1
D	D	D	F	5
D	D	D	D	0

1.1 Variables caractérisant les sols du site d'étude

I-PHY prend en compte 6 variables caractérisant le sol : type de sol, profondeur du sol, pH, taux de matière organique, absence/présence d'argile gonflante et pente. Le Tableau 2 reprend les caractéristiques des sols étudiés correspondant à trois parcelles d'agrumes appartenant chacune à l'un des trois producteurs réunionnais retenus.

Tableau 2 : Caractéristiques des sols étudiés nécessaires au calcul du score d'I-PHY

Caractéristiques	Sol 1	Sol 2	Sol 3
Type de sol	Limoneux	Argileux	Limoneux
Profondeur du sol	60-90 cm	30-60 cm	90-120 cm
pH	6.5	6.5	5.1
Matière organique (%)	4.5	4	8
Argile gonflante	non	non	non
Pente	0-2 %	5-10 %	2-5 %

1.2 Caractéristiques de la substance active étudiée

Cette étude porte sur l'utilisation de la lambda-cyhalothrine. Cet insecticide à spectre large d'action est autorisé (<http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>) sur la culture des agrumes pour lutter contre deux ravageurs de la culture : les pucerons et la teigne des fleurs. I-PHY prend en compte six variables caractéristiques de la substance active : le KH, la DT50, la DJA, l'Aquatox, le GUS ($=\log_{10}(DT50) \times [4 - \log_{10}(Koc)]$) et la dose homologuée. Ces variables ont été extraites de la base FOOTPRINT (FOOTPRINT, 2013) et sont renseignées dans le Tableau 3. Notre étude ne porte pas sur les produits de dégradation éventuels de la lambda-cyhalothrine. De même, son association avec d'autres substances actives, comme c'est le cas dans certains produits commerciaux, n'est pas considérée.

Tableau 3 : Caractéristiques de la lambda-cyhalothrine et classes de valeurs des conditions favorable, défavorable et intermédiaire (logique floue) considérées dans le calcul du score d'I-PHY (Van der Werf et Zimmer 1998).

Substance active	KH (25°C) (Pa m ³ mol ⁻¹)	DT50 (jours)	DJA (mg kg ⁻¹ jour ⁻¹)	Aquatox (mg l ⁻¹)	GUS	Dose testée
lambda-cyhalothrine	4,00E-02	25	5,00E-03	3,60E-04	-1,67	13 g ha ⁻¹
Classe favorable	>2.63E-6	<1	>1	>100	< 1.8	
Classe défavorable	>2.63E-4	>30	<0	<0.01	>2.8	
Logique floue]2.63E-6 ; 2.63E-6[]1 ;30[]0 ;1[]0.01 ; 100[]1.8; 2.8[

1.3 Création de scénarios d'utilisation des substances actives

Dans le cadre de notre étude, sur les 28 variables nécessaires au calcul du score d'I-PHY_{sa}, 12 d'entre-elles sont connues. Il s'agit des variables caractérisant les sols et la substance active. Les 16 autres variables (Tableau 4) portent sur l'état du milieu ainsi que sur les choix de matériel de traitement et de son entretien. Des scénarios théoriques d'utilisation de la substance active sont donc créés à partir de ces variables pour rendre compte de la diversité des conditions d'application possibles. Chaque variable y prend deux valeurs seuils : défavorable (1) ou favorable (2). Ces valeurs seuils ont été déterminées lors de la construction de l'indicateur I-PHY et sont données dans le Tableau 4. Ce tableau (colonne 4) renseigne également sur les possibilités d'action du producteur pour atteindre les conditions favorables de chacune de ces variables selon une échelle qualitative (aucune marge de manœuvre, marge de manœuvre possible, marge de manœuvre totale). Deux variables de caractéristiques de matériels utilisés (n° 13 et 14, Tableau 4) sont utilisées avec leur valeur seuil favorable. Cette valeur représente des conditions réglementaires de bonnes pratiques agricoles que tout producteur doit respecter. L'insecticide étudié n'étant appliqué que sur la plante (à la différence de certains autres qui pourraient l'être aussi au sol), nous avons bloqué la variable n°15 'position d'application' sur la pratique réelle. Enfin, la variable (n°16), 'présence de drain' a été testée avec sa valeur seuil favorable, car c'est une pratique rare à la Réunion compte tenu des pentes des sols. Nous avons donc construit nos scénarios d'utilisation de la lambda-cyhalothrine avec les 12 variables restantes. Les données et scénarios ont été enregistrés et traités dans une base de données développée sous le logiciel Access® (Microsoft Corporation 2010).

1.4 Analyse des scores d'I-PHY_{sa}

L'objectif de l'analyse statistique est de déterminer les variables les plus influentes sur le score I-PHY_{sa} afin d'identifier les principaux leviers techniques à disposition du producteur pour réduire les risques de pollution liés à l'usage de la lambda-cyhalothrine sur sa parcelle.

Le jeu de données comprend 4096 scénarios d'utilisation représentés par deux valeurs pour chacune des 12 variables, répétés pour les trois sols, soit 12888 scores d'I-PHY_{sa} (2¹² x 3). Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (2012, version 2.15.2).

Tableau 4 : Liste des 16 variables nécessaires au calcul du score d'I-PHY selon les scénarios d'utilisation testés. Les abréviations des variables, leurs classes de valeurs des conditions favorable, défavorable et intermédiaire (logique floue) considérées dans le calcul du score (Van der Werf et Zimmer 1998) ainsi que la possibilité d'action du producteur sur cette variable sont renseignées. Les variables 13, 14, 15 et 16 ont été bloquées sur leur valeur de classe favorable pour limiter le nombre de scénarios soit parce qu'il s'agit de bonnes pratiques agricoles (13 et 14) soit qu'elles ne varient pas en fonction des conditions locales (15 et 16).

Variables	Abréviation	Classe favorable	Classe défavorable	Possibilité d'action
1. Le sol est-il filtrant ?	Filtrant	Non	oui	aucune
2. Distance de la parcelle à un point d'eau	Dist-eau	> 15 m	< 5 m	partielle
3. Etat du point d'eau	Etat-eau	Sec	En eau	partielle
4. Saison du traitement	Saison	Sèche	Humide	partielle
5. Nombre de jours sans pluie (>5mm)	Pluie	>DT50	0	partielle
6. Type de couverture du sol	Couv-sol	total	Sol nu	totale
7. Taux de couverture du sol (%)	Couv-%	100	0	totale
8. Nombre de décade sans fauche avant le traitement	Fauche	>4	< 1	totale
9. Nombre de décade sans désherbage avant le traitement	Désherbage	>4	< 1	totale
10. Bande enherbée non cultivée en bas de parcelle (m)	Bande-enherbée	>12	< 6	totale
11. Mode d'application	Mode	Lance	Atomiseur	totale
12. Type de buse du pulvérisateur	Buse	Autres buses	Fente classique	totale
13. Cache anti-dérive		<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>totale</i>
14. Entretien du matériel		<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>totale</i>
15. Position d'application du pesticide	<i>Position</i>	<i>Sur la plante</i>	<i>Dans le sol</i>	<i>totale</i>
16. Présence de drain		<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>totale</i>

Notre analyse comprend deux étapes. La première a consisté à étudier les gains pour chaque variable. Ce gain correspond à la différence des scores I-PHYsa entre deux scénarios où seule change la valeur de la variable étudiée (condition favorable/défavorable). Cette étude est réalisée pour chaque variable et pour chaque sol. Elle permet de déterminer les variables qui n'ont aucune influence sur le score I-PHYsa et de les exclure de l'étape suivante. La seconde étape a consisté à visualiser la hiérarchisation des variables suivant leur influence et leurs interactions grâce à la construction d'arbres de régression par la méthode CART (Breiman *et al.*, 1984) du package 'rpart' de R. L'arbre est construit selon une procédure itérative qui permet de rechercher, pour chaque variable explicative, une règle de division binaire (ici, condition favorable ou défavorable) permettant de partager les observations initiales en deux sous-ensembles. Les sous-ensembles sont appelés des nœuds. La meilleure division est celle qui minimise la somme des déviations intra-classes des nœuds fils. On réitère cette procédure aux deux nœuds fils obtenus, jusqu'à obtention de sous-ensembles ayant très peu d'observations. L'arbre complet obtenu étant trop complexe, il est ensuite élagué selon un critère de pénalité pour obtenir l'arbre final. L'importance de chacune des variables dans la construction de l'arbre final a été ramenée à un indice entre 0 et 100 pour faciliter sa lecture.

2. Résultats et discussion

Les scores I-PHYsa moyens, minimum (min) et maximum (max) des 4096 scénarios testés sur les trois sols sont donnés dans le Tableau 5. Les scores moyens varient peu d'un sol à l'autre, de 6.24 à 6.32 sur l'échelle de 0 à 10. L'analyse des scores I-PHYsa min et max permet de préciser ces résultats. En effet, les scores I-PHYsa min correspondent au scénario où toutes les variables sont dans leurs conditions défavorables à savoir les plus mauvaises conditions d'application de la substance active. A l'inverse, les scores I-PHYsa max correspondent au scénario où toutes les variables sont dans leurs conditions favorables à savoir les meilleures conditions d'application de la substance active. La différence entre les scores I-PHYsa max et I-PHYsa min permet de mesurer la marge de progrès possible du producteur. Les meilleurs scénarios d'utilisation de la lambda-cyhalothrine chez les trois producteurs de l'étude conduisent à un score maximum de 6.96. Ce score est proche du score 'acceptable' déterminé par les auteurs de l'indicateur I-PHY, soit 7. De moins bonnes conditions d'utilisation de la lambda-cyhalothrine conduisent à des scores I-PHYsa faibles compris entre 4.48 et 4.95. Les marges de progrès (gains) pour chacun des producteurs sont donc possibles, entre 2 et 2.48 points. Par conséquent, il s'agit ici d'identifier les leviers techniques permettant d'atteindre ces gains.

Tableau 5 : Scores I-PHYsa moyens, minimums (min) et maximums (max) des 4096 scénarios testés lié à l'utilisation de la lambda-cyhalothrine sur 3 sols de trois producteurs d'agrumes à la Réunion. I-PHY attribue un score sur une échelle qualitative de 0 à 10 où le score 7 et plus est à atteindre pour limiter les risques de pollution par la substance active.

Producteurs	I-PHYsa min	I-PHYsa max	marge de progrès (gains)	I-PHYsa moyen (écart type)
Sol 1	4.95	6.96	2.01	6.32 (\pm 0.77)
Sol 2	4.48	6.96	2.48	6.24 (\pm 0.80)
Sol 3	4.49	6.96	2.47	6.25 (\pm 0.80)

La hiérarchisation des 12 variables testées dans les scénarios d'utilisation de la lambda-cyhalothrine en fonction de leur impact sur le score de l'indicateur est présentée pour les trois sols confondus dans le Tableau 6. Les deux principales variables d'importance sont la distance de la parcelle traitée à un point d'eau (Dist-eau) et son état (Etat-eau). Sur l'index 0 à 100, celles-ci sont respectivement placées à 100 et 99.58. La troisième variable d'importance, la variable mode d'application (Mode), est classée à 6.25. Toutes les autres variables sont classées en dessous de 1.5 sur l'index. Deux variables (Saison et Filtrant) n'ont aucun impact sur le score d'I-PHYsa (index à 0).

Tableau 6 : Hiérarchisation des variables selon un index de 0 à 100 en fonction de leur impact sur la construction du score d'I-PHYsa (lambda-cyhalothrine) chez les 3 producteurs.

Variables	Index (0 à 100)	Variables	Index (0 à 100)
A : Bande enherbée	0,41	G : Fauche	0,35
B : Type de buse	0,41	H : Filtrant	0
C : Désherbage	0,37	I : Couv-%	0,38
D : Couv-sol	1,43	J : Pluie	1,20
E : Dist-eau	100	K : Mode	6,25
F : Etat-eau	99,58	L : Saison	0

La distribution des gains du sol 1 se différencie de celles des sols 2 et 3 même si globalement les trois variables principales (Dist-eau, Etat-eau et Mode) expliquent la plupart de ces gains (Figure 3). Les arbres de régression illustrent plus précisément cette distribution des gains. Le nombre de nœuds de ces arbres est lié au nombre de variables impliquées dans sa construction. L'arbre du sol 1 (Figure 4) comprend 39 nœuds contre 57 pour les arbres des sols 2 (Figure 5) et 3 (Figure 6). Les gains de l'arbre du sol 1 sont expliqués par six variables (Dist-eau, Etat-eau, Mode, Désherbage, Buse et Couv-%) tandis que ceux des arbres des sols 2 et 3 sont expliqués par huit variables (Dist-eau, Etat-eau, Mode, Pluie, Bande enherbée, Buse, Désherbage et Couv-sol). Ces variables et leur hiérarchisation dans l'arbre sont autant de leviers techniques sur lesquels les producteurs peuvent agir pour diminuer les risques de pollution. Leur ordonnancement diffère d'un arbre à l'autre du moins entre l'arbre du sol 1 et les 2 autres - les arbres des sols 2 et 3 sont en effet de construction quasiment identique (seule une variable est intervertie à l'extrémité des arbres). En conséquence, dans le cas du sol 1, des conditions favorables des variables 'Etat-eau' + 'Mode' + 'Buse' conduisent au score I-PHYs max (6.96) (Figure 4), tandis que, pour les sols 2 et 3, ce sont des conditions favorables des variables 'Etat-eau' + 'Mode' + 'Couv-sol' + 'Buse' qui y mènent (Figures 5 et 6).

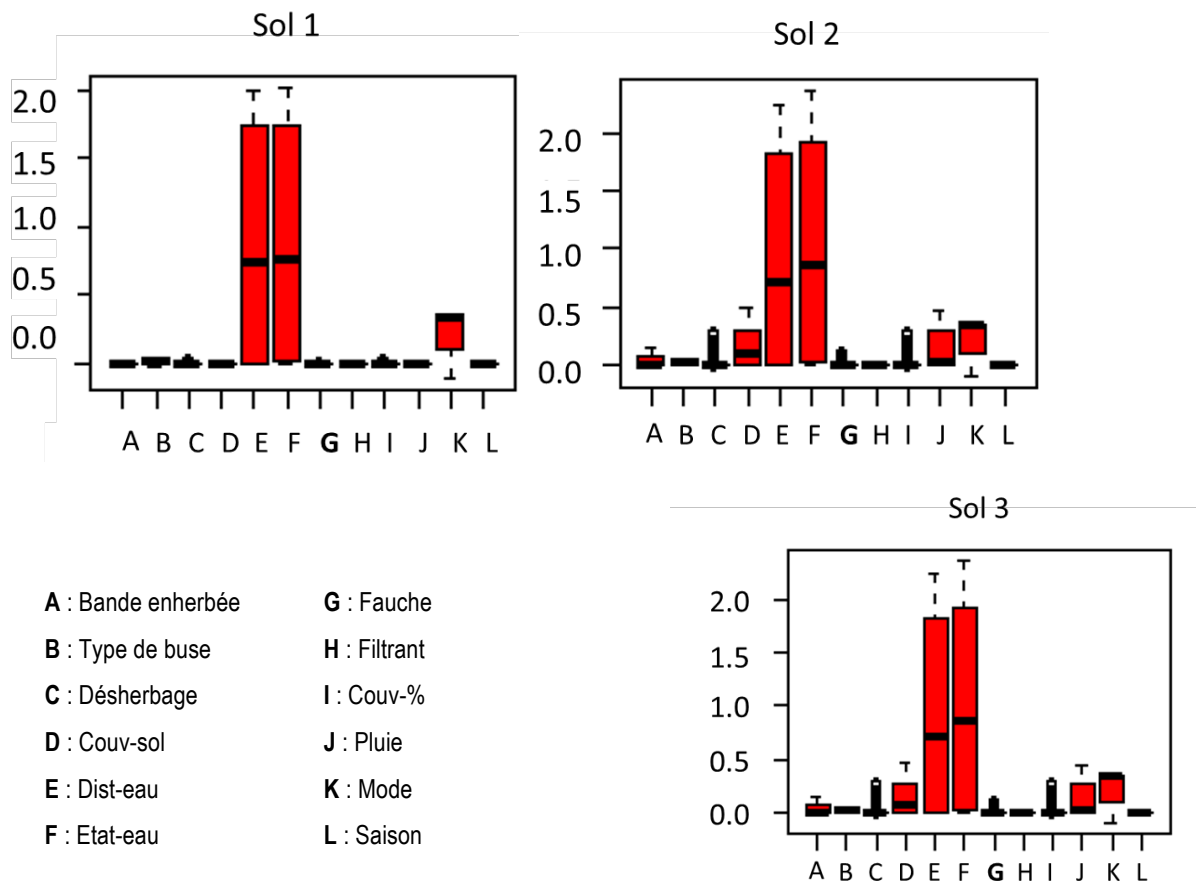


Figure 3 : Gains sur le score d'IPHY en fonction des conditions favorables des différentes variables chez les 3 producteurs

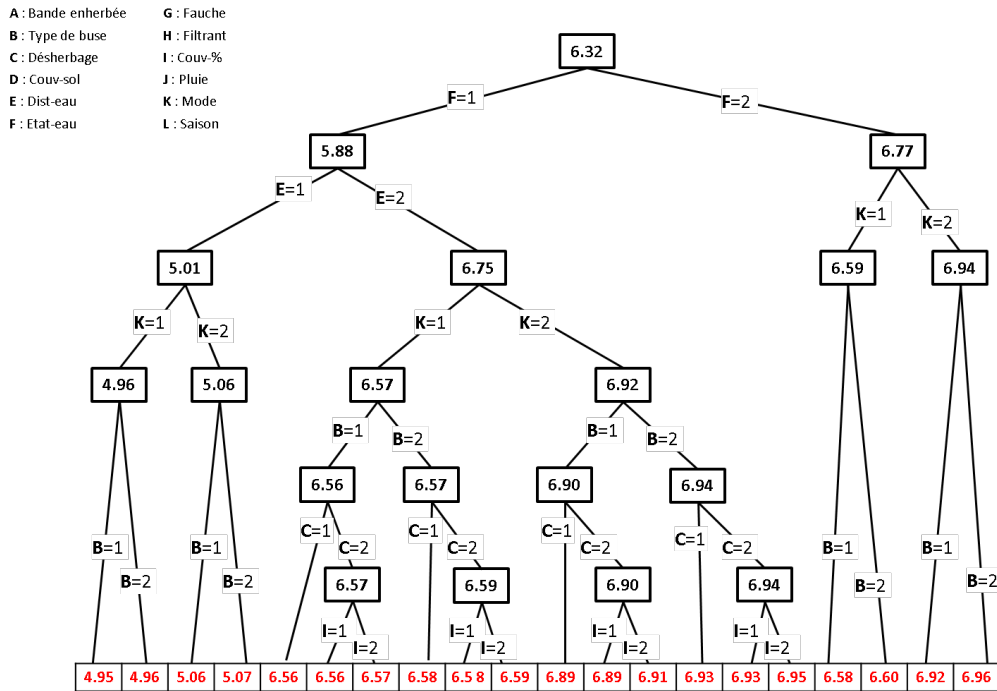


Figure 4 : Arbre de régression par la méthode CART (Breiman *et al.*, 1984) déterminant les variables d'importance dans la construction du score I-PHYsa (lambda-cyhalothrine) utilisé chez le producteur n°1. Les scores I-PHYsa, donnés dans les étiquettes, évoluent en fonction des conditions défavorable (1) ou favorable (2) des variables (lettres de A à L). I-PHY donne un score sur une échelle de 0 à 10, où 7 et plus sont les scores à atteindre pour minimiser les risques de pollution.

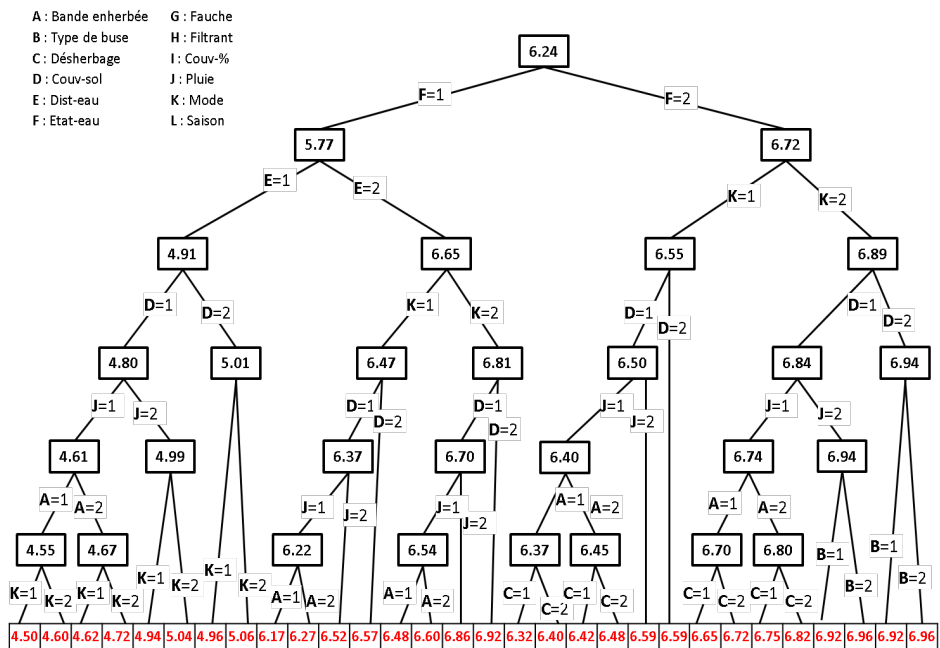


Figure 5 : Arbre de régression par la méthode CART (Breiman *et al.*, 1984) déterminant les variables d'importance dans la construction du score I-PHYsa (lambda-cyhalothrine) utilisé chez le producteur n°2. Les scores I-PHYsa, donnés dans les étiquettes, évoluent en fonction des conditions défavorable (1) ou favorable (2) des variables (lettres de A à L). I-PHY donne un score sur une échelle de 0 à 10, où 7 et plus sont les scores à atteindre pour minimiser les risques de pollution.

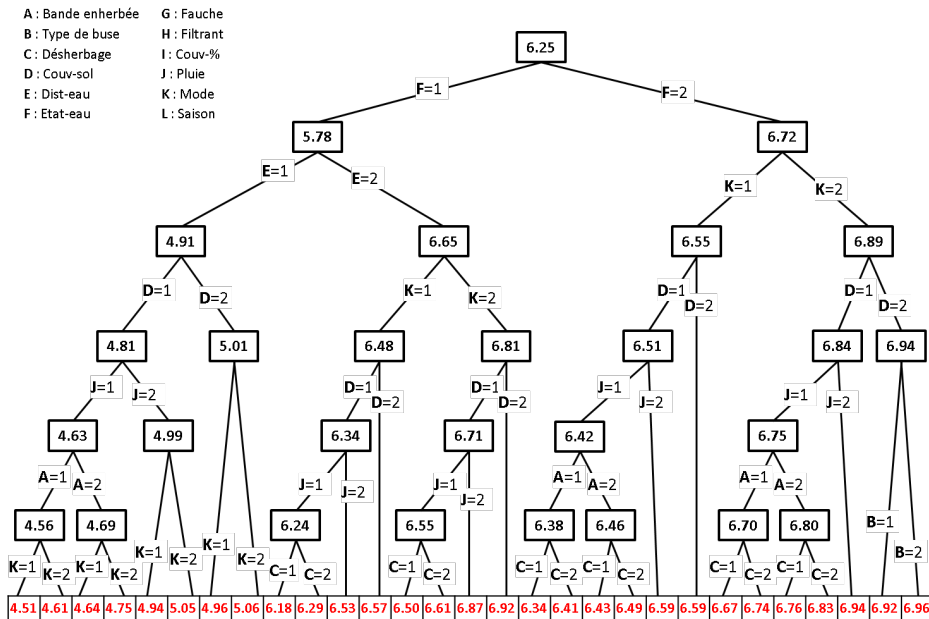


Figure 6 : Arbre de régression par la méthode CART (Breiman *et al.*, 1984) déterminant les variables d'importance dans la construction du score I-PHYsa. (lambda-cyhalothrine) utilisé chez le producteur n°3. Les scores I-PHYsa, donnés dans les étiquettes, évoluent en fonction des conditions défavorable (1) ou favorable (2) des variables (lettres de A à L). I-PHY donne un score sur une échelle de 0 à 10, où 7 et plus sont les scores à atteindre pour minimiser les risques de pollution. **Illustration d'un cas d'étude** : la variable 'Etat-eau' est défavorable (F=1), par contre le producteur décide de ne traiter qu'à une distance minimale du point d'eau (>15 m, valeur favorable de la variable Dist-eau, tableau 3) - alors E=2 - puis d'utiliser le bon 'Mode' de traitement (K=2) et enfin sur une parcelle enherbée (D=2) alors la note I-PHYsa approche la note maximale qui aurait pu être obtenue si toutes les conditions avaient été favorables (6.92 au lieu de 6.96).

Ces arbres de régression informent précisément des risques pour l'environnement liés à l'utilisation de cette substance active. Par exemple, les vergers réunionnais sont souvent plantés à proximité d'habitats naturels tels des ravines qui peuvent être en eau en fonction des événements climatiques. Dans ces conditions, la présence d'eau dans cette ravine est subie par le producteur. Cependant, ce dernier peut minimiser les risques de pollution liés à un traitement en activant les autres leviers. La Figure 6 scénarise ce cas : la variable 'Etat-eau' est défavorable (F=1), par contre le producteur peut décider de ne pas traiter à une distance minimale du point d'eau (>15 m, valeur favorable de la variable Dist-eau, Tableau 4) (E=2) puis d'utiliser le bon 'Mode' de traitement (K=2) et enfin de maintenir sa parcelle enherbée (D=2). La note I-PHYsa approche alors la note maximale qu'il aurait pu obtenir si toutes les conditions avaient été favorables (6.92 au lieu de 6.96). Dans ces conditions, le producteur a donc toute latitude pour améliorer le score I-PHY en fonction des leviers techniques qu'il peut ou non manœuvrer. Ces arbres de régression deviennent alors de véritables outils d'aide à la décision dans une analyse *ex ante* des risques de pollution liés à l'usage d'un pesticide (ici la lambda-cyhalothrine).

Conclusion

L'intérêt d'un indicateur est de simplifier l'information de façon pertinente. Il doit pour cela être sensible aux changements évalués aux échelles d'études considérées. Les scores d'évaluation obtenus par I-PHY sous la forme d'un score sur une échelle qualitative facilitent leur interprétation notamment par les utilisateurs finaux, comme les producteurs ou les techniciens (Mitchell *et al.*, 2005). Dans notre cas d'étude, l'indicateur I-PHY a été suffisamment sensible pour évaluer les risques sur l'environnement de la lambda-cyhalothrine selon des conditions d'utilisation scénarisées mais aussi en fonction des caractéristiques réelles des sols sur lesquels ce pesticide aurait été utilisé.

Dans ces conditions, I-PHY est un indicateur robuste dont les résultats permettent d'identifier des pratiques à risque pour l'environnement. Cependant, le simple résultat sous la forme d'un score ne fait pas pour autant d'I-PHY un outil d'aide à la décision en l'état. Nous proposons dans cet article d'utiliser les marges de progrès obtenues entre les différents scores (I-PHY min et max) pour construire des arbres de régression permettant d'identifier aisément les principales variables d'influence du score. Nos résultats d'analyses s'avèrent prépondérants pour l'usage de ce type d'indicateur (Hak *et al.*, 2012) et plus particulièrement pour déterminer le poids exact de chacune des variables constitutives de ce dernier (Ferrara *et al.*, 2012). Les principales variables d'influence identifiées deviennent dès lors de véritables leviers techniques sur lesquels les utilisateurs peuvent agir prioritairement. Ils sont autant d'arguments de discussion avec ces mêmes utilisateurs d'une part pour favoriser de bonnes pratiques phytosanitaires et d'autre part pour réfléchir à la substitution de substances actives. Dans notre cas d'étude, la lambda-cyhalothrine approche, sans jamais le dépasser, le score acceptable d'I-PHY et ce malgré la mobilisation de bonnes pratiques. Dans ces conditions, I-PHY peut devenir un précieux outil d'aide à la décision pour rechercher des substances actives moins à risque pour l'environnement pour remplacer cet insecticide.

Références bibliographiques

- Bockstaller C., Girardin P., 2006. Evaluation agri-environnementale des systèmes de culture : la méthode INDIGO®. Oléoscope, 4–6.
- Bockstaller C., Guichard L., Keichinger O., Girardin P., Galan M.-B., Gaillard G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 223–235.
- Boullenger G., Le Bellec F., Girardin P., Bockstaller C., 2008. Evaluer l'impact des traitements des agrumes sur l'environnement : adaptation d'I-Phy, indicateur environnemental d'effet de l'utilisation des produits phytosanitaires, à l'agrumiculture guadeloupéenne. *Phytoma - la défense des végétaux* 617, 22-25.
- Bolognesi C., Merlo F.D., 2011. Pesticides: Human Health Effects. In: *Encyclopedia of Environmental Health* (éd. Editor-in-Chief: Jerome O. Nriagu). Elsevier, Burlington, pp. 438–453.
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J., 1984. *Classification and Regression Trees*. Chapman and Hall Wadsworth, USA, 368 p.
- Devilliers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.-L., Soulas G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides. Librairie Lavoisier.
- Ferrara A., Salvati L., Sateriano A., Nolè A., 2012. Performance evaluation and cost assessment of a key indicator system to monitor desertification vulnerability. *Ecological Indicators* 23, 123–129
- Floch C., Chevremont A.-C., Joanico K., Capowiez Y., Criquet S., 2011. Indicators of pesticide contamination: Soil enzyme compared to functional diversity of bacterial communities via Biolog® Ecoplates. *European Journal of Soil Biology* 47, 256–263.
- FOOTPRINT, 2013. PPDB - Pesticide Properties DataBase - University of Hertfordshire. url: <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/fr/index.htm>
- Hak T., Kovanda J., Weinzettel J., 2012. A method to assess the relevance of sustainability indicators: Application to the indicator set of the Czech Republic's Sustainable Development Strategy. *Ecological Indicators* 17, 46–57
- Landau-Ossondo M., Rabia N., Jos-Pelage J., Marquet L.M., Isidore Y., Saint-Aimé C., *et al.*, 2009. Why pesticides could be a common cause of prostate and breast cancers in the French Caribbean Island, Martinique. An overview on key mechanisms of pesticide-induced cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 63, 383–395.

Mitchell G., May A., McDonald A., 1995. PICABUE: a methodological framework for the development of indicators of sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 2, 104–123.

Pedlowski M.A., Canela M.C., Da Costa Terra M.A., Ramos de Faria R.M., 2012. Modes of pesticides utilization by Brazilian smallholders and their implications for human health and the environment. *Crop Protection* 31, 113–118.

Reichenberger S., Bach M., Skitschak A., Frede H.-G., 2007. Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground- and surface water and their effectiveness; A review. *Science of The Total Environment* 384, 1–35.

Reus J., Leendertse P., Bockstaller C., Fomsgaard I., Gutsche V., Lewis K., *et al.*, 2002. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use. *Agriculture, Ecosystems&Environment* 90, 177–187.

Séralini G.-E., Clair E., Mesnage R., Gress S., Defarge N., Malatesta M., *et al.*, 2012. Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food and Chemical Toxicology*, 50, 4221–4231.

Sugeno M., 1985. An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences* 36, 59-83.

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.

Zadeh L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information control* 8: pp 338-353.