

Guide pour l'analyse pression impact dans le cas des pressions agricoles diffuses phytosanitaires

Rapport final

BRGM/RP-67366-FR

Octobre 2017

Étude réalisée dans le cadre de la convention AFB-BRGM 2015-2017

H. Bessière

Avec la collaboration de

N. Surdyk

Vérificateur :

Nom : L. Gourcy

Fonction : responsable unité D3E/EVE

Date : 2/11/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : F. Garrido

Fonction Directeur Adjoint D3E :

Date : 13/11/2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

RESUME

La méthode de l'analyse des pressions et impact des masses d'eau souterraine par les pesticides est basée sur un risque de transfert prenant en compte des facteurs hydrogéologiques et des propriétés physico-chimiques des produits phytosanitaires.

La méthodologie proposée passe, dans un premier temps, par l'élaboration, d'une carte globale de notes de pressions engendrées par les produits phytosanitaires. Ces notes sont évaluées à dire d'expert pour différentes occupations du sol et un calcul d'agrégation des pressions en fonction des surfaces cultivées est réalisé à l'échelle de la masse d'eau.

Dans un second temps, l'étude du transfert est effectuée pour une sélection de molécules à partir des données de pression de la Banque nationale des ventes pour les distributeurs (BNV-D) et de traitements statistiques sur les données de qualité des eaux souterraines. Ces molécules ont été sélectionnées car pouvant être représentatives, de par leurs caractéristiques physico-chimiques, de l'ensemble des molécules.

Des indices de risque de contamination sont calculés par molécule et par type de sol (spatialisation des paramètres en fonction de la carte pédologique et des propriétés des molécules). Ces indicateurs de risque peuvent être croisés avec la carte de vulnérabilité intrinsèque ou de l'Indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR, potentiel d'infiltration) en fonction des données disponibles. Les cartes de risque de contamination obtenues sont confrontées avec les données de qualité des eaux souterraines afin de déterminer le meilleur indicateur. Enfin, un indice global de risque est calculé à l'échelle de la masse d'eau pour chaque molécule pour in fine pouvoir comparer le risque de contamination « phytosanitaires ».

Dans tous les cas, l'avis d'expert et la connaissance hydrogéologique locale restent fondamentaux pour l'analyse pression-impact du fait d'une part de connaissances hydrogéologiques partielles et de la méconnaissance des voies d'infiltration de circulation rapides des eaux à travers les sols et la zone non saturée et, d'autre part, du fait des problématiques de changement d'échelle et d'agrégation à la masse d'eau souterraine qui peuvent s'avérer très approximatives dans le cas où peu des données de contrôle sont disponibles.

Un exemple d'application de la méthode est réalisé sur le département de la Martinique.

Mots-clés : Pression agricoles phytosanitaires, cartes de risque de contamination, eaux souterraines

Couverture géographique : Départements d'Outre-Mer
Niveau de lecture : averti

Correspondant AFB : BOUGON Nolwenn

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bessière H., Surdyk N. (2017) – Guide pour l'analyse pression impact dans le cas des pressions agricoles diffuses phytosanitaires. Rapport final. BRGM/RP-67366-FR, 82 p.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1	Introduction.....	15
1.1	PRINCIPES GENERAUX.....	15
1.1.1	Les produits phytosanitaires	15
1.1.2	Devenir des produits phytosanitaires	15
1.1.3	Rappels réglementaires	18
1.2	PROPOSITION METHODOLOGIQUE DE L'ANALYSE PRESSION IMPACT PHYTOSANITAIRES	18
1.2.1	Rappel des exigences de la directive cadre sur l'eau	18
1.2.2	Bases de la proposition méthodologique.....	18
2	Pression brute en produits phytosanitaires	21
2.1	LES PRATIQUES AGRICOLES.....	21
2.1.1	Les statistiques agricoles des DOM	21
2.1.2	Cas de la Martinique	22
2.2	CALCUL DE LA PRESSION BRUTE EN PRODUITS PHYTOSANITAIRES ...	24
2.2.1	Principe.....	24
2.2.2	Connaissance des cultures du territoire	24
2.2.3	Etablissement d'une note par culture	27
2.3	CARTE DE PRESSION BRUTE EN PRODUITS PHYTOSANITAIRES	29
2.3.1	Carte résultante à l'échelle de la parcelle.....	29
2.3.2	Cartes résultantes à l'échelle de la masse d'eau	31
2.4	SYNTHESE DES ETAPES ET DES DONNEES SUR LA PRESSION BRUTE EN PHYTOSANITAIRES	33
3	Etude du transfert des molécules.....	35
3.1	DEMARCHE GENERALE	35
3.2	SELECTION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES D'INTERET.....	35
3.2.1	Démarche pour sélectionner les produits phytosanitaires	35
3.2.2	Sélection des produits à partir des chroniques dans les eaux souterraines	36
3.2.3	Sélection des produits à partir des applications actuelles.....	37
3.2.4	Sélection finale des produits d'intérêts	39
3.2.5	Synthèse des données utilisées pour la sélection des molécules :.....	40
3.3	DETERMINATION DES APPLICATIONS POTENTIELLES POUR LES MOLECULES ETUDIEES.....	40
3.3.1	Etudes des usages des produits phytosanitaires dans les DOM	40

3.3.2	Cartes résultantes d'application potentielle des molécules	41
3.4	ETABLISSEMENT DE CARTES DE RISQUE	42
3.4.1	Méthode basée sur Indicateur GUS spatialisé	43
3.4.2	Croisement GUS et vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines.....	49
3.4.3	Méthode basée sur le calcul d'un AFT spatialisé	51
3.4.4	Croisement AFT et vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines.....	59
3.5	COMPARAISON DES METHODES GUS ET AFT SPATIALISES	61
3.5.1	Comparaison des notes de risque	61
3.5.2	Confrontation des cartes de risque avec la qualité des eaux souterraines.....	64
3.5.3	Conclusions.....	65
3.6	CALCUL D'UN INDICE DE RISQUE DE TRANSFERT GLOBAL A L'ECHELLE DE LA MASSE D'EAU	66
3.6.1	Indice de risque de transfert par masse d'eau pour les molécules d'intérêt.....	66
3.6.2	Limite de la méthode	68
3.7	SYNTHESE DES DONNEES ET METHODES DU TRANSFERT DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES.....	68
4	Détermination de la pression significative	69
4.1	CROISEMENT PRESSION BRUTE / TRANSFERT GLOBAL	69
4.1.1	Méthodologie globale	69
4.1.2	Cartes résultantes	69
4.2	VALIDATION / ANALYSE PRESSION IMPACT	71
4.2.1	Persistance des molécules historiques.....	71
4.2.2	Temps de transfert et âge de l'eau	71
4.2.3	Concordance pression-impact-état	73
5	Conclusion.....	79
6	Bibliographie	81

Liste des tableaux

Tableau 1 - La surface agricole utilisée dans les DOM (selon RA 2010 source : agreste)	21
Tableau 2 - Principales productions agricoles dans les DOM en 2015 (source : agreste 2015) 21	
Tableau 3 - Recensements agricoles 2000 et 2010 en Martinique – source Agreste	23
Tableau 4 - Répartition des cultures en Martinique d'après le RPG	27
Tableau 5 - Hiérarchisation et cotation de la pression « produits phytosanitaires » en fonction du type de culture sur la base du RPG pour les DOM	28
Tableau 6 - Pression « produits phytosanitaires » en fonction du type de culture sur la base du RPG pour la Martinique	29
Tableau 7 – Données et sources des bases de données utilisables pour l'analyse pression-impact en DOM.....	33
Tableau 8 - Produits phytosanitaires dont la fréquence de dépassement est supérieur à 0,2 et/ou la $mma > 0,1 \mu\text{g/l}$ dans les eaux souterraines en Martinique	37
Tableau 9 - Substances sélectionnées à partir des eaux souterraines et molécules mères associés	37
Tableau 10 - Usages historiques et actuels des molécules étudiées en Martinique (Baran et al. 2013)	40
Tableau 11 - Matrice « activité agricole – produit phytosanitaire » crée pour la Guadeloupe (source : Rapport BRGM/RP-63816-FR)	41
Tableau 12 - Classes de valeur retenues pour l'indice de GUS et note associée (source : RP-61976-FR)	45
Tableau 13 - Classement par GUS croissant d'une sélection de molécules à partir de la BNVD et de la qualité des eaux souterraines sur la Martinique	46
Tableau 14 - Valeurs expérimentales de Koc, DT50 pour les sols prélevés et valeur de l'indicateur Gus pour le propiconazole (source : Baran et al, 2013)	47
Tableau 15 - Notes GUS attribuées au propiconazole selon les différentes classes de sol étudiées	48
Tableau 16 - Classes de valeur retenues pour l'index AFT et note associée	53
Tableau 17 - Caractérisation physico-chimiques des sols étudiés (source : BRGM/RP-61976-FR)	54
Tableau 18 - Résultats du RF obtenus pour le propiconazole en fonction des différents types de sols étudiés en Martinique	56
Tableau 19 - Calcul de l'AFT pour le propiconazole avec des flux de 0,2 mm/j et de 6,85 mm/j.58	
Tableau 20 - Synthèse des notes GUS et AFT calculées pour chaque couple molécule-sol (source BRGM/RP-61976-FR)	63
Tableau 21 - Résultats du calcul de l'indice de risque de transfert global par MESO	68
Tableau 22 - Tableau de passage de la pression brute à la pression significative	69
Tableau 23 - Pressions significatives obtenues par MESO en Martinique	69
Tableau 24 - Exemple de classification des analyses pour la Guadeloupe (période 1999-2014) et la Martinique (1993-2015) à partir des données ADES.....	74
Tableau 25 Pourcentage et nombre de qualitomètres jamais impactés par masse d'eau souterraine en Martinique	76

Tableau 26 Différents niveaux d'information des données ASP	97
Tableau 27 : Nom et description des fichiers de données ASP de niveau 4	98
Tableau 28 Signification des codes de groupe de cultures	99
Tableau 29 Répartition des cultures en Guadeloupe d'après le RPG	103
Tableau 30 Répartition des cultures à la Réunion d'après le RPG	103
Tableau 31 Répartition des cultures en Guyane d'après le RPG	104
Tableau 32 Répartition des cultures à Mayotte selon Agreste.....	104

Liste des figures

Figure 1 Devenir des pesticides dans l'environnement (d'après Weber et Miller, 1989).....	16
Figure 2 Schéma de l'approche méthodologique proposée pour l'analyse pression-impact phytosanitaires en DOM	20
Figure 3 Evolution des surfaces agricoles en Martinique.....	23
Figure 4 Carte des productions agricoles de Martinique (Odeadom, 2010)	26
Figure 5 Carte de la pression pesticides par ilot (d'après le RPG) en Martinique	31
Figure 6 Pression globale en phytosanitaires par masse d'eau souterraine en Martinique	32
Figure 7 Carte de pression pesticides à la masse d'eau souterraine avec masque CLC	33
Figure 8 Produits phytosanitaires les plus vendus en Martinique de 2009 à 2014 selon la BNVD39	
Figure 9 Carte d'application potentielle du propiconazole (source : RP-61976-FR).....	42
Figure 10 Schéma de synthèse d'établissement de cartes de contamination par les différentes méthodes présentées	43
<i>Figure 11 Carte pédologique simplifiée de la Martinique (IRD-CIRAD) (source : RP-61976-FR)</i>	<i>48</i>
Figure 12 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode GUS.	49
Figure 13 Carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Allier et al., 2008).....	50
Figure 14 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode GUS + vulnérabilité.....	51
Figure 15 Carte d'infiltration annuelle moyenne de la Martinique (source : BRGM/RP-61976) .	55
Figure 16 Carte du RF calculé pour le propiconazole sur la Martinique à partir de la carte pédologique simplifiée de l'IRD	57
Figure 17 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode AFT (source : BRGM/RP-61976).....	59
Figure 18 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode AFT + vulnérabilité (source : BRGM/RP-61976-FR)	61
Figure 19 Confrontation du risque de contamination par le propiconazole avec la méthode AFT/vulnérabilité avec la qualité des eaux souterraines	64
Figure 20 Représentation graphique des indices de risque calculés par molécule pour chaque MESO	67
Figure 21 Comparaison des cartes de pressions agricoles (pressions brutes), indice de risque de transfert et pressions significatives pesticides à l'échelle des MESO pour la Martinique	70
Figure 22 Répartition géographique des groupes d'eau classés en fonction de leur âge (source : Vittecoq et al. 2007)	73
Figure 23 Principe de classification d'une analyse	74
Figure 24 Confrontation des pressions significatives à l'échelle de la masse d'eau et des résultats de l'analyse statistique sur les concentrations en produits phytosanitaires par qualimètre	76
Figure 25 Confrontation des pressions significatives à l'échelle de la masse d'eau et des résultats de l'analyse statistique sur les concentrations en produits phytosanitaires par qualimètre sans les molécules historiques	77

Figure 26 Parcelles cadastrales et culturales (source : Géoportail). Gauche : plusieurs parcelles culturales (limites rouges) dans une parcelle cadastrale (limite noire). Droite : plusieurs parcelles cadastrales (limite noire) dans une parcelle culturale (limite rouge) 96

Figure 27 Ilots PAC et parcelles culturales. Gauche : un îlot (limite bleue) contenant plusieurs parcelles culturales (limite rouge). Droite : deux îlots contenant chacun une seule parcelle culturale 96

Figure 28 : Voies de dégradation biologique du 2.4D cité dans Merini et al. (2007) 116

Figure 29 : Voies de dégradation biotique du glyphosate, cité dans Borggaard et Gimsing (2008) 116

Liste des annexes

Annexe 1 Devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement..... 87

Annexe 2 Le registre Parcellaire Graphique 93

Annexe 3 Répartition des cultures d'après le RPG pour la Guadeloupe, la Réunion et la Guyane et d'après Agreste pour Mayotte..... 101

Annexe 4 Pressions dues à l'exploitation de canne à sucre 105

Annexe 5 Cycle cultural de la banane 109

Annexe 6 Formules structurales et voies de dégradation de quelques molécules d'intérêt 113

Annexe 7 GUS des molécules étudiées en fonction des différents types de sol 117

Annexe 8 Age de l'eau : méthode 121

Annexe 9 Age de l'eau : compilation de données de Martinique 127

Annexe 10 Analyse statistique sur les concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines en Martinique 133

Lexique

2.4-D : (formule $C_8H_6Cl_2O_3$) herbicide de la canne à sucre

Adsorption : l'enrichissement d'une ou plusieurs espèces chimiques sur une interface selon l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

AMPA : principal produit de dégradation du glyphosate

Aquifère : Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables (formations poreuses et/ou fissurées) et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation (drainage, pompage,...).

Bassin hydrogéologique : ensemble aquifère circonscrit par des limites faisant obstacle à toute propagation d'influence appréciable vers l'extérieur pouvant alimenter une ou plusieurs sources.

Biodégradation ou **dégradation biotique**: ensemble des processus biologiques qui conduit à une disparition des produits phytosanitaires parents (matière active) sous l'action des micro-organismes du sol (souvent des bactéries et des champignons) et à la formation de métabolites

Capacité au champ : quantité d'eau retenue dans un sol après écoulement de l'eau de gravitation.

Capacité d'échange cationique (CEC) : la capacité maximale de cations échangeables qu'un sol peut retenir à un pH donné, ce qui correspond à la somme des sites d'échange occupés par des cations (Ca, Mg, K, Na, H et Al)

Cinétique de premier ordre : la vitesse de la réaction (dégradation) est proportionnelle à la concentration du pesticide réagissant.

Cinétique de sorption : quantité adsorbée par rapport à la quantité initiale en fonction du temps. Elle permet de déterminer la durée de mise en contact à partir de laquelle on peut considérer qu'un équilibre est atteint

Cinétique de désorption : quantité désorbée par rapport à la quantité initiale en fonction du temps

Coefficient de partage ou de distribution K_d : ratio entre la quantité adsorbée par unité de masse de solide et la concentration à l'équilibre dans la phase liquide.

Colloïdes : Particules de très petite taille restant en suspension dans l'eau.

Dégradation : ensemble des processus biologiques et chimiques qui conduit à une disparition des produits phytosanitaires parents (matière active) sous l'action des micro-organismes du sol (souvent des bactéries et des champignons) et à la formation de métabolites

Dégradation abiotique : la dégradation est assurée uniquement par des processus chimiques

Désorption : processus inverse de l'adsorption

Diuron : (formule $C_9H_{10}Cl_2N_2O$) herbicide de la banane, des ananas, de la canne à sucre

Facteur de retard : paramètre qui traduit l'influence de l'adsorption sur le temps de transfert de la molécule du sol vers les eaux souterraines. La mobilité du pesticide diminue avec l'augmentation de l'indice

Glyphosate : (formule $C_3H_7NO_5P$) herbicide utilisé sur banane principalement en DOM

Herbicide : substance chimique conçue pour tuer ou empêcher la croissance de certaines plantes jugées indésirables

Ilot PAC : Un îlot est un ensemble de parcelles culturales contiguës exploitées par une même exploitation, portant une ou plusieurs cultures, délimité par des éléments permanents facilement repérables (chemin, route, ruisseau...) ou par d'autres exploitations (source : adaptée de la Notice explicative Comment renseigner votre dossier PAC ? Ministère de l'Agriculture). Il sert d'unité géographique de base pour les déclarations de surface agricoles dans le cadre de la gestion des aides européennes.

Indice de Gustafson GUS : indicateur de transfert des pesticides du sol vers les eaux simple qui prend uniquement en compte les propriétés de la substance active (temps de demi-vie et constante de sorption) sans intégrer de variables liées à l'usage et au milieu

Isothermes de sorption : courbe qui fournit à une température donnée la variation de la quantité de pesticide adsorbé sur le solide en fonction de la concentration à l'équilibre dans la phase liquide

Lessivage : Entraînement en profondeur par l'eau des éléments solubles des colloïdes du sol. En particulier, les nitrates et certains produits phytosanitaires (ou leurs produits de dégradation) peuvent ainsi atteindre les nappes d'eau et en altérer la qualité, jusqu'à rendre l'eau impropre à la consommation.

Limite de quantification : Limite en dessous de laquelle la substance n'est plus détectée dans le milieu où elle est recherchée (sol ou eau) par les moyens d'analyse utilisés.

Lysimètre : Appareil de mesure destiné à recueillir les eaux filtrant à travers le sol.

Métabolites : produit issu de la dégradation d'une molécule parent

Microflore : éléments végétaux et bactériologiques présents dans le sol

Minéralisation : stade ultime de la dégradation qui conduit à la libération de CO_2

Nématicide : substance chimique conçue pour tuer ou empêcher la croissance de certains organismes (les nématodes) jugés indésirables

Oxamyl : (formule $C_7H_{13}N_3O_3S$) nématicide du bananier

Parcelle cadastrale : Portion de terrain d'un seul tenant, appartenant au même propriétaire, et constituant une unité du cadastre (Source : Larousse agricole, édition 2002).

Parcelle culturale : Unité de gestion la plus fine d'un agriculteur, présentant une occupation du sol unique et sur laquelle l'agriculteur applique en général un itinéraire technique unique.

La persistance dans le sol : la persistance dans le sol ou temps de demi-vie (DT50) est évaluée par le temps de dégradation ou la dissipation de 50 % de la substance active présente dans le sol. La base de données « phytosanitaires » renseigne la persistance (DT50) mesurée au champ. Elle est exprimée en jours. (source : SIRIS)

Piézomètre : Dispositif installé dans un forage permettant de mesurer le niveau de la nappe d'eaux souterraines et de procéder à des prélèvements d'échantillons.

Rétention : processus qui contribue à immobiliser, de façon plus ou moins durable les molécules phytosanitaires et/ou leurs produits de dégradation

Signal d'entrée : flux de pesticides entrant dans un système étudié

Sol stérile : sol débarrassé des microorganismes. L'expérimentation sur ce type de sol permet de voir dans quelle mesure la dégradation est liée ou non à l'activité biologique du sol.

Temps de demi-vie d'une molécule ($T_{1/2}$ ou DT_{50}) : la durée nécessaire pour que 50 % de la quantité appliquée soit dégradée

Liste des abréviations

AEP : Alimentation en Eau Potable

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CIRAD : Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement

CNASEA : Centre National pour l'Aménagement des Structures des Exploitations Agricoles

C_{org} : teneur en carbone organique

DAF : Direction de l'Agriculture et de la Forêt

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DIREN : Direction régionale de l'environnement

DT_{50} : temps de demi-vie de disparation

IGN : Institut géographique national

IRD : Institut de recherche pour le développement

f_{oc} : teneur en carbone organique

K_d : coefficient de partage ou de distribution

K_{oc} : coefficient de partage normalisé par rapport à la teneur en carbone organique du sol

Kow : coefficient de partition eau/solvant organique

GUS : Groundwater Ubiquity Score

ODE : Office De l'Eau

RF : facteur de retard

θ_{FC} : teneur en eau volumique à la capacité au champ

ρ_d : densité apparente du sol ($g\ cm^{-3}$)

1 Introduction

1.1 PRINCIPES GENERAUX

1.1.1 Les produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires sont encore appelés produits phytopharmaceutiques. Le terme pesticide englobe plus de molécules dont les biocides (désinfectants).

Les produits phytosanitaires sont généralement des produits obtenus par synthèse chimique. Les substances actives, ou molécules, constituent le principe actif des produits. La directive européenne 91/414/CE, mise en place en 1991, constitue le fondement des dispositions réglementaires gouvernant la mise sur le marché des pesticides en Europe. Chaque substance active (et ses métabolites) subit ainsi une évaluation du risque sanitaire et écologique pour un usage déterminé ; si le risque est considéré comme acceptable selon les critères réglementaires ; la substance active est inscrite en annexe I de la directive 91/414/CE. Les Etats membres peuvent ensuite donner des autorisations de mise sur le marché (AMM) pour des préparations commerciales contenant les substances actives autorisées. L'AMM a une durée maximale de 10 ans. A l'issue de cette période d'autorisation, une nouvelle demande doit être effectuée.

Dans les DOM, la contamination des eaux souterraines résulte à la fois de molécules liées à des usages anciens et actuellement interdits (surtout des insecticides et nématicides) et de molécules plus récemment introduites sur le marché (surtout des herbicides).

1.1.2 Devenir des produits phytosanitaires

Le devenir des phytosanitaires est lié à leurs propriétés physico-chimiques ainsi qu'à celles du milieu récepteur. Les mécanismes gouvernant leur devenir sont nombreux et complexes : prélèvement par les plantes, volatilisation, photolyse, hydrolyse, biodégradation, sorption, formation de résidus liés (Figure 1). Ces mécanismes peuvent être étudiés spécifiquement en conditions contrôlées de laboratoire (Amalric et al., 2002). Ainsi, par grande famille chimique, il est possible de décrire l'importance de chaque processus. Toutefois les résultats obtenus en laboratoire ne donnent qu'une vision approchée de ce qui se passe sur le terrain. En effet, en conditions naturelles, les différents processus interagissent les uns avec les autres. De plus, dans la mesure où ces processus ne sont pas instantanés, les vitesses de circulation de l'eau et des solutés dans les milieux vont influencer fortement les résultats. D'autres paramètres notamment biochimiques voir microbiologiques peuvent également intervenir en milieu naturel.

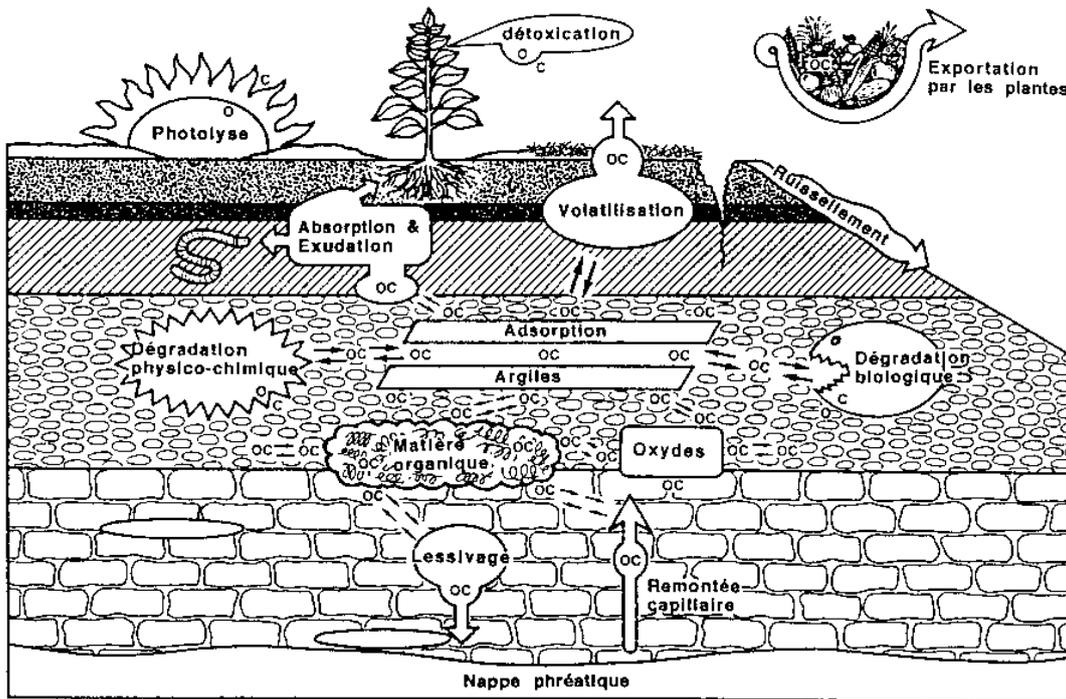


Figure 1 Devenir des pesticides dans l'environnement (d'après Weber et Miller, 1989)

Phénomènes de dégradation

Ce terme englobe les phénomènes de biodégradation et de transformations chimiques. La grande diversité de voies de dégradation peut engendrer la libération dans l'environnement d'un grand nombre de produits de dégradation différents.

La biodégradation conduit à une disparition des produits phytosanitaires parents (matière active) sous l'action des micro-organismes du sol (souvent des bactéries et des champignons) et à la formation de métabolites. Cette dégradation est plus rapide après l'application du produit puis son taux diminue parallèlement à la diminution de la quantité de produit dans le sol. Le temps de demi-vie d'une substance dans le sol (DT_{50}), correspondant à la durée nécessaire pour que 50 % de la quantité de la substance appliquée soit dégradée, fournit une indication sur la vitesse de dégradation. Cette valeur peut varier de quelques jours à plusieurs mois ou années selon la molécule (solubilité, formulation, molécule de synthèse) et les conditions environnementales (population bactérienne, concentration initiale de produit, type de sol, humidité, température, pH, etc.). Cette vitesse de dégradation peut également être accélérée lorsque le produit est appliqué régulièrement, du fait de l'adaptation de la population microbienne du sol.

Dans les premiers centimètres de sol, qui sont généralement riches en micro-organismes, la dégradation biotique peut être extrêmement importante et conduire à la réduction significative de la quantité de pesticide susceptible de migrer vers les eaux souterraines. La composition de la microflore est très variable d'un sol à un autre selon la nature même des sols, le pH, la teneur en carbone organique et en argile ce qui peut expliquer des taux de dégradation d'un pesticide donné très différents selon les sols.

En plus de la dégradation biotique considérée comme le processus majeur de dégradation, des processus de dégradation abiotiques, peuvent prendre naissance. Par exemple, la photodégradation qui englobe les processus de photolyse, la phototransformation, l'hydrolyse, les réactions d'oxydo-réduction ou encore la déhydrohalogénéation.

Phénomènes de rétention

La rétention est un processus qui contribue à immobiliser, de façon plus ou moins durable les molécules phytosanitaires et/ou leurs produits de dégradation (Calvet, 1989). L'adsorption a été définie par l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) comme « l'enrichissement d'une ou plusieurs espèces chimiques sur une interface ». Le cas le plus fréquent d'adsorption pour les phytosanitaires correspond à l'adsorption sur une phase solide à partir d'une phase liquide. Les interactions peuvent être plus ou moins fortes. La structure du sol et la diffusion moléculaire ont une influence sur les cinétiques de ces phénomènes car elles conditionnent l'accessibilité aux sites d'adsorption.

Dans le cas des produits phytosanitaires, l'adsorption a lieu principalement à l'interface liquide/solide, c'est-à-dire, à l'interface entre, soit, la solution du sol et les constituants solides, soit la phase liquide interstitielle et les sédiments (Calvet, et al., 2005). Un produit phytosanitaire sous forme neutre va s'absorber principalement sur la matière organique via des interactions de type hydrophobes (Benoit, 1994). De manière générale, les produits phytosanitaires sous leur forme ionisée font intervenir des mécanismes de rétention différents de ceux des molécules non ionisables (Surdyk et al., 2008), ces interactions sont plus fréquentes dans les sols des DOM du fait de leur composition (ex : teneur en hydroxydes de Fer plus important antes)

Le processus inverse de l'adsorption, la désorption, n'est pas toujours totalement réversible, des processus d'hystérésis étant fréquemment observés. Les processus d'adsorption et de désorption ne sont pas des processus instantanés. Généralement l'adsorption est plus rapide que la désorption, sans doute à cause des phénomènes de fixation chimique.

De nombreux facteurs influencent l'adsorption. Tout d'abord les propriétés de la molécule adsorbée, telles que sa structure, sa solubilité, son coefficient de partition eau/solvant organique (Kow), sa taille et sa forme. Les propriétés de l'adsorbant jouent également un rôle dans la cinétique d'adsorption, via les constituants minéraux (argiles, oxydes, etc.) et organiques qui le composent. La matière organique joue ainsi généralement un rôle prépondérant notamment pour les molécules neutres. Dans une moindre mesure, les taux d'argiles et d'oxydes et d'hydroxydes de fer et de manganèse peuvent aussi jouer sur les quantités adsorbées notamment dans le cas de sols peu riches en matière organique et dans le cas des produits phytosanitaires ioniques. Enfin, des facteurs externes interviennent également et influent l'adsorption. La composition ionique de la phase liquide est importante parce qu'elle influe sur le pH de la solution et que les ions minéraux en solution peuvent entrer en concurrence avec les phytosanitaires chargés.

Au cours des dernières décennies, l'utilisation de molécules marquées radioactivement a permis de mettre en évidence l'immobilisation d'une fraction non extractible de produits phytosanitaire dans les sols, fraction comportant non seulement la molécule mère mais aussi ses produits de dégradation. Le vieillissement des résidus dans le sol provoque une diminution de leur disponibilité, notamment pour repasser sous forme dissoute. En revanche leur transport à l'état adsorbé peut être favorisé. La formation de résidus liés dans le sol contribue donc, au moins temporairement, à réduire le risque de transfert d'une substance vers les eaux souterraines.

Il faut donc retenir que dans les sols et pour la plupart des molécules, les processus de sorption et de dégradation sont prépondérants. Ce sont donc ces 2 processus majeurs, susceptibles de réduire la quantité de pesticides migrant vers les nappes qui seront pris en compte dans l'analyse pression-impact. Le lecteur peut se référer à l'annexe1 pour plus de détails sur le devenir des phytosanitaires dans l'environnement.

1.1.3 Rappels réglementaires

Les eaux brutes superficielles ou souterraines destinées à la consommation humaine doivent respecter les limites de la qualité fixées par l'Arrêté du 11 janvier 2007. Les limites et référence de qualité des eaux (annexe I) sont les suivantes :

- \leq à 0,1 $\mu\text{g/l}$ par substance (à l'exception de l'aldrine, la dieldrine, l'heptachlore et l'heptachlorepoxyde pour lesquelles la limite est de 0,03 $\mu\text{g/l}$) y compris métabolites,
- \leq 0,5 $\mu\text{g/l}$ sur le total des substances.

Les limites de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (annexe II) sont les suivantes :

- \leq à 2 $\mu\text{g/l}$ par substance individuelle (y compris métabolites)
- \leq 5 $\mu\text{g/l}$ pour le total des substances.

1.2 PROPOSITION METHODOLOGIQUE DE L'ANALYSE PRESSION IMPACT PHYTOSANITAIRES

1.2.1 Rappel des exigences de la directive cadre sur l'eau

L'analyse des impacts des activités humaines sur l'état des eaux comporte (article R. 212-3 du code de l'environnement) :

- une description des types et de l'ampleur des pressions présentes dans le bassin,
- une évaluation de l'incidence de ces pressions sur l'état des masses d'eau,
- la prise en compte d'un scénario tendanciel d'évolution des pressions (dont l'évolution prévisible de la demande en eau et de la ressource disponible et de la répartition de cette ressource entre les utilisateurs),
- l'identification des masses d'eau qui risquent de ne pas atteindre les objectifs environnementaux (RNAOE) d'ici 2021.

L'analyse des pressions et des impacts obéit à trois grandes finalités complémentaires (guide pour la mise à jour de l'état des lieux, 2012) :

- informer sur les types de pollution et de détérioration présents dans le bassin, leurs sources, leurs quantités, leur évolution dans le temps, ainsi que leurs effets sur les milieux ;
- alimenter l'analyse du risque de non-atteinte des objectifs environnementaux en 2021 et, plus largement, être utile à l'élaboration du SDAGE et du programme de mesures suivants ainsi qu'à l'ajustement du programme de surveillance ;
- répondre aux exigences du rapportage communautaire.

1.2.2 Bases de la proposition méthodologique

La méthode proposée pour l'analyse pression-impact des pollutions agricoles dues aux produits phytosanitaires est une méthode qualitative d'estimation d'un risque de contamination des ESO par les produits phytosanitaires basée sur un risque de transfert prenant en compte des facteurs hydrogéologiques et certaines propriétés physico-chimiques des molécules (Figure 2). Elle se décline selon les six étapes suivantes :

- **Elaboration d'une carte des pressions brutes phytosanitaires**

La méthodologie proposée passe, dans un premier temps, par l'élaboration, d'une carte des pressions des produits phytosanitaires. Pour cela, des notes de pression en pesticides sont

affectées par culture et un calcul d'agrégation des pressions par les surfaces cultivées est réalisé à l'échelle de la masse d'eau.

- **Sélection des molécules d'intérêt pour la caractérisation du transfert**

Les molécules sont sélectionnées à partir des données de pression de la Banque nationale des ventes pour les distributeurs (BNV-D) et de traitements statistiques sur les données de qualité des eaux souterraines. Ces molécules ont été sélectionnées car elles peuvent être représentatives, de par leurs caractéristiques, de l'ensemble des molécules.

- **Etablissement des cartes de risque de contamination pour les molécules d'intérêt**

Dans un second temps, l'étude du transfert est effectuée pour les molécules d'intérêt. Des indices de risque de contamination sont calculés par molécule d'intérêt et par type de sol (spatialisation des paramètres en fonction de la carte pédologique et des propriétés des molécules). Ces indicateurs de risque peuvent être croisés avec la carte de vulnérabilité intrinsèque ou de l'Indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR, potentiel d'infiltration) en fonction des données disponibles.

- **Confrontation des résultats cartographiques avec la qualité des eaux souterraines.**

Les cartes de risque de contamination obtenues sont confrontées avec les données de qualité des eaux souterraines afin de déterminer le meilleur indicateur.

- **Calcul d'un indice global de risque à l'échelle de la masse**

Un indice global de risque est calculé à l'échelle de la masse pour chaque molécule pour *in fine* pouvoir comparer le risque de contamination en phytosanitaires par masse d'eau.

- **Croisement des deux sources d'information : pression et risque de contamination pour établir le lien pression impact à la masse d'eau souterraine (MESO)**

Enfin, le lien pression-impact est établi en croisant les deux sources d'information : pression et risque de contamination à l'échelle de la masse d'eau souterraine. La validation des pressions significatives est effectuée à partir d'informations sur la persistance des molécules et des analyses de concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines.

Un exemple d'application de la méthode est réalisé sur le département de la Martinique.

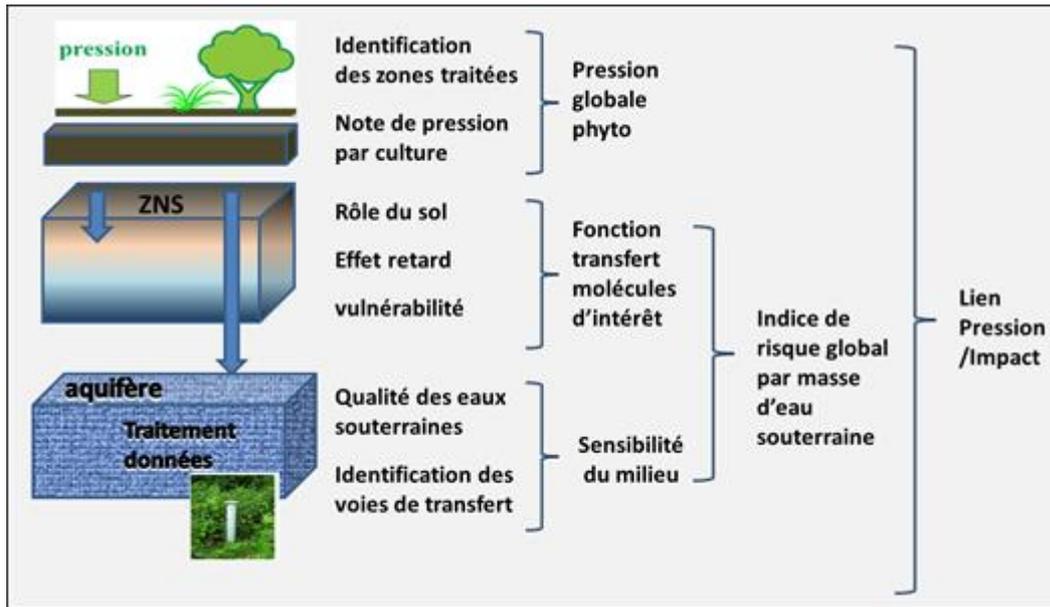


Figure 2 Schéma de l'approche méthodologique proposée pour l'analyse pression-impact phytosanitaires en DOM

2 Pression brute en produits phytosanitaires

2.1 LES PRATIQUES AGRICOLES

2.1.1 Les statistiques agricoles des DOM

Le *Tableau 1* présente la surface agricole utilisée (SAU) absolue et relative (par rapport à la superficie totale du DOM) dans les cinq DOM selon le registre agricole de 2010. Les DOM présentant les SAU relatives les plus grandes sont la Martinique et la Guadeloupe.

Tableau 1 - La surface agricole utilisée dans les DOM (selon RA 2010 source : agreste)

DOM	Surface totale (km ²)	Surface agricole utilisée (SAU) (ha)	Proportion de la surface totale couverte par SAU
Guyane	83846	25133	0.3
Guadeloupe	1628	31768	19.5
Martinique	1128	24975	22.1
La Réunion	2512	42810	14.8
Mayotte	660	7100	10.8

Le *Tableau 2* liste les cultures les plus importantes (en termes de surface) des cinq DOM.

Tableau 2 - Principales productions agricoles dans les DOM en 2015 (source : agreste 2015)

Principales productions agricoles en 2015					
	Guadeloupe	Martinique	Guyane	La Réunion	Mayotte
	(tonne)				
Canne à sucre	662 780	219 278	8 154	1 896 104	0
Riz	0	0	800	0	20
Banane (fruit)	69 322	199 242	8 874	5 148	575
Ananas	2 374	375	12 540	14 280	3 470
Agrumes	1 597	846	3 677	8 413	1 058
Tubercules	3 402	1 878	40 550	886	16 386
Tomates, choux, salades, concombres et pastèques	12 917	5 720	13 432	32 967	2 704
	(hectolitre)				
Lait vache, livraisons à l'industrie	0	3 645	0	187 800	6 800
	(tonne-équivalent-carcasse)				
Bovins	1 859	1 014	392	1 586	478
Porcins	1 559	1 056	445	10 271	0
Ovins - Caprins	106	60	5	441	40
Volailles	1 055	1 807	134	17 884	144

Source : Agreste - Statistique agricole annuelle (2015 semi-définitive)

Les conclusions suivantes sont valables pour les campagnes 2014/2015, en fonction des DOM, le paysage agricole a pu être modifié ces dernières années. Pour la campagne 2014/2015, les informations qui peuvent être retenues sont :

- La culture dominante de La Réunion et de la Guadeloupe est la canne à sucre.
- La culture la plus importante de la Martinique et Mayotte est la banane.

- Dans tous les DOM sauf Mayotte une forte proportion de la SAU (28-45 %) est couverte par des surfaces toujours en herbe (pâturages ou prés) et des cultures fourragères.
- En Guyane, un quart de la SAU est utilisée pour la production des tubercules, notamment le manioc. La Guyane a également des proportions importantes couvertes par le riz et « autres cultures fruitières » (non-banane, non-ananas).
- A Mayotte les cultures les plus importantes après la banane sont le manioc et l'ambrevade (pigeon pea, *Cajanus cajan*). Il faut noter que l'agriculture et l'élevage à Mayotte sont surtout du type subsistance (http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_D97611A01.pdf)

Le Recensement Agricole 2010 a bien été conduit pour les cinq DOM. Néanmoins, des résultats quantitatifs pour les surfaces des différentes cultures dans les DOM sont difficiles à collecter.

Les fichiers Excel sur la page des résultats du RA2010 (<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/>), notamment le fichier cultures-ensemble.xls, ne contiennent pas les catégories de culture pertinentes pour les DOM.

L'information disponible sur les pages des Directions de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF) est très variable selon les DOM (il n'y a pas d'information pour la Guyane, par exemple). La page du ministère en charge de l'agriculture (<http://agriculture.gouv.fr/Outre-Mer/>) contient surtout des informations générales.

2.1.2 Cas de la Martinique

Le Tableau 3 présente les surfaces des principales cultures de la Martinique aux dates des derniers recensements agricoles (Agreste Martinique, 2011). Sur la période étudiée (1981-2010), la Martinique a perdu environ 39% de sa Superficie Agricole Utilisée. La SAU était, en effet, d'environ 41 000 ha en 1981 et, en 2010, elle n'était plus que de 25 000 ha.

Les exploitations de canne à sucre, de banane et d'élevage bovin pour la viande sont les plus nombreuses et sont celles qui occupent majoritairement l'espace agricole de la Martinique. La part de ces productions dans la SAU passe en 10 ans de 80 % à 76 %. La canne à sucre occupe désormais 16 % de la SAU avec une tendance à se rapprocher de celles des cultures de banane. Sur la période entre 2000 et 2010, celles qui ont subies la plus forte baisse sont les productions maraîchères et vivrières, les élevages de porcins et de bovins laitiers avec une réduction de plus de 90% du nombre d'exploitations.

La baisse est particulièrement importante pour les surfaces en toujours en herbe (-56%), les vergers (-46%) et les productions légumières (-62%). La baisse est beaucoup moins importante pour la canne (-12%) et pour la banane (-11%). Cette différence relative dans la baisse des superficies entraîne une intensification de la production de culture d'exportation puisque la canne et la banane représentaient respectivement 11% et 18% de la SAU en 1981 et en représente 16% et 26% en 2010.

Tableau 3 - Recensements agricoles 2000 et 2010 en Martinique – source Agreste

	2000			2010		
	Exploitations (Expl)	Superficie (ha)	% de la SAU	Exploitations (Expl)	Superficie (ha)	% de la SAU
Canne à sucre	366	3 293	10	278	4 067	16
Plantes aromatiques (1)	334	78	-	314	112	-
Cultures légumières (tubercules et légumes)	3 310	3 062	10	1 536	2 602	10
Fleurs et plantes ornementales	374	187	1	126	146	1
Superficie toujours en herbe et en fourrage	5 466	13 617	42	1 710	8 576	34
Cultures fruitières	1 674	10 352	32	1 017	7 349	29
Banane	1 289	9 308	29	692	6 396	26
Ananas	126	510	2	46	92	-
Autres fruits (agrumes, tropicaux...)	326	533	2	440	861	3
Autres cultures	40	13	-	17	20	-
Jachères	525	1 394	4	624	2 093	8
Jardins et vergers familiaux	861	45	-	168	10	-
Superficie agricole utilisée (SAU)	8 039	32 041	100	3 307	24 975	100

(1) Plantes aromatiques, à parfum, médicinales et condimentaires

Source : Agreste - Recensements agricoles

La Figure 3 présente l'évolution des surfaces agricoles en Martinique. Globalement, il n'y a pas d'importantes modifications dans la distribution des cultures entre 2000 et 2010. La figure présente néanmoins une baisse générale de la surface agricole surtout au dépend des surfaces toujours en herbe et de fourrages. Les cultures de banane et de canne à sucre baissent aussi mais résistent en terme de proportion. Le pourcentage de la SAU occupée par la production de canne à sucre est même en augmentation entre les deux dates d'étude (de 10% de la SAU à 16% de la SAU).

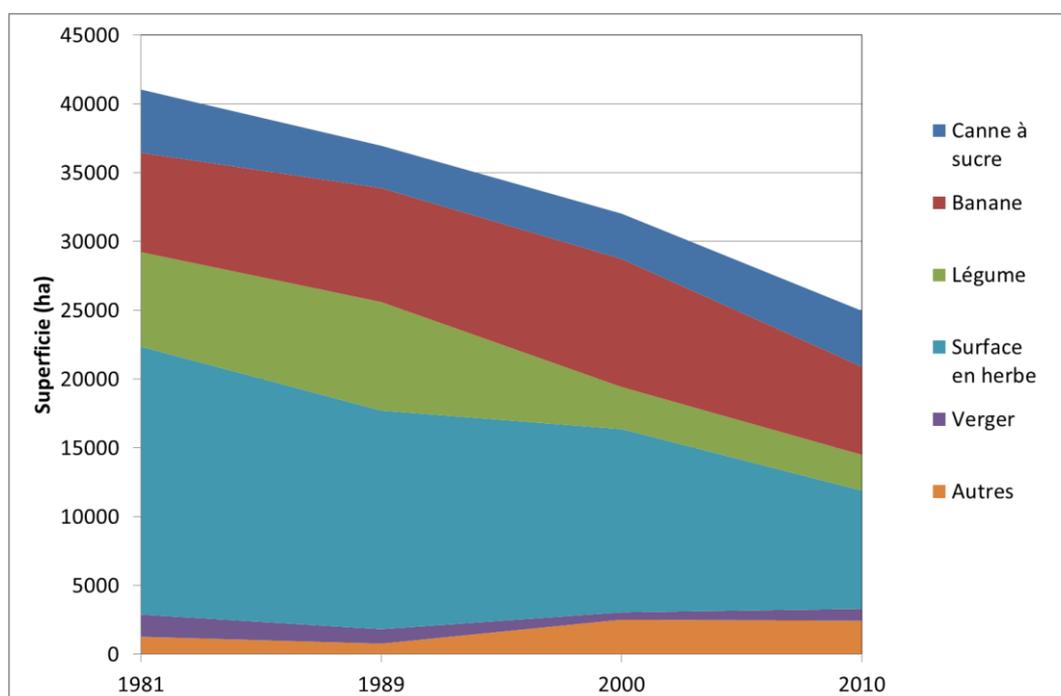


Figure 3 Evolution des surfaces agricoles en Martinique

La pression agricole est, d'un point de vue des surfaces, plutôt en baisse, en effet presque la moitié de la SAU de la Martinique a été perdue. Néanmoins, les cultures les moins consommatrices en produits phytosanitaires sont celles dont la perte de superficie a été la plus importante. La surface n'est donc pas un indicateur direct de la pression mais elle peut être prise en compte pour comprendre l'évolution de la pression.

2.2 CALCUL DE LA PRESSION BRUTE EN PRODUITS PHYTOSANITAIRES

2.2.1 Principe

La démarche proposée consiste à déterminer la pression agricole due aux traitements phytosanitaires en attribuant une note par jugement d'expert à chaque culture. L'unité de travail choisi pour les DOM est la masse d'eau souterraine.

Cette démarche est basée sur plusieurs étapes :

- 1) Connaissance des cultures du territoire
- 2) Application d'une note de pression par culture.
- 3) Calcul de la pression brute à l'échelle de l'unité de travail
- 4) Etablissement de la carte de pression brute en produits phytosanitaires

Chaque étape de la démarche est expliquée par des exemples appliqués sur le territoire de la Martinique.

2.2.2 Connaissance des cultures du territoire

Cas général

La démarche utilisée vise à attribuer une note de pression due aux produits phytosanitaires à chaque culture du territoire. La première étape est donc de faire un inventaire des cultures principales et obtenir une connaissance de l'occupation du sol. Des enquêtes ont déjà été réalisées par plusieurs organismes professionnels ou par le Ministère de l'Agriculture. Un travail de recherche bibliographique est donc à mener afin d'obtenir les différentes sources de données disponibles.

La source de données préconisée, car la plus précise disponible, est le Registre Parcellaire Graphique (ou RPG). Il est utilisé pour l'établissement des cartes dans la méthodologie proposée (ASP, 2013). Le RPG est développé dans le cadre du suivi des aides PAC données aux agriculteurs. Le RPG est un système d'information géographique permettant l'identification des parcelles agricoles et des cultures qui y sont assolées, ainsi que d'obtenir certaines informations sur les exploitations agricoles concernées. Ces informations sont disponibles sur la France entière (sauf Mayotte), de manière exhaustive sur les surfaces déclarées à la PAC, soit la quasi-totalité des surfaces en herbe et cultivées, à l'exception de certaines cultures pérennes pour lesquelles les informations sont plus fragmentaires. L'îlot est l'unité cartographique de base des données RPG. Un îlot correspond à un ensemble contigu de parcelles culturales exploitées par un même agriculteur. Le lecteur peut consulter l'annexe 2 pour plus de détails sur le RPG et notamment pour la signification des codes de groupe de cultures dans la base. La répartition des cultures selon le RPG est présentée dans le paragraphe suivant pour la Martinique et en annexe 3 pour les autres DOM.

La base de données géographique CORINE Land Cover (ou CLC) est un inventaire biophysique de l'occupation des terres (CLC, 2012). Il est produit dans le cadre du programme européen d'observation de la terre Copernicus (39 États européens). Données de référence, CORINE Land Cover est issue de l'interprétation visuelle d'images satellitaires et est disponible pour les années suivantes : 1990, 2000, 2006 et 2012. La métropole et les DOM sont concernés (pour la Guyane, uniquement la bande côtière). Dans la méthodologie

proposée, CLC est utilisée pour établir un masque sur les surfaces non agricoles sur la carte de pression brute en phytosanitaires.

Il est aussi possible d'utiliser la base de données mise à disposition par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation afin d'obtenir des informations à l'échelle communale ou l'échelle départementale (DISAR, 2015). Les données statistiques disponibles permettent de connaître la Superficie Agricole Utilisée (SAU¹) ainsi que la répartition de cette superficie entre les cultures (ex : blé, maïs, colza). Ces données sont issues d'enquêtes auprès des exploitations agricoles. A l'échelle communale, étant donné le faible nombre d'exploitants par commune, il arrive que certaines données soient recouvertes par le secret statistique; la SAU peut donc être supérieure à la somme des superficies des cultures la composant.

Cas de la Martinique

Les surfaces agricoles sont occupées en majorité par les exploitations de bananes (≈ 7000 ha) et de canne à sucre (≈ 4000 ha) en 2009 (Nicar, 2009). La baisse du nombre d'exploitations bananières est deux fois moindre qu'en Guadeloupe mais le même phénomène général est observé (Didier, 2011). La plupart des exploitations bananières sont concentrées sur la côte nord-ouest de l'île. Les plantations de canne à sucre représentent des zones assez restreintes sur l'ensemble de l'île (Figure 4).

Les parcelles en légumes (≈ 1800 ha) et tubercules (patates douces) représentent des surfaces relativement restreintes mais à forte valeur ajoutée (Nicar, 2009). Hormis le melon, produit en contre-saison, les légumes de l'île n'ont pas de vocation exportatrice (Odeadom, 2003). Les exploitations en melons sont rassemblées dans la pointe sud de l'île. Hormis la banane, la Martinique exporte des quantités importantes d'ananas dont les exploitations (≈ 100 ha) sont réunies au nord de l'île (Figure 4).

¹ La superficie agricole utilisée (SAU) est une notion normalisée dans la statistique agricole européenne. Elle comprend les terres arables (y compris pâturages temporaires, jachères, cultures sous abri, jardins familiaux...), les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes, vergers...).

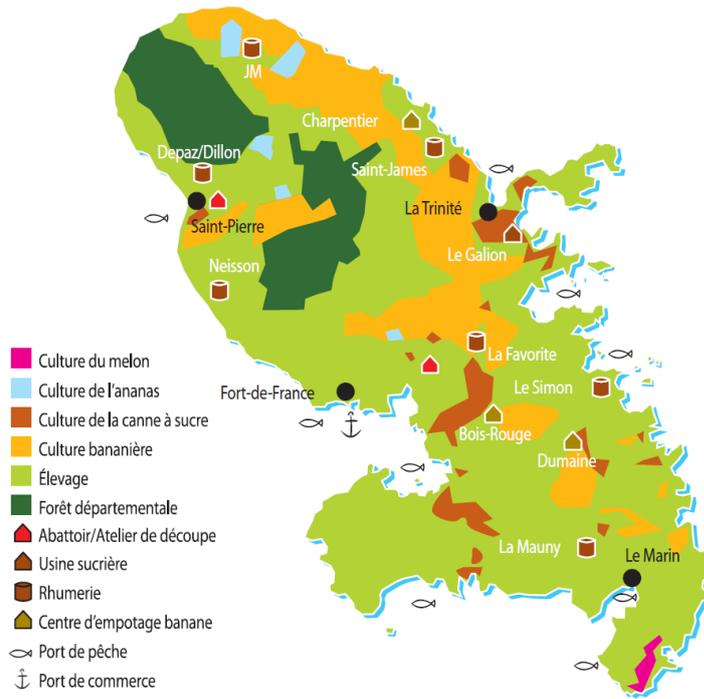


Figure 4 Carte des productions agricoles de Martinique (Odeadom, 2010)

A l'échelle de la Martinique, en utilisant les valeurs disponibles dans les bases de données du RPG (cf. annexe 2), 16 types de cultures ont été recensés ; elles représentent les cultures majoritaires du département en terme de superficie. Le Tableau 4 résume l'ensemble des cultures de Martinique ainsi que leurs superficies. Les cultures déterminées par cette méthode sont en accord avec les études précédentes, y compris locales (Odeadom, 2010).

Tableau 4 - Répartition des cultures en Martinique d'après le RPG

Code Groupe Culture	groupements cultures	cultures	superficie	%
	Total général		22681,63	100,0%
27	arboriculture	agrumes, banane, café, ananas	6560,82	28,9%
18	prairies permanentes	prairies naturelles, prairies permanentes de plus de 5 ans	6413,05	28,3%
26	canne à sucre		3830,62	16,9%
25	légumes-fleurs	pomme de terre, légumes de plein champ, maraîchage sous serre, fleurs	1814,56	8,0%
28	divers	autres cultures, bois, cultures énergétiques, haies, mare	1510,92	6,7%
13	autres gels	gel vert, gel légumineuse	1354,07	6,0%
20	vergers		520,91	2,3%
19	prairies temporaires		509,96	2,2%
17	estives landes		128,68	0,6%
2	maïs grain et ensilage		16,49	0,1%
16	fouillage		10,72	0,0%
24	autres cultures industrielles		10,01	0,0%
8	protéagineux		0,3	0,0%
4	autres céréales		0,21	0,0%
7	autres oleagineux		0,21	0,0%
22	fruit à coque		0,1	0,0%

2.2.3 Etablissement d'une note par culture

Cas général

Afin de pouvoir attribuer une note pour une culture donnée, il faut en connaître les pratiques agronomiques. Cette étude est possible en consultant les documents des instituts techniques agricoles et des chambres d'agriculture (ex : IT2, 2011; CA Martinique, 2007a; CA Martinique, 2007b). L'annexe 4 présente ce qu'il est possible de récolter comme information grâce à une étude des pratiques culturales, ici, pour la canne à sucre. Il est aussi possible de contacter une personne ressource sur le territoire pour effectuer la notation. Les gammes de pression seront définies spatialement en indiquant cinq classes : très fort, fort, moyen, faible, très faible.

Pour effectuer une notation, par jugement d'expert, deux paramètres vont entrer en compte :

- 1) d'abord le cycle de la culture
- 2) ensuite, les pratiques culturales au niveau des produits phytosanitaires.

L'annexe 5 présente une analyse du cycle cultural pour la banane en Martinique. Toutes ces données ont été recueillies auprès des instituts spécialisés. L'analyse présente généralement la culture depuis le semis/plantation jusqu'à la récolte. Néanmoins, certains produits phytosanitaires sont appliqués à l'interculture (comme certains herbicides) et l'analyse doit être étendue avant le semis/plantation.

Il est généralement admis que moins le couvert est important, plus le risque de transfert est fort. De même, plus les précipitations sont importantes, plus le risque de transfert est fort (Calvet, et al., 2005). L'analyse du cycle cultural doit donc s'attacher à détecter les périodes

où les couverts végétaux sont les plus faibles et celles où les précipitations sont les plus fortes. De manière générale, une application de produits en quantité importante lors de la période la plus humide sur sol nu amène à la note la plus forte (note = 10) tandis qu'une application de produits en période sèche en petite quantité amène à une note faible (note = 1). De plus, les propriétés physico-chimiques de la molécule sont considérées.

En effet, il est généralement admis que plus un produit phytosanitaire a un K_{oc} faible, plus il a un risque fort de transfert. De même, plus un produit phytosanitaire est appliqué à une dose importante (en kg/ha), plus il a un risque fort de transfert vers les eaux (Calvet, et al., 2005). Une culture aura une note forte (note = 10) si elle reçoit beaucoup de produits de ce type surtout si l'application a lieu durant une période peu propice (couvert faible, période pluvieuse).

Une analyse est réalisée pour une parcelle type, néanmoins il est parfois nécessaire de réaliser plusieurs analyses car des pratiques différentes peuvent exister sur le terrain. Une culture reçoit un nombre important de traitements et les pratiques culturales peuvent parfois être très diversifiées. Il peut être difficile de juger et d'attribuer une note. La réunion de plusieurs experts peut être intéressante pour confronter les avis. Des notes ont déjà été attribuées dans plusieurs projets pour un certain nombre de cultures, il est possible de réaliser une étude comparative afin d'attribuer des notes.

En résumé, les hiérarchisation et cotation de la pression « produits phytosanitaires » en fonction du type de culture sur la base du RPG pour les DOM sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 5). Il y a trois classes de pression (faible, moyen et fort) associées à trois coefficients de pression (1, 5 et 10). Ce choix de pondération permet de bien distinguer les trois classes.

Tableau 5 - Hiérarchisation et cotation de la pression « produits phytosanitaires » en fonction du type de culture sur la base du RPG pour les DOM

CODE GROUPE CULTURE	groupements cultures	cultures	Qualification pression	Coef pression
2	maïs grain et ensilage		faible	1
4	autres céréales		faible	1
7	autres oléagineux		faible	1
8	protéagineux		faible	1
13	autres gels	gel vert, gel légumineuse	faible	1
14	riz		moyen	5
16	fourrage		faible	1
17	estives landes		faible	1
18	prairies permanentes	prairies naturelles, prairies permanentes de plus de 5 ans	faible	1
19	prairies temporaires		faible	1
20	vergers		faible	1
21	vignes		fort	10
22	fruit à coque		faible	1
24	autres cultures industrielles		faible	1
25	légumes-fleurs	pomme de terre, légumes de plein champ, maraîchage sous serre, fleurs	fort	10
26	canne à sucre		moyen	5
27	arboriculture	agrumes, banane, café, ananas	fort	10
28	divers	autres cultures, bois, cultures énergétiques, haies, mare	faible	1

Application à la Martinique

Le Tableau 6 présente les notes de pression « produits phytosanitaires » en fonction du type de culture sur la base du RPG pour la Martinique.

Tableau 6 - Pression « produits phytosanitaires » en fonction du type de culture sur la base du RPG pour la Martinique

CODE CULTURE	groupements cultures	cultures	superficie	%	Qualif pression	Coef pression
	Total général		22681,63	100,0%		
27	arboriculture	agrumes, banane, café, ananas	6560,82	28,9%	fort	10
18	prairies permanentes	prairies naturelles, prairies permanentes de plus de 5 ans	6413,05	28,3%	faible	1
26	canne à sucre		3830,62	16,9%	moyen	5
25	légumes-fleurs	pomme de terre, légumes de plein champ, maraîchage sous serre, fleurs	1814,56	8,0%	fort	10
28	divers	autres cultures, bois, cultures énergétiques, haies, mare	1510,92	6,7%	faible	1
13	autres gels	gel vert, gel légumineuse	1354,07	6,0%	faible	1
20	vergers		520,91	2,3%	faible	1
19	prairies temporaires		509,96	2,2%	faible	1
17	estives landes		128,68	0,6%	faible	1
2	maïs grain et ensilage		16,49	0,1%	faible	1
16	fourrage		10,72	0,0%	faible	1
24	autres cultures industrielles		10,01	0,0%	faible	1
8	protéagineux		0,3	0,0%	faible	1
4	autres céréales		0,21	0,0%	faible	1
7	autres oleagineux		0,21	0,0%	faible	1
22	fruit à coque		0,1	0,0%	faible	1

2.3 CARTE DE PRESSION BRUTE EN PRODUITS PHYTOSANITAIRES

2.3.1 Carte résultante à l'échelle de la parcelle

Cas général

Les notes de pression présentées dans le Tableau 5 ont été attribuées aux cultures correspondantes pour chacune des parcelles disponibles du RPG 2013 (ASP, 2013). Une parcelle correspond généralement à l'ilot pour les DOM mais si les deux unités spatiales diffèrent, un calcul de pondération par la surface est appliqué.

Compte tenu de l'échelle d'acquisition des données (la parcelle agricole), la première carte disponible sera celle présentant la pression parcelle par parcelle. Bien que permettant un rendu très précis, la carte au niveau parcellaire ne peut être utilisée en l'état pour plusieurs raisons. D'une campagne à l'autre, les cultures changent de parcelle et la carte est modifiée.

Il faut donc utiliser une unité spatiale d'intégration suffisamment large pour gommer cet effet de succession de cultures.

L'effet des rotations culturales est minimisé dans les DOM car les cultures principales de surface comme la canne à sucre, la banane et les prairies ont tendance à être cultivées plusieurs années de suite sur la même parcelle sans succession.

La carte de résultats à la parcelle peut néanmoins être utile lors d'une étape de validation point par point (cf. § 4.2). En effet, il est possible grâce à cette carte de discriminer facilement les points situés dans une zone agricole des points qui ne le sont pas ou de discriminer les points dans les zones à pression forte des points dans les zones à pression moins forte.

Application à la Martinique

Pour la Martinique, 11294 parcelles ont été déclarées ce qui correspond à 20 % de la surface totale du département. Un exemple de carte résultant à l'échelle de la parcelle est présenté sur la Figure 5.

Pressions Pesticides Ilots

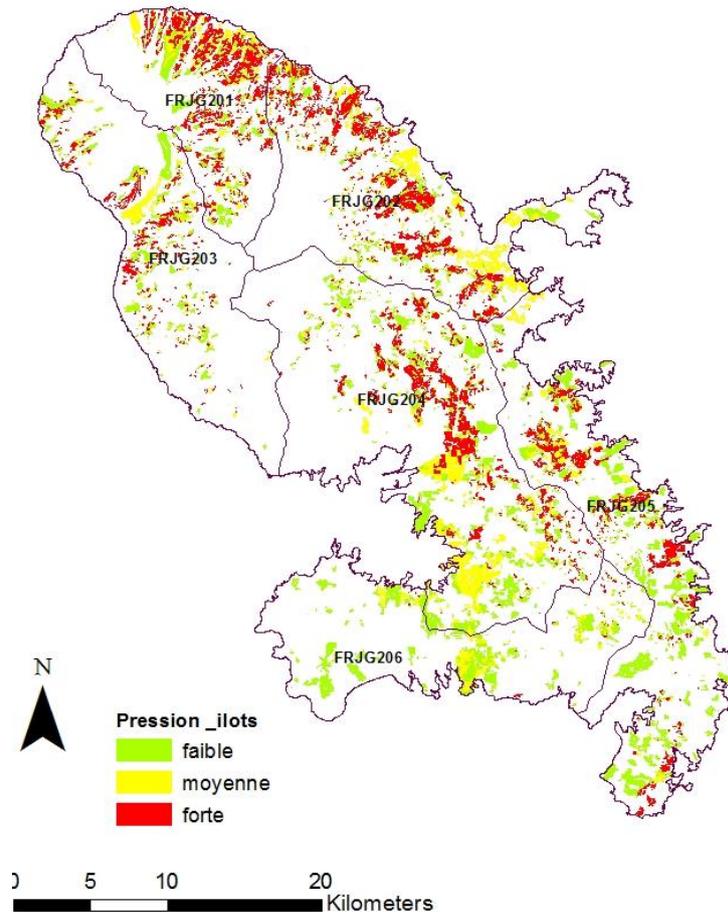


Figure 5 Carte de la pression pesticides par ilot (d'après le RPG) en Martinique

2.3.2 Cartes résultantes à l'échelle de la masse d'eau

Cas général

Une méthode d'agrégation a été mise au point pour transformer les notes au niveau parcellaire en notes au niveau des masses d'eau souterraine. Cette méthode prend en compte la note de chaque parcelle et la pondère par la surface relative de chacune de parcelle dans la SAU. La formule se présente sous la forme suivante :

$$\text{Note}_{\text{MasseEau}} = \frac{\sum \text{Note}_{\text{parcelle}} \times \text{Surf}_{\text{parcelle}}}{\text{Surf}_{\text{TotaleAgr}}}$$

Avec : $\text{Note}_{\text{MasseEau}}$: Note moyenne de la pression pour la masse d'eau

$\text{Note}_{\text{parcelle}}$: Note de la pression pour une parcelle

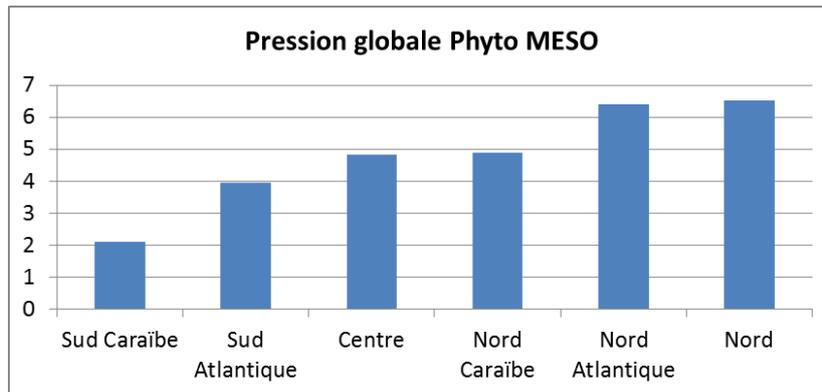
$\text{Surf}_{\text{parcelle}}$: Surface de la parcelle

$\text{Surf}_{\text{TotaleAgr}}$: Surface totale agricole (recouverte par des parcelles à usage agricole)

Cette méthode d'agrégation permet de prendre en compte la superficie de chaque parcelle : plus une parcelle sera grande et plus elle aura d'impact sur la masse d'eau ; cela reste cohérent avec ce qui est observable sur le terrain.

Application à la Martinique

Le tableau ci-dessous présente les résultats par masse d'eau souterraine pour les pressions agricoles phytosanitaires en Martinique (Figure 6). La masse d'eau présentant la note la plus forte est la masse d'eau FRJG201, cela s'explique par les surfaces importantes que représente la culture de la banane sur cette masse d'eau. La masse d'eau présentant la note la plus faible est la FRJG206, cela est dû l'absence de cultures importantes sur cette masse d'eau.



CdEuMasseD	MESO	Pression brute
FRJG206	Sud Caraïbe	faible
FRJG205	Sud Atlantique	moyen
FRJG204	Centre	moyen
FRJG203	Nord Caraïbe	moyen
FRJG202	Nord Atlantique	fort
FRJG201	Nord	fort

Figure 6 Pression globale en phytosanitaires par masse d'eau souterraine en Martinique

La Figure 7 représente les notes de la pression globale sous forme de carte. Un masque est appliqué sur la base du CLC en sélectionnant les territoires agricoles. Cette représentation graphique permet de visualiser les notes appliquées sur l'espace agricole uniquement. Cette représentation permet aussi de se rendre compte de l'importance des surfaces cultivées à l'échelle de la masse d'eau souterraine.

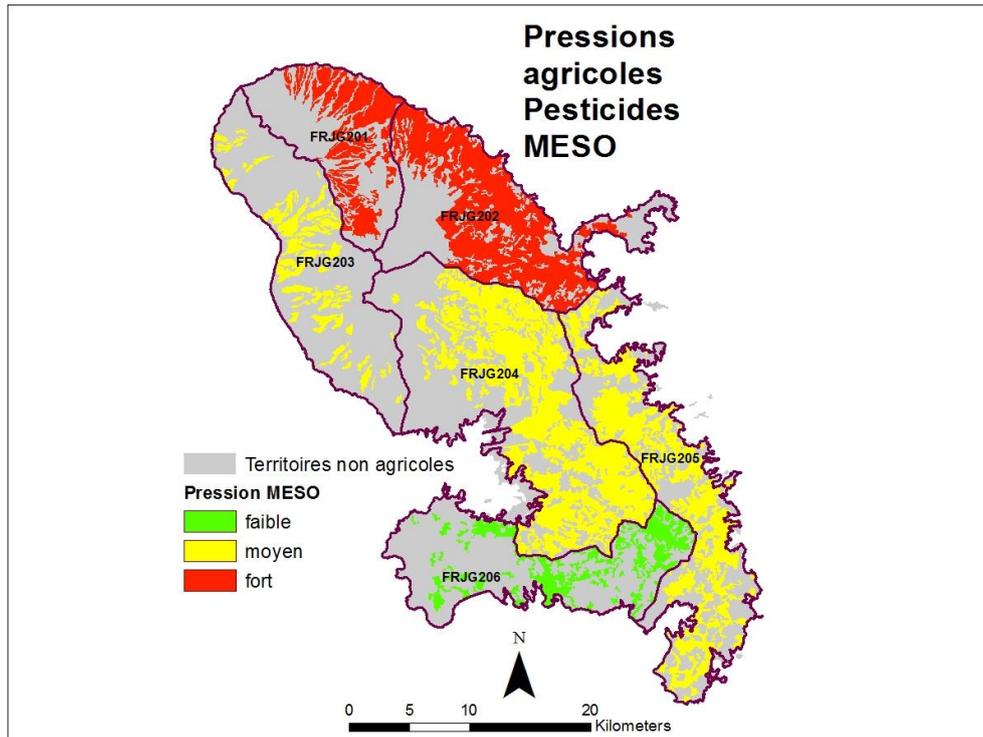


Figure 7 Carte de pression pesticides à la masse d'eau souterraine avec masque CLC

2.4 SYNTHÈSE DES ÉTAPES ET DES DONNÉES SUR LA PRESSION BRUTE EN PHYTOSANITAIRES

- Collecte de données sur les pratiques culturales actuelles et passées
- Cartographie des zones potentiellement traitées
- Etablissement de notes de pression par culture
- Calcul des pressions à l'échelle de la masse d'eau
- Etablissement de la carte de pression brute en phytosanitaires

Tableau 7 – Données et sources des bases de données utilisables pour l'analyse pression-impact en DOM

Données	Type	Source
Base d'occupation du sol	Carte	Corine Land Cover
	Table	Agreste (RA)
Pratiques culturales actuelles et passées	Carte	Registre Parcellaire Graphique (RPG)
	Couche cartographique	
Localisation des communes		
Besoin de la culture en phytosanitaires	Tableau	Données préconisation des chambres d'agriculture
IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement)	Tableau	Agreste DAAF
Masses d'eau souterraines	Couche cartographique	Sandre (portail EauFrance)

3 Etude du transfert des molécules

3.1 DEMARCHE GENERALE

L'étude du transfert des molécules et la méthode d'établissement des cartes de transfert se basent sur les travaux menés dans le cadre de l'étude cartographie du risque de contamination des eaux souterraines par les produits phytosanitaires en Martinique par Baran et al. en 2013.

L'étude du transfert des molécules est proposée selon les étapes suivantes :

- 1) Sélection des produits phytosanitaires d'intérêt pour l'étude.

En effet, il existe plus de 500 molécules autorisées en France. Ce nombre peut-être plus important en prenant les métabolites et les produits qui ne sont plus autorisés.

- 2) Détermination des applications potentielles pour les molécules étudiées
- 3) Etablissement de cartes de risque de contamination pour les molécules étudiées

Des cartes de risque sont établies pour les molécules sélectionnées sur la base de fonctions de transfert et de calculs du risque associé. Quatre méthodes différentes sont proposées, le choix se fera en fonction des données disponibles : GUS, AFT, GUS + vulnérabilité, AFT+ vulnérabilité

- 4) Comparaison avec la qualité des eaux souterraines pour chaque molécule étudiée.

A titre d'illustration, la méthodologique est présentée pour une molécule : le propiconazole sur le territoire de la Martinique. D'autres cartes de risque établies peuvent être consultées dans le rapport Baran et al. (2013).

3.2 SELECTION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES D'INTERET

3.2.1 Démarche pour sélectionner les produits phytosanitaires

Deux démarches complémentaires ont été suivies pour sélectionner les produits phytosanitaires. Les deux démarches permettent de récolter des informations de différents types.

La première démarche consiste à faire un inventaire des molécules détectées dans les eaux souterraines à partir des valeurs disponibles dans les bases de données (voir §3.2.2). L'intérêt d'utiliser ces valeurs est de connaître les produits phytosanitaires qui ont un fort impact connu. Cela permet d'orienter les méthodes vers certains types de pratiques ou certains types de propriétés de molécules sans préjuger des propriétés intrinsèques de l'aquifère à permettre le transfert des molécules. Cette démarche permet de tirer des conclusions sans être gêné par le temps de transfert de l'eau et des produits phytosanitaires puisque ces produits présentent des risques avérés et non potentiels. Cette démarche peut néanmoins révéler des produits phytosanitaires déjà interdits.

La seconde démarche consiste à faire l'inventaire des molécules les plus utilisées actuellement (voir §3.2.3). L'intérêt de connaître les molécules les plus utilisées actuellement est de savoir quels produits phytosanitaires ont un fort impact potentiel. Plusieurs sources de

données peuvent être utilisées pour obtenir ces informations. Cette démarche peut néanmoins mettre en avant des produits phytosanitaires qui ne présentent pas de risque de contamination des eaux souterraines du fait de leurs propriétés physico-chimiques.

3.2.2 Sélection des produits à partir des chroniques dans les eaux souterraines

Cas général

Le principe de cette sélection est de déterminer l'ensemble des produits phytosanitaires ayant un impact avéré sur les eaux souterraines. Pour réaliser cette tâche simplement, il a été décidé d'utiliser des méthodes déjà existantes.

Pour connaître l'impact, cette étude s'est basée sur les dépassements de la valeur seuil ou de la norme pour les produits phytosanitaires. Cette méthode en 4 étapes a été mise au point pour l'état des lieux des eaux souterraines (Circulaire du 23 octobre 2012). Deux paramètres sont calculés, la moyenne des moyennes annuelles (*Mma*) qui sera comparée aux valeurs seuils ou aux normes et la fréquence de dépassement de la norme ou valeur seuil (*Freq*) qui ne devra pas dépasser 20%.

Pour chaque produit phytosanitaire et chaque point, le calcul de la qualité se fera ainsi :

- 1) Prendre tous les résultats issus des réseaux disponibles sur la période considérée (de 2008 à 2015 pour cet exemple),
- 2) Pour chacune des années de contrôle et en chaque point, calculer la moyenne annuelle des concentrations (y compris si le nombre de données disponibles d'une année à l'autre est différent)
- 3) Faire la moyenne des moyennes annuelles (*Mma*).
- 4) Faire la fréquence de dépassement de la norme ou valeur seuil (*Freq*) (les chroniques doivent compter au moins 5 valeurs sinon ce critère de 20% ne pourra pas être appliqué)

Dans le cadre de cette étude méthodologique, les valeurs seuils indiquées dans la circulaire de 2012 ont été utilisées. Les molécules sont sélectionnées si la *mma* dépasse la valeur seuil de 0,1 µg/l (pour la majorité des produits phytosanitaires) et si la *Freq* excède les 20%.

Dans le cas des métabolites, la recherche des parents des substances dérivés retrouvées dans les eaux peut se faire à partir de base de données (PPDB, 2015).

Application à la Martinique

Toutes les valeurs disponibles de produits phytosanitaires sur ADES² pour la Martinique depuis 1993 ont été extraites en mars 2016. La *mma* et la *Freq* ont été calculées pour les points d'eau et les produits phytosanitaires avec les données disponibles dans ADES à cette date. De cette analyse, il est ressorti 21 qualitomètres impactés et 13 molécules d'intérêt. Le Tableau 8 résume les produits phytosanitaires dont la fréquence de dépassement est supérieur à 0,2 et/ou la *mma*>0,1 µg/l dans les eaux souterraines en Martinique.

² Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

Tableau 8 - Produits phytosanitaires dont la fréquence de dépassement est supérieur à 0,2 et/ou la mma>0,1 µg/l dans les eaux souterraines en Martinique

Paramètres	Freq_depassement	MMA periode (µg/l)
AMPA	0,17	0,12
Asulame	0,22	0,06
Bromacil	1,00	2,20
Chlordécone	1,00	32,00
didéméthylisoproturon	0,25	0,02
Dieldrine	1,00	0,50
Diuron	0,30	0,09
Glyphosate	0,08	0,10
Hexachlorocyclohexane bêta	1,00	4,60
Hexazinone	0,33	0,09
Métalaxyl	0,41	0,25
Monuron	0,32	0,14
Propiconazole	0,96	0,72

Les informations trouvées concernant la recherche des molécules mères sont reportées dans le Tableau 9.

Tableau 9 - Substances sélectionnées à partir des eaux souterraines et molécules mères associés

Substances (fréquence de dépassement décroissant)	caractéristiques	parents
Chlordécone	Insecticide, non autorisé (1991)	
Hexachlorocyclohexane bêta	Insecticide	
Bromacil	herbicide, non autorisé (2008)	
Dieldrine	Insecticide, métabolite (interdite depuis 1973)	Aldrin
Propiconazole	fongicide, autorisé	
Métalaxyl	Fongicide approuvé dans certains pays mais pas en France (interdit depuis 2003)	
Hexazinone	Herbicide, interdit (2008), canne à sucre	
Monuron	Herbicide, interdit (1980)	
Diuron	Herbicide, interdit (2009), Canne à sucre, ananas, bananier	
didéméthylisoproturon	Métabolite	Isoproturon (herbicide autorisé)
Asulame	Herbicide, interdit (2013), canne à sucre	
AMPA	Métabolite	glyphosate
Glyphosate	Herbicide	

3.2.3 Sélection des produits à partir des applications actuelles

Cas général

Trois sources de données sont disponibles pour connaître les produits les plus utilisés sur un territoire.

La première source de données consiste à réaliser une étude des pratiques agronomiques des cultures principales du département. Ce type d'analyse est possible, mais à ce stade de l'étude, il n'est pas indispensable puisqu'il nécessite trop de temps pour le but à atteindre. Ce type d'étude sur les pratiques agronomiques a déjà été réalisé pour des cultures d'outre-mer (Ducreux, et al., 2014).

La deuxième source de données consiste à utiliser les registres d'importation des douanes. Cette source de données n'est utilisable que dans les territoires insulaires contrôlés que sont les DOM n'ayant pas de production locale de produits phytosanitaires. Cette source de données a déjà été utilisée dans les DOM y compris dans des travaux de rapportage européens (Ducreux, et al., 2013).

La troisième source de données consiste à utiliser la Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques pour les Distributeurs agréés (BNVD). La BNVD est alimentée depuis 2009 par les déclarations des bilans annuels des ventes de produits phytosanitaires par les distributeurs agréés auprès des Agences de l'eau dans le cadre des dispositions relatives à la redevance pour pollutions diffuses définies dans le cadre de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) de décembre 2006 et des dispositions associées en matière de traçabilité des ventes au niveau des distributeurs. Ce site donne accès aux données conformément à l'arrêté du 30 avril 2010 modifiant l'arrêté du 22 mai 2009 portant création par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema, actuellement AFB) d'un traitement automatisé d'informations nominatives et de données techniques associées dénommé « Banque nationale des ventes réalisées par les distributeurs de produits phytosanitaires ». Cette base de données permet de répertorier à la commune toutes les ventes de produits phytosanitaires réalisées chaque année. La principale contrainte de cette base de données vient du fait que les données sont actuellement disponibles à la commune du vendeur (distributeurs, coopératives) et non de la commune de l'acheteur (exploitation agricole) ou de la commune d'application (parcelles agricoles). A ce niveau de l'étude, il n'est pas utile de descendre à l'échelle communale pour connaître les produits les plus distribués à l'échelle du DOM.

Les trois sources de données sont complémentaires, chacun étant libre de privilégier la source la plus facile à mobiliser sur son territoire. Les données de BNVD semblent être de plus en plus accessibles, elles apparaissent comme les plus faciles à manipuler à l'échelle d'un territoire à cette étape de l'étude. Il faut toutefois garder à l'esprit les limites de cette base de données : elle n'est pas complète pour la Guyane car il y a des ventes parallèles non recensées provenant notamment du Surinam et elle peut être biaisée notamment aux Antilles car certaines ventes sont enregistrées sur une île mais redistribuées dans une autre.

Application à la Martinique

Le tableau de la Figure 8 résume les produits les plus vendus en Martinique de 2009 à 2014 selon la BNVD. Il s'agit essentiellement d'herbicides.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
glyphosate	11211,8	31176,3	32612,1	31221,9	41759,1	27376,6
asulame	400,0	11262,0	10790,0	11064,0		
glufosinate ammonium	9651,9	8252,9	8500,1	8927,1	8418,8	7911,0
2,4-d	6191,5	6125,9	4601,5	4702,4	4022,5	134,4
s-metolachlore	1734,0	3102,8	2487,2	3031,2	4248,8	
diquat	3423,0	2815,0	985,0	930,0	1036,0	1134,0
fosthiazate	2531,0	1747,0	2868,0	3091,0	2968,0	1492,0
difenoconazole	800,0	2032,1	3520,0	1930,3	4162,6	2338,8
mancozebe	551,7	1758,0	1860,4	1128,2	1129,1	168,3
propiconazole	960,1	1460,2	1080,2	315,1	1600,1	1055,0

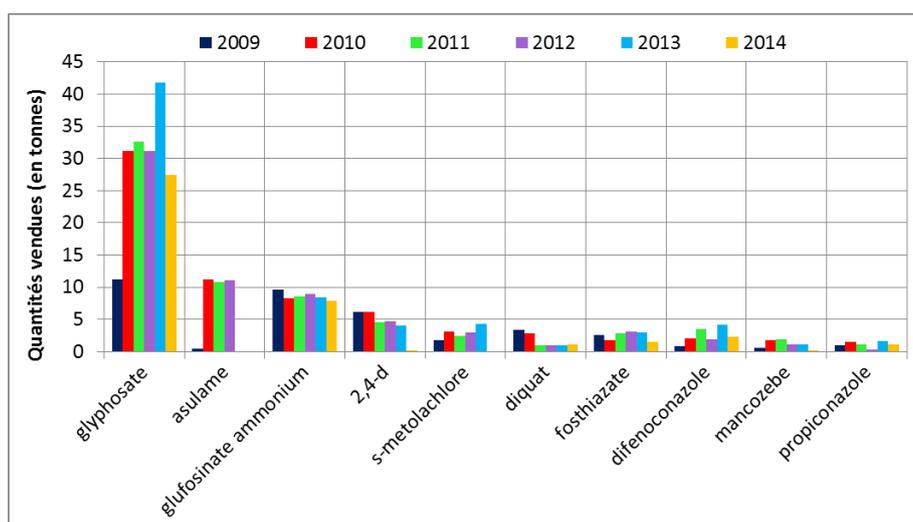


Figure 8 Produits phytosanitaires les plus vendus en Martinique de 2009 à 2014 selon la BNVD

3.2.4 Sélection finale des produits d'intérêts

La démarche de sélection de produits phytosanitaires a permis d'aboutir à deux listes. La première liste est basée sur un inventaire des molécules détectées dans les eaux souterraines (données disponibles dans la base ADES). La seconde liste est basée sur l'inventaire des molécules les plus utilisées de 2009 à 2014 selon la BNVD.

Ces deux listes mettent clairement en évidence, par leur divergence, le problème de la persistance des molécules et de l'existence d'un stock de ces substances dans le sol et/ou la zone non saturée, stock qui pourrait être remobilisé sous certaines conditions. Toutes améliorations de pratiques agricoles ne se traduisent alors que de façon différée sur la qualité de l'eau.

Les deux listes doivent être réunies pour obtenir une liste finale. Toutefois, avant la réunion des deux listes, certains produits de dégradation connus peuvent être ajoutés à la liste issue de la BNVD car ils peuvent exercer une pression du fait de l'application de la molécule mère. Les produits de dégradation ne sont pas distingués dans la BNVD car, par définition, ils ne sont pas vendus. La détermination de ces métabolites les plus pertinents est basée sur des jugements experts et sur l'indication de pertinence données dans la base de données PPDB (2015).

3.2.5 Synthèse des données utilisées pour la sélection des molécules :

ADES	Base de données sur la qualité des eaux souterraines	http://www.adeseaufrance.fr/
BNVD (Banque Nationale des Ventes de produits phytosanitaires pour les Distributeurs)	Base de données sur la quantité de substance active vendue par commune	https://bnvd.ineris.fr/
Lien entre produit phytosanitaire utilisé et leurs usages		http://index-matphyto.univ-lyon1.fr/ http://matphyto.acta-informatique.fr/
Recherche de parents des substances dérivés		http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm
Propriétés des molécules K _{oc} / DT ₅₀ K _{oc} : coefficient de partage carbone organique/eau DT ₅₀ : demi-vie des molécules		Base de données SIRIS

3.3 DETERMINATION DES APPLICATIONS POTENTIELLES POUR LES MOLECULES ETUDIEES

3.3.1 Etudes des usages des produits phytosanitaires dans les DOM

Des travaux de recoupement entre molécules phytosanitaires et cultures associées ont été menés dans diverses études (Baran et al. 2013, Ducreux et al. 2014). Les Tableau 10 et Tableau 11 en sont les illustrations.

Tableau 10 - Usages historiques et actuels des molécules étudiées en Martinique (Baran et al. 2013)

Paramètre	Groupe	Dernière date Utilisation	usages	cultures tropicales
Glyphosate	Herbicides	en cours	tous types de cultures	C. fruitières
2,4-D	Herbicides	En cours		canne à sucre
S-métolachlore	Herbicides	En cours		canne à sucre, ananas, coloquinte porte-graine
Asulame	Herbicides	2012		Canne à sucre
Propiconazole	Fongicides	En cours		Bananiers Maraîchage (usage détourné)
Diuron	Herbicides	2008		Canne à sucre, ananas, bananier
Chlordécone				Banane
Oxamyl				Ananas, Banane

Tableau 11 - Matrice « activité agricole – produit phytosanitaire » créée pour la Guadeloupe (source : Rapport BRGM/RP-63816-FR)

Paramètre	Code SANDRE	Activités agricoles				
		Canne à sucre	Banane	Maraichage	Plante arom.	Autre
Acétochlore	1903	X				
Aldicarbe sulfoxyde	1806		X			
AMPA	1907	X	X			
Anthraquinone	2013					X
Atrazine	1107	X				
Atrazine déisopropyl	1109	X				
Atrazine déséthyl	1108	X				
Chlordécone	1866		X			
Dicamba	1480	X				
Dieldrine	1173		X			
Dinitrocrésol	1490			X		
Diuron	1177	X				
Glyphosate	1506	X	X			
HCH bêta	1201		X			
HCH gamma	1203		X			
Hexazinone	1673	X				
Métamitron	1215				X	
Métolachlore	1221	X				
Métoxuron	1222			X		
Métribuzine	1225	X				
Monuron	1228	X				
Propyzamide	1414			X		
Simazine	1263	X	X			
Terbuthylazine déséthyl	2045	X	X			
Thiabendazole	1713		X			
Tridémorphe	1811		X			

3.3.2 Cartes résultantes d'application potentielle des molécules

Cas général

Les cartes d'application potentielle définissent les secteurs ayant pu avoir une application des molécules étudiées ou non. Elles sont établies à partir des parcelles agricoles en partant de l'hypothèse qu'une application a pu être réalisée sur toutes les parcelles sur lesquelles la molécule était autorisée. Dans la couche cartographique associée, la valeur du champ associé à l'application potentielle vaut 0 ou 1.

Ces données cartographiques des cultures sont disponibles à l'échelle parcellaire alors que les autres données (pédologie, vulnérabilité, etc.) sont, dans le meilleur des cas, à l'échelle du 1 / 50 000. Ainsi, dans le but d'assurer une cohérence entre les différentes couches d'information, un tampon de 50 mètres a été appliqué à chaque parcelle et les polygones d'une superficie inférieure à 1 hectare ont ensuite été supprimés.

Application à la Martinique

La carte d'application potentielle du propiconazole pour la Martinique est présentée sur la Figure 9.

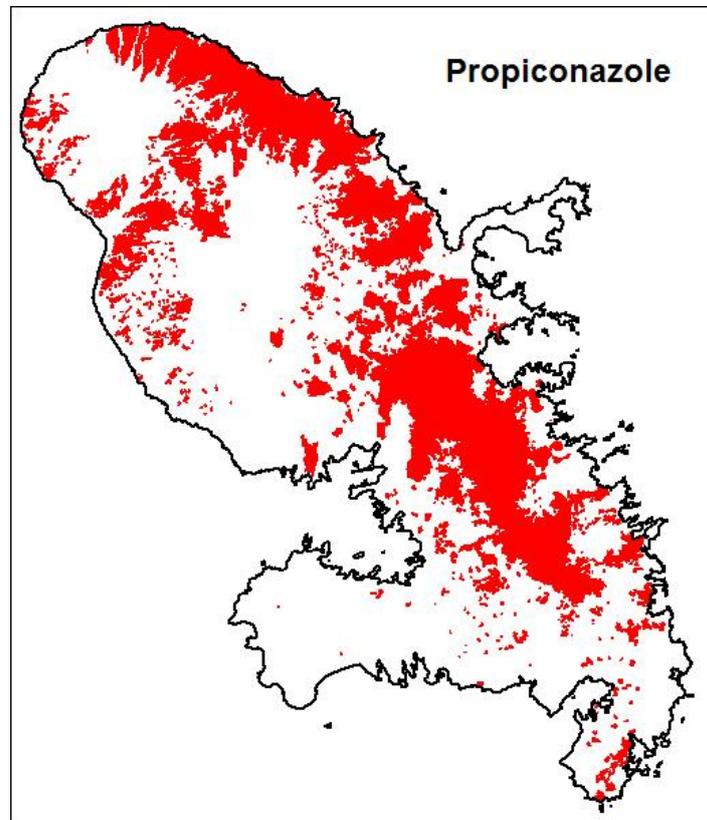


Figure 9 Carte d'application potentielle du propiconazole (source : RP-61976-FR)

3.4 ETABLISSEMENT DE CARTES DE RISQUE

Il est possible d'utiliser des indicateurs ou des modèles pour identifier la mobilité des produits phytosanitaires. L'utilisation de modèles est complexe car elle demande un travail plus important de recherche pour identifier les valeurs de certains paramètres. L'étape de calage peut aussi être fastidieuse. De plus, l'utilisation de modèles peut s'avérer longue dans le cas d'un bassin où le nombre de combinaisons "sol x climat x culture x produit" est important (Elsass, et al., 2009). Ainsi, l'utilisation des modèles n'a pas été retenue pour le calcul de la vulnérabilité spécifique proposée dans ce document car ils ont été jugés trop complexes à mettre en œuvre dans le cadre d'études opérationnelles (Boesten, 2000, Dubus, et al., 2003).

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation d'indicateurs et le croisement d'indicateurs a été privilégié. La préconisation d'indicateurs pour calcul de la pression en produits phytosanitaire a déjà été mis en évidence dans d'autres études comparatives avec les modèles (Surdyk et al., 2012).

L'utilisation d'un indicateur très simple (Indicateur GUS, Gustafson, 1989) et d'un indicateur plus complexe (AFT ; Baran, et al., 2013, Rao, et al., 1985) est proposée. L'utilisation de l'un ou de l'autre de ces indicateurs dépend du nombre de données disponibles ou de la possibilité de l'acquisition de données. Par exemple, l'indicateur GUS étant beaucoup plus simple, il nécessite très peu de données. Une proposition de calcul de vulnérabilité

spécifique pour les produits phytosanitaires utilisant des croisements de cartes à l'aide d'outil SIG (Système d'Information Géographique) est faite.

Des cartes de risque sont établies pour les molécules sélectionnées sur la base de fonctions de transfert et de calculs du risque associé. Quatre méthodes différentes sont proposées, l'une est à sélectionner en fonction des données disponibles : GUS, AFT, GUS + vulnérabilité, AFT+ vulnérabilité (Figure 10).

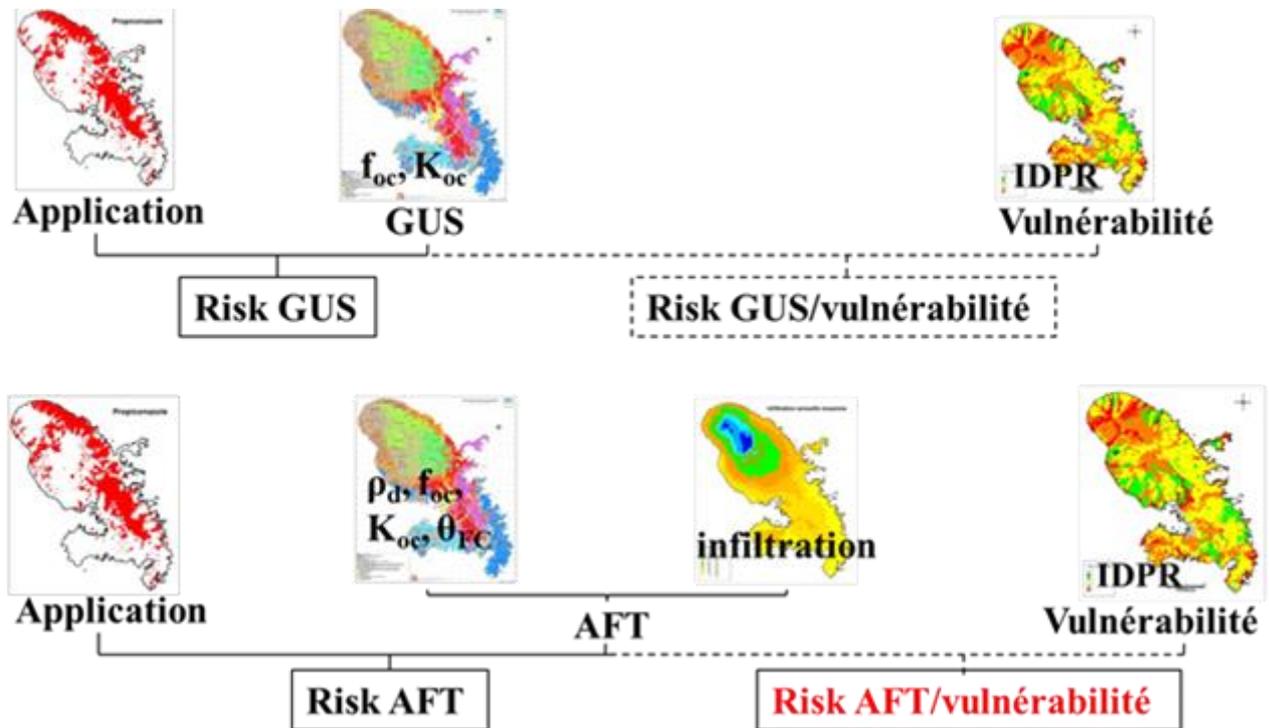


Figure 10 Schéma de synthèse d'établissement de cartes de contamination par les différentes méthodes présentées

3.4.1 Méthode basée sur Indicateur GUS spatialisé

Principe de la méthode

L'indicateur GUS

L'indicateur GUS (pour Groundwater Ubiquity Score) est un indicateur qui permet de définir une classe de mobilité pour une substance (Gustafson, 1989). Il ne prend en compte que la mobilité vers les eaux souterraines, il ne tient compte d'aucun autre processus tel que la mobilité vers les eaux de surface (c'est-à-dire qu'il ne prend pas en compte le ruissèlement) ou la toxicité. Cet indice est probablement l'indicateur le plus simple dans ce domaine. Il est alors très largement utilisé même s'il ne prend pas en compte les usages (les quantités appliquées) ni les caractéristiques du milieu. Il permet de comparer de façon simple la mobilité des molécules. Il présente surtout l'avantage de ne nécessiter que de très peu de données. Il ne prend en compte que deux paramètres pour estimer la mobilité vers les eaux souterraines.

Enfin, même si les effets de toxicité ne sont pas pris en compte dans cet indicateur, les normes en vigueur (notamment pour l'alimentation en eau potable) sont les mêmes quelques soient les molécules (à très peu d'exception près).

L'indicateur est basé sur une seule équation qui lie le potentiel de dégradation et le potentiel de sorption d'une substance pour estimer son potentiel de mobilité.

L'équation est la suivante :

$$GUS = \log(DT50) \times (4 - \log(K_{oc}))$$

Avec GUS : Groundwater Ubiquity Score

DT₅₀ : temps de demi-vie (j)

K_{oc} : coefficient d'adsorption (L/kg)

L'avantage est qu'il est donc possible de disposer d'une base de données avec la valeur du GUS pour l'ensemble des substances actives utilisées. Cet indicateur a d'ailleurs souvent été repris comme donnée d'entrée dans d'autres méthodes.

L'indice repose sur l'hypothèse que plus un produit est facilement adsorbé par les particules de sol et moins il est persistant, moins le risque est grand de le voir être entraîné en profondeur. Des valeurs seuils (1,8 et 2,8) permettent de définir trois classes de risque :

- si GUS > 2,8 les substances actives sont considérées comme lessivables (ou "très mobile") ;
- si GUS < 1,8 les substances actives sont considérées comme non lessivables (ou « immobile ») ;
- dans l'intervalle [1,8-2,8] il est difficile de conclure sur la capacité de la substance active à être lessivée (la substance est "moyennement mobile").

La classe intermédiaire de cet indicateur est parfois difficilement interprétable. Si un produit est classé comme "immobile" ou "très mobile", des décisions peuvent être prises. Si le produit est dans la classe "moyennement mobile", les décisions à prendre sont plus difficiles.

L'indicateur GUS est un indice empirique issu d'observations de concentrations dans les eaux souterraines reliées à des propriétés des substances. Les paramètres utilisés pour établir l'indicateur sont basés sur un consensus scientifique mais la façon d'agrèger les paramètres reste empirique de même que la valeur des bornes des classes.

Acquisition des données d'entrée

L'indicateur GUS est considéré comme simple car il n'a besoin que de deux données d'entrée : le temps de demi-vie de la substance et le coefficient de partage carbone organique / eau de la substance.

Lorsqu'aucune mesure de dégradation et de sorption n'est disponible sur les sites pour les molécules considérées, les temps de demi-vie peuvent être extraits de la base de données en ligne (PPDB, 2015). Les changements de propriétés supposées pouvant être induites par l'utilisation de surfactants dans les formulations commerciales n'ont pas été pris en compte. Il n'existe encore aucune donnée pouvant être simulée sur leurs effets.

Pour prendre en compte la particularité des sols des DOM des fonctions de pédotransferts ont été développées. Par exemple, une fonction existe pour modifier la valeur du K_{oc}/K_d des produits phytosanitaires ioniques en fonction du pH et de la teneur hydroxyde de fer (Surdyk, et al., 2008).

Mais dans l'absolu, le K_{oc} et la DT50 sont dépendant de la zone d'étude. Par exemple, la dégradation est dépendante des microorganismes, ceux-ci peuvent être plus ou moins adaptés à la dégradation d'un produit particulier dans certaines zones. Certaines communautés peuvent même se spécialiser dans la dégradation de certains produits phytosanitaires. Ainsi les valeurs des bases de données, même si elles proviennent de dossiers d'homologation européens, ne sont pas à considérer comme des valeurs absolues. Les valeurs disponibles peuvent donc être très éloignées de celles réellement observées sur le site. L'idéal donc est de disposer de données sur site, pour certains sols ou certaines substances. Cela est particulièrement vrai pour les DOM car les dossiers d'homologation rendent peu compte des particularités pédoclimatiques rencontrées.

Pour réaliser les mesures sur les terrains, des prises d'échantillons de sols sont nécessaires. Il faut ensuite les envoyer au laboratoire pour faire soit des analyses de K_{oc} ou de DT50. Il est donc possible de travailler avec les sols du site mais avec des molécules marquées pour ce types d'analyses. Les méthodes d'analyses sont généralement normées au niveau internationale (OCDE 106, 2000 ; Focus, 2006), mais il existe plusieurs méthodes et des variations peuvent apparaître avec les laboratoires.

Méthode de spatialisation

La méthode de spatialisation de l'indice de GUS est issue du rapport BRGM/RP-61976-FR. A partir des données pédologiques (K_{oc} et DT₅₀), l'indice de GUS a été attribué à chaque type de sol de la carte pédologique.

Sur la base de cette distribution, 5 classes de valeurs ont été distinguées à partir de la détermination des quintiles (portion de la distribution contenant un cinquième du total de l'échantillon). Une note, de 1 à 5, a été associée à chacune des classes dans le but de caractériser la capacité de la substance à être lessivée et de pouvoir comparer les molécules entre elles (plus la substance est lessivable, plus la note est forte ; Tableau 12).

Cette répartition par quintile engendre un découpage des classes de GUS un peu différente de celle de l'indicateur d'origine. En effet, si la limite à 1,8 est conservée en revanche une limite est posée à 2,6 (et non pas 2,8). Selon la définition du GUS, les classes 1 et 2 seraient regroupées, de la même façon que les classes 4 et 5.

Tableau 12 - Classes de valeur retenues pour l'indice de GUS et note associée (source : RP-61976-FR)

Classes de valeurs	Note_GUS
$GUS \leq 1,2$	1
$1,2 < GUS \leq 1,8$	2
$1,8 < GUS \leq 2,6$	3
$2,6 < GUS \leq 3,3$	4
$GUS > 3,3$	5

La note de risque attribuée à l'indicateur GUS est définie comme suit :

$$RISK = Note_GUS \times Application\ potentielle$$

Avec Note_GUS : Classe de valeur de l'indice GUS du produit étudié

Application potentielle : Application potentielle de produit étudié comme défini précédemment

RISK : Note de risque de contamination des eaux souterraines par le produit étudié

Application à la Martinique

Les indicateurs GUS ont été calculés pour les produits phytosanitaires sélectionnés en Martinique (voir § 3.2.4) à partir de valeurs bibliographique de DT50 et de Koc. Les résultats sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13 - Classement par GUS croissant d'une sélection de molécules à partir de la BNVD et de la qualité des eaux souterraines sur la Martinique

Martinique				
sélection molécules	solub (mg.L-1)	DT50 (jours)	Koc (mL.g-1)	GUS biblio
diquat	718000,0	3184,2	2184750,0	-6,9
mancozebe	11,0	60,0	997,5	-1,0
Dieldrine	0,1	2000,0	12000,0	-0,3
glyphosate	10500,0	31,5	21699,4	-0,3
difenoconazole	15,0	85,0	3760,0	0,9
glufosinate ammonium	500000,0	23,0	755,0	1,1
Chlordécone	3,0	300,0	2500,0	1,6
2,4-d	23180,0	9,9	56,0	1,7
asulame	962000,0	9,0	20,0	1,7
Diuron	36,5	78,0	920,0	1,8
Propiconazole	150,0	108,4	1086,0	1,9
s-metolachlore	480,0	21,0	226,0	1,9
Métalaxyl	7100,0	38,7	500,0	2,8
Bromacil	815,0	174,5	138,0	3,4
fosthiazate	9000,0	13,0	59,0	3,8
Monuron	230,0	170,0	150,0	4,1
Hexazinone	33000,0	105,0	54,0	4,4

en jaune : sélection selon la BNVD

en bleu : sélection selon la fréquence de dépassement

en orange : molécules en commun

Dans le cadre de cette étude méthodologique d'établissement d'une méthode d'analyse des pressions impact dues aux pollutions diffuses agricoles phytosanitaires, seules quelques molécules ont été retenues pour l'établissement des cartes de risque de contamination. Elles ont été reprises de l'étude réalisée par Baran et al. (2013). Les molécules étudiées sont : le glyphosate, le 2,4-D, le S-métolachlore, l'asulame, le propiconazole, le diuron, la chlordécone et l'oxamyl. Les formules structurales et les voies de dégradation pressenties pour certaines de ces molécules sont présentées en annexe 6. Le comportement des autres molécules listées peut être rapproché de ceux étudiés en fonction de leurs caractéristiques et des différentes classes de GUS.

Sur le département de la Martinique, des données expérimentales ont pu être acquises dans le cadre des travaux menés par Baran et al. (2008 et 2013). Les expérimentations menées en laboratoire dans le cadre de ces études ont été réalisées dans des conditions pédo-climatiques spécifiques de la Martinique et donc *a priori*, plus pertinentes que les données disponibles dans la littérature. Les méthodes d'acquisition de ces données, de mesure et de détermination des paramètres et leurs limites d'application sont détaillés dans les rapports BRGM/RP-56658-FR et BRGM/RP-61976-FR.

C'est à partir de ces données expérimentales que les différentes cartes de contamination ont été construites. A titre illustratif, le Tableau 14 présente les données expérimentales et les

résultats de l'indicateur GUS pour le propiconazole sur différents sites de prélèvements de sol.

Tableau 14 - Valeurs expérimentales de Koc, DT50 pour les sols prélevés et valeur de l'indicateur Gus pour le propiconazole (source : Baran et al, 2013)

Sols	Koc	DT50	GUS
Sainte-Anne (0-30cm)	2276	44,8	1,06
Le Carbet (0-30cm)	1503	72,8	1,53
Morne Rouge (0-30 cm)	1014	35,4	1,54
Sainte-Marie (0-30cm)	1068	39,6	1,55
Ajoupa Bouillon (0-30cm)	1085	52,9	1,66
Le Lamentin (0-30cm)	790	44,4	1,82
Saint-Joseph (0-30 cm)	506	53,5	2,24
Gros Morne (0-30cm)	475	68,9	2,43

La carte pédologique de la Martinique réalisée par l'IRD (*Figure 11*) permet de distinguer les grands types de sols rencontrés. Pour la Martinique, les grands types de sol sont : les ferrisols (paléosol fersiallitique), les sols à allophanes (sols sur cendres et ponces), les sols à alluvions, les sols bruns rouille à halloysite (sols bruns rouille), les sols fersiallitiques, les sols peu évolués sur cendres ; Les vertisols (sols à argiles gonflantes). La diversité des sols qui doivent donc présenter des caractéristiques très variées en termes de teneurs en matière organique, argile et oxydes-hydroxydes, sont autant de facteurs qui peuvent influencer la sorption des pesticides (Tableau 15). En fonction des molécules qui seront retenues, il conviendra de choisir exclusivement des sols compatibles avec la culture susceptible de recevoir la molécule phytosanitaire.

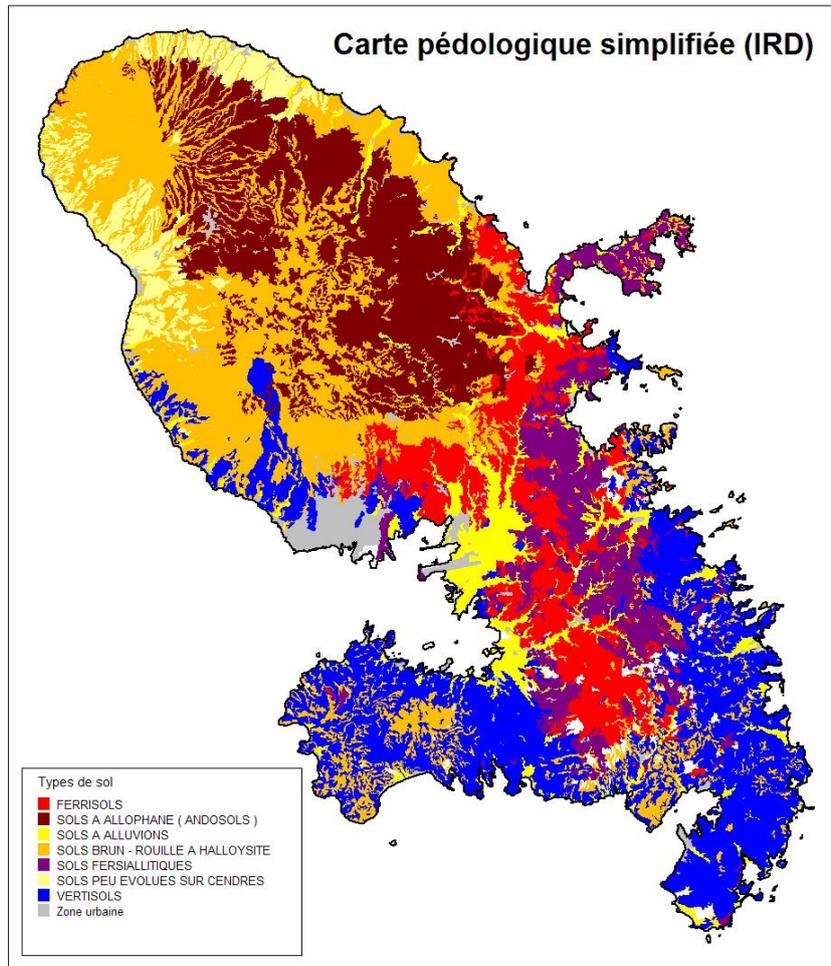


Figure 11 Carte pédologique simplifiée de la Martinique (IRD-CIRAD) (source : RP-61976-FR)

Tableau 15 - Notes GUS attribuées au propiconazole selon les différentes classes de sol étudiées

	Molécule	Koc	DT50	GUS	Note GUS
Andosol	Propiconazole	858	52,4	1,9	3
Ferrisol	Propiconazole	929	42,0	1,7	2
Nitisol	Propiconazole	506	53,5	2,2	3
Sol peu évolué sur cendres	Propiconazole	1503	72,8	1,5	2
Vertisol	Propiconazole	2276	44,8	1,1	1

La carte de contamination par le propiconazole avec la méthode GUS est présentée sur la Figure 12.

Risque de contamination des eaux souterraines par le PROPICONAZOLE
Méthode : GUS

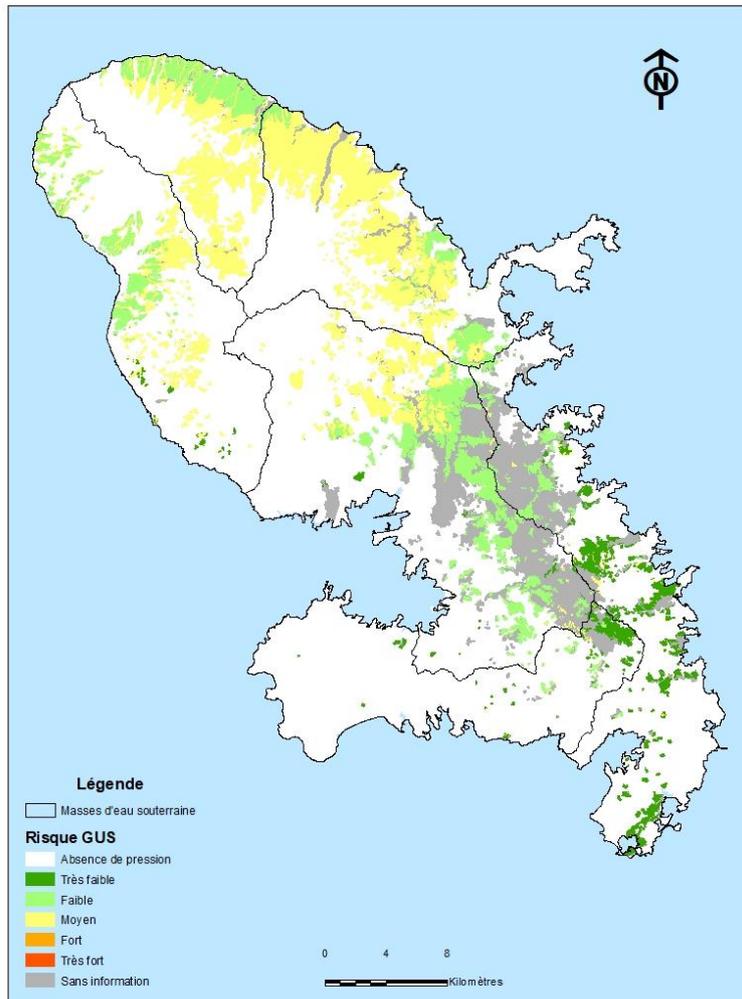


Figure 12 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode GUS.

3.4.2 Croisement GUS et vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines

Principe de la méthode

Un autre indicateur de risque de contamination est proposé à partir du GUS et de la vulnérabilité intrinsèque. Les études sur la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines dans les DOM sont disponibles dans le rapport Bessière et al., 2015. L'analyse de la vulnérabilité intrinsèque des premiers aquifères rencontrés est généralement menée sur la combinaison de trois critères : l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR), le type de nappe et l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

La vulnérabilité doit être notée de 1 à 5 (Note_Vulnérabilité = 1 à 5, la valeur 0 étant attribuée aux secteurs sans information).

La note de risque est obtenue en croisant la note GUS attribuée à la molécule et la note vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines selon la formule suivante :

$$\text{RISK} = \text{Note_GUS} \times \text{Note_Vulnérabilité} \times \text{Application potentielle}$$

Avec Note_GUS : Classe de valeur de l'indice GUS du produit étudié
 Application potentielle : Application potentielle de produit étudié comme défini
 Note_Vulnérabilité : Note de vulnérabilité comme défini
 RISK : Note de risque de contamination des eaux souterraine par le produit étudié

Application à la Martinique

Dans le cadre du SIESMAR, une carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines a été élaborée (Allier et al., 2008) (Figure 13). Les informations sur la zone non saturée ne sont disponibles que sur certains secteurs (plaine du Lamentin, Schoelcher Case Navire et Fond Lahaye, Saint-Pierre Pécoul, etc.). La méthode de l'IDPR, détaillée dans le rapport BRGM/RP-56283-FR, est apparue tout à fait adaptée à la réalisation de cartes de vulnérabilité intrinsèque en milieu volcanique.

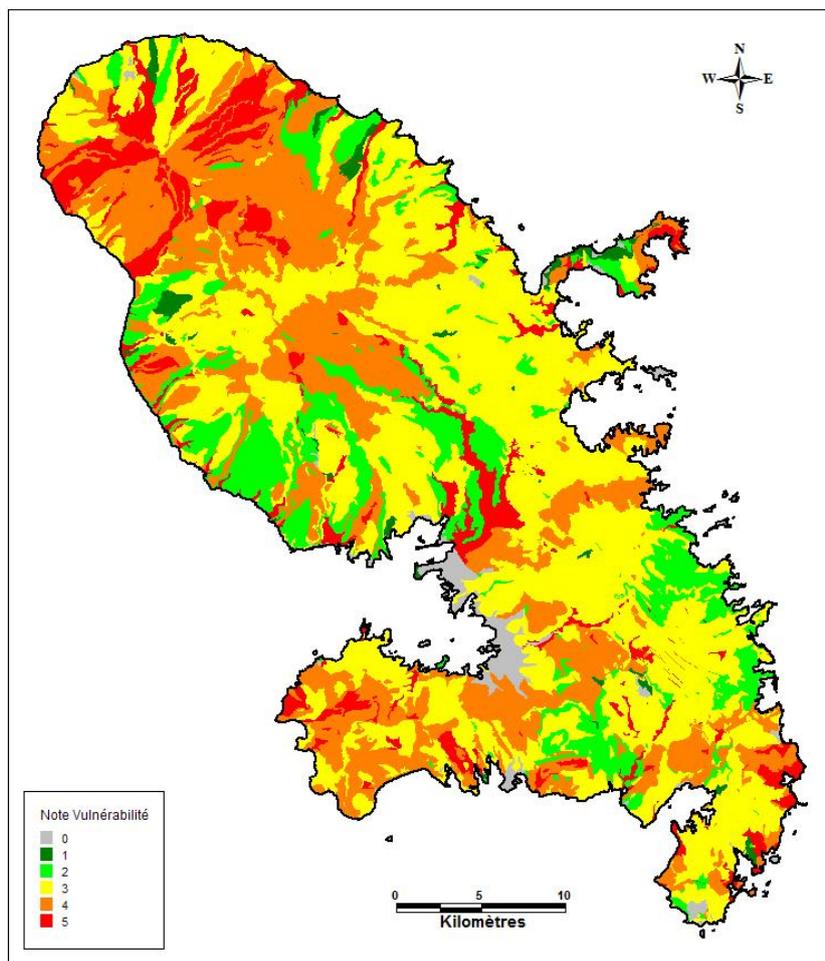


Figure 13 Carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Allier et al., 2008)

A titre d'illustration, la carte de contamination par le propiconazole avec la méthode GUS + vulnérabilité est présentée sur la Figure 14.

Risque de contamination des eaux souterraines par le PROPICONAZOLE
Méthode : GUS / Vulnérabilité

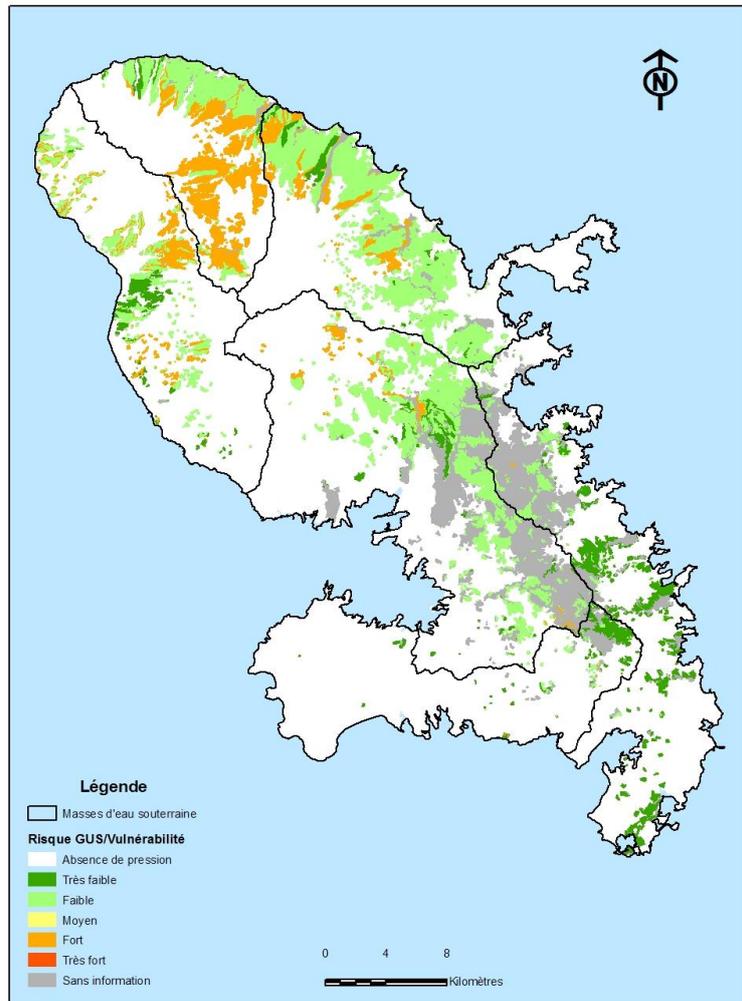


Figure 14 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode GUS + vulnérabilité.

3.4.3 Méthode basée sur le calcul d'un AFT spatialisé

Principe de la méthode

Indicateur AFT

Cette méthode permet de croiser un nombre important de paramètres dont un certain nombre sont géoréférencés. Le géoréférencement de certains des paramètres permet de différencier des zones de pression dans l'usage des produits phytosanitaires étudiés.

La méthode proposée ici a déjà été déployée par le BRGM en Martinique en 2013, ce rapport ne reprendra pas toutes les étapes du déploiement de la méthode avec détail. Le lecteur peut consulter le rapport initial (Baran, et al., 2013) s'il a besoin de plus d'informations.

Afin de prendre en compte le temps de transfert de la substance dans le sol, Rao et al., (1985) ont défini un indice dit facteur d'atténuation (AF - sans unité), qui outre les paramètres

de sorption et de dégradation, prend en compte l'épaisseur de sol considéré et les flux d'eau :

$$AF = \exp[-(0.693d \theta_{FC}RF) / (qDT_{50})]$$

Avec d = profondeur de référence (cm)
 θ_{FC} = teneur en eau volumique à la capacité au champ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
 RF : facteur de retard (sans unité)
 DT_{50} = temps de demi-vie (j)
 q = flux d'eau (mm/j)

Le facteur de retard (sans unité) traduit l'influence de l'adsorption sur le temps de transfert de la molécule. Cet indice s'applique aux molécules non volatiles ; il est décrit par l'équation suivante :

$$RF = 1 + (\rho_d f_{oc} K_{oc}) / (\theta_{FC})$$

Avec θ_{FC} = teneur en eau volumique à la capacité au champ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
 K_{oc} = constante de sorption ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ équivalent à L kg^{-1})
 f_{oc} = teneur en carbone organique (%)
 ρ_d = densité apparente du sol (g cm^{-3})

La facteur d'atténuation AF permet de décrire la diminution (c'est-à-dire l'atténuation) de la quantité de pesticides au cours de son transfert. Plus la valeur de cet indice (comprise entre 0 et 1) est grande, plus le potentiel de transfert est important. La comparaison des facteurs d'atténuation de plusieurs molécules pour un sol donné ou d'une molécule pour plusieurs sols, permet de comparer le risque de lessivage.

Enfin, en raison des très faibles valeurs d'AF, comme suggéré par Li et al. (1988), l'index AFT est utilisé :

$$AFT = \text{Ln}(AF) / (-0.693).$$

Données d'entrée

Données pédologiques

Le déploiement de la méthode basée sur l'AFT est plus complexe que celle basée sur l'indicateur GUS car elle demande des données concernant des paramètres de sol qui sont parfois difficiles à obtenir. Les paragraphes suivants présentent quelques fonctions de pédotransfert permettant de calculer ces paramètres de sol à l'aide de données plus facilement accessibles. Certaines fonctions de pédotransfert courantes sont présentées dans le rapport de Surdyk et al., 2012.

Lame d'eau infiltrée

Comme présenté précédemment, le calcul de l'index AFT nécessite de quantifier le flux d'eau. Généralement, dans la littérature, ce flux d'eau est directement déduit de la pluviométrie. Comme l'objectif poursuivi est de caractériser le risque de contamination des eaux souterraines, il a été décidé de travailler à partir de la lame d'eau infiltrée vers les nappes lorsque cette donnée est disponible.

Méthode de spatialisation

Les données expérimentales (ρ_d , f_{oc} , K_{oc} , θ_{FC} et DT_{50}) sont associées à chaque grand type de sol. Il est ainsi possible de calculer un facteur de retard RF.

Une couche d'information « Sol » est générée par molécule avec les données expérimentales suivantes : teneur en eau volumique à la capacité au champ (θ_{FC}), DT_{50} , RF et indice de GUS.

Le croisement des cartes du facteur RF et de l'infiltration moyenne permet d'obtenir une représentation spatialisée de l'index AFT.

Cinq classes de valeurs ont été définies à partir du calcul des quintiles. Elles sont déterminées dans le Tableau 16.

Tableau 16 - Classes de valeur retenues pour l'index AFT et note associée

Classes de valeurs	Note AFT
AFT > 150	1
60 < AFT ≤ 150	2
30 < AFT ≤ 60	3
12 < AFT ≤ 30	4
AFT < 12	5

La note de risque est attribuée à l'indicateur AFT est établie selon la formule suivante :

$$\text{RISK} = \text{Note_AFT} \times \text{Application_potentielle}$$

Avec Note_AFT : Note de l'AFT du produit étudié

Application potentielle : Application potentielle de produit étudié comme défini au §

RISK : Note de risque de contamination des eaux souterraine par le produit étudié

Application à la Martinique

Données pédologiques

Le Tableau 17 présente les données expérimentales qui ont été affectées aux grands types de sol décrits par la carte pédologique simplifiée (Figure 11). Lorsque plusieurs échantillons ont été étudiés pour un même type de sol (cas de l'andosol et du ferrisol), les valeurs moyennes ont été retenues. Cela est évidemment critiquable puisque si la teneur en carbone organique peut être tributaire du type de sol, elle est également fortement dépendante des pratiques agricoles.

Les résultats expérimentaux obtenus sur le premier horizon de sol (0 – 30 cm) ont été utilisés. Il est rappelé que les sols alluvionnaires et les sols fersialitiques n'ont pas été échantillonnés dans le cadre de l'étude.

Tableau 17 - Caractérisation physico-chimiques des sols étudiés (source : BRGM/RP-61976-FR)

sols	argile (%)	limons (%)	sables (%)	pH eau	pH KCl	CaCO ₃ (%)	matière organique (%)	carbone organique (%)	CEC (meq/100g)
Vertisol (Vpm) / 0-30 cm	42.8	29.4	25.5	6.8	5.3	<0.1	2.3	1.32	30.6
Vertisol (Vpm) / 30-60 cm	42.7	28.3	28	7	5.6	<0.1	1	0.56	32.9
Andosol (J) / 0-30 cm	14.4	27.4	57.1	6.6	5.5	<0.1	1.2	0.67	16.2
Andosol (J) / 30-60 cm	13.4	29.3	56.6	6.8	5.5	<0.1	0.8	0.49	15.8
Andosol (Pa) / 0-30 cm	3.7	32.7	58.8	6.5	5.7	<0.1	4.7	2.74	13.3
Andosol (Pa) / 30-60 cm	2.4	30.8	64.2	6.9	6.3	<0.1	2.6	1.52	9.5
<i>Andosol / 0-30 cm</i>	4.1	32	58.6	6.3	5.5	0.1	5.2	3.02	17.4
<i>Andosol / 30-60 cm</i>	4.8	28.2	62.2	6.4	5.6	0.1	4.8	2.76	15.6
Andosol (Pa, Pb) / 0-30 cm	5.4	31.4	58	5.6	4.9	<0.1	5.3	3.06	19
Andosol (Pa, Pb) / 30-60 cm	4.4	32	59.9	5.8	5.3	<0.1	3.6	2.12	15
Andosol (T) / 0-30 cm	8.6	57.5	29.9	5.7	5.2	<0.1	4.1	2.37	32.8
Andosol (T) / 30-60 cm	16.3	52.6	27.8	5.5	5.1	<0.1	3	1.77	33.8
Ferrisol montm./ 0-30 cm	60.9	28.6	8.5	6	5.4	<0.1	2	1.15	19.5
Ferrisol montm. / 30-60 cm	62.5	29.4	7.3	5.9	5.6	<0.1	0.8	0.45	19.8
Ferrisol (Gd) / 0-30 cm	39.3	33.3	25.3	5.9	4.7	<0.1	2.1	1.23	35.8
Ferrisol (Gd) / 30-60 cm	37.7	33.4	27.6	6.1	4.8	<0.1	1.3	0.76	34.2
Nitisol (Ha-Hb)	58.3	25.3	14.3	5.6	4.8	<0.1	2.2	1.27	22.6
Nitisol (Ha-Hb)	59	26.1	13.3	5.6	4.8	<0.1	1.7	0.98	22.2
<i>Nitisol / 0-30 cm</i>	53.9	32.4	10.8	6.3	5.3	0.1	2.9	1.7	20.6
<i>Nitisol / 30-60 cm</i>	51	32.1	15.5	6.3	5.3	0.1	1.4	0.84	21.9

Lame d'eau infiltrée

Les résultats issus du modèle hydrologique global développé par le BRGM dans le cadre du Système d'Information sur les Eaux Souterraines de MARTinique (SIEMAR) ont été exploités (Vittecoq et al., 2007). Ce dernier fournit l'infiltration moyenne annuelle à la maille du km². Par soucis de cohérence entre les échelles des différentes cartes utilisées, les données ont été spatialisées et réparties selon 9 classes de valeurs (en mm/an) : 50-150 / 100-200 / 200-300 / 300-500 / 500-750 / 750-1000 / 1000-1500 / 1500-2000 et 2000-3000. Pour chacun des polygones correspondants, la valeur moyenne journalière a finalement été calculée (Figure 15)

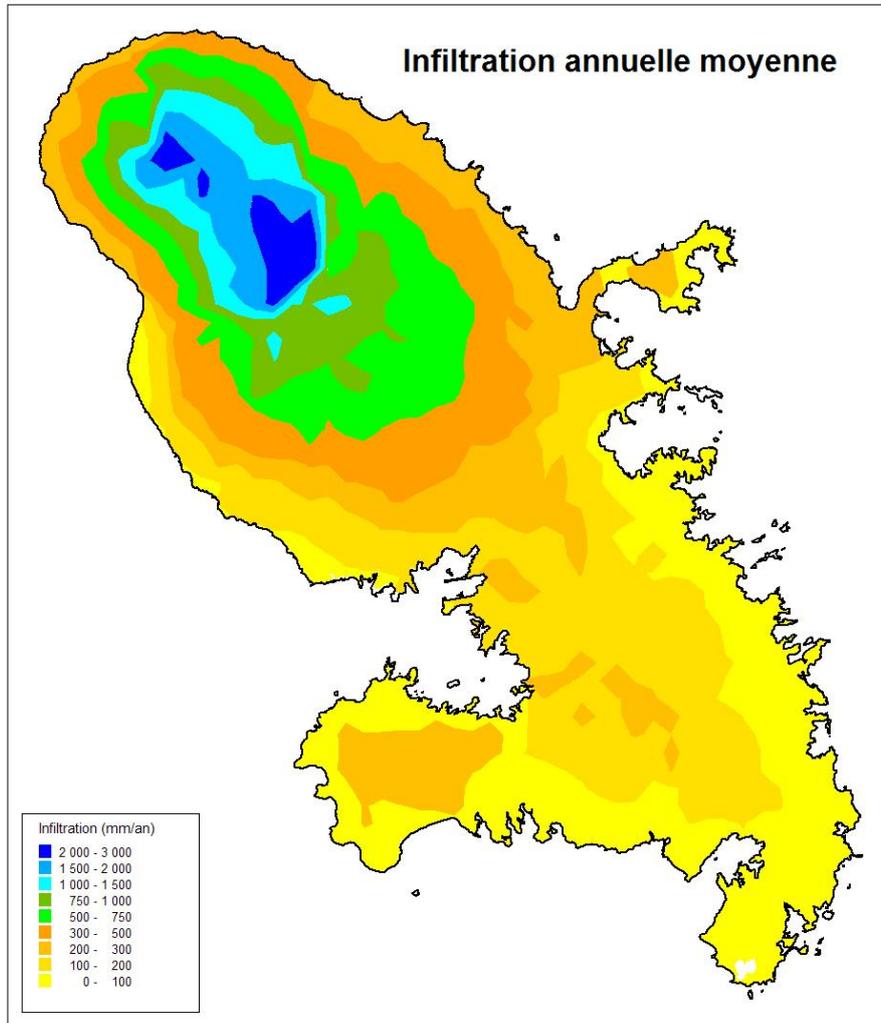


Figure 15 Carte d'infiltration annuelle moyenne de la Martinique (source : BRGM/RP-61976)

Calcul de l'AFT

Une fois les données expérimentales (ρ_d , f_{oc} , K_{oc} , θ_{FC} et DT_{50}) réunies, il est ainsi possible de calculer un facteur de retard RF. Faute de données expérimentales, le risque de contamination des eaux souterraines n'a pas été évalué pour les sols alluvionnaires et les sols fersialitiques. A titre d'illustration, un exemple de calcul est proposé pour le propiconazole pour la Martinique (Tableau 18) et la carte associée est représentée sur la Figure 16.

Tableau 18 - Résultats du RF obtenus pour le propiconazole en fonction des différents types de sols étudiés en Martinique

type sol	carbone organique (%)	CEC (meq/100g)	Koc Propiconazole	densité (g/cm3)	capacité au champ (g/100g)	capacité au champ (cm3/cm3)	RF Propiconazole
Ferrisol compact (Gd)	1,23	35,8	1068,0	1,2	0,44	36,7	1,43
Ferrisol à montmorillonite (Kb transition Gc)	1,15	19,5	790,0	1,2	0,43	35,8	1,30
Vertisol (Vpm)	1,32	30,6	2276,0	1,2	0,33	27,5	2,31
Andosol sur cendres et ponces (J)	0,67	16,2	1503,0	0,85	0,15	17,6	1,49
Andosol sur cendres et ponces (Pa)	2,74	13,3	1085,0	0,85	0,55	64,7	1,39
Andosol peu évolué sur cendres et ponces (Pa, Pb)	3,06	19	1014,0	0,85	0,58	68,2	1,39
Andosol (T)	2,37	32,8	475,0	0,85	0,80	94,1	1,10
Nitisol (Ha-Hb)	1,27	22,6	506,0	1,2	0,42	35,0	1,22

RF Propiconazole

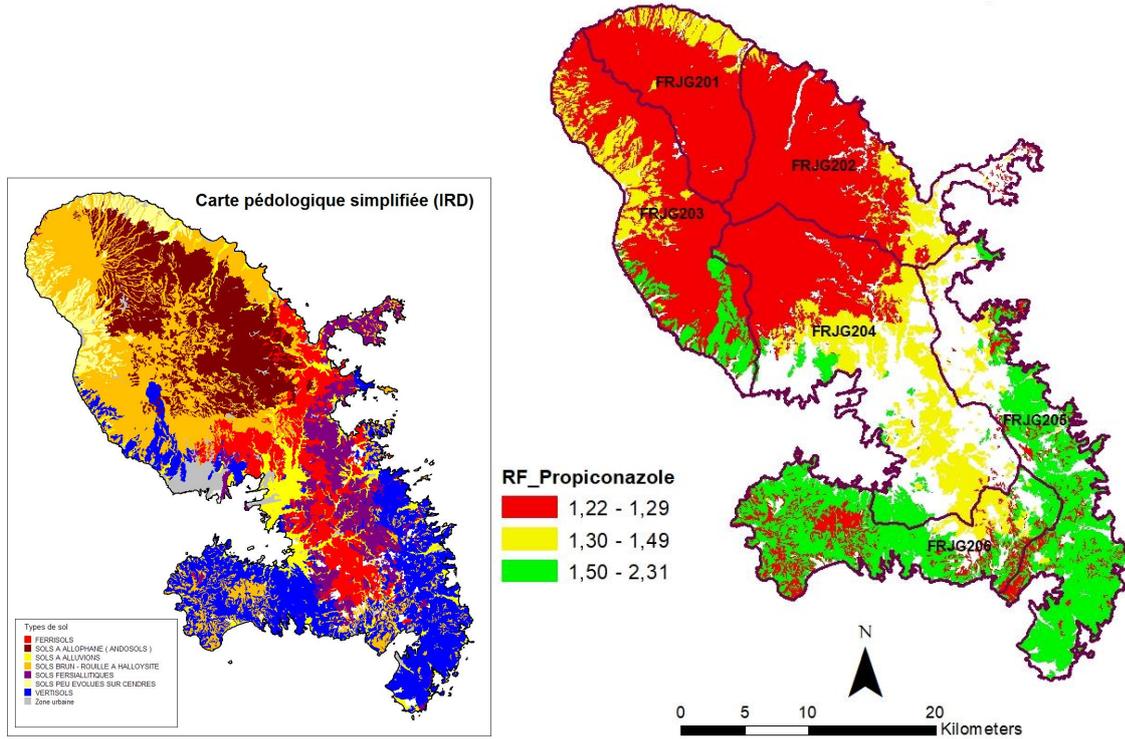


Figure 16 Carte du RF calculé pour le propiconazole sur la Martinique à partir de la carte pédologique simplifiée de l'IRD

Les résultats du calcul de l'AFT pour le propiconazole sur la Martinique avec des flux respectivement de 0,2 mm/j et de 6,85 mm/j sont montrés à titre d'exemple dans le Tableau 19.

Tableau 19 - Calcul de l'AFT pour le propiconazole avec des flux de 0,2 mm/j et de 6,85 mm/j.

	Molécule	DT50	densité (g/cm ³)	capacité au champ (g/100g)	capacité au champ (cm ³ /cm ³)	RF	d(cm)	AF (6.85)	AFT (6.85)	AF (0.2)	AFT (0.2)	Note AFT 0.2	Note AFT 6.85	
	Andosol	Propiconazole	52,41	0,85	0,64	75,69	1,29	30,00	3,46E-03	7,52	5,14E-85	280,06	1	5
	Ferrisol	Propiconazole	42,00	1,20	0,44	36,25	1,37	30,00	2,78E-02	5,09	5,40E-54	176,99	1	5
	Nitisol	Propiconazole	53,50	1,20	0,42	35,00	1,22	30,00	8,87E-02	3,50	9,09E-37	119,75	2	5
	Sol peu évolué sur cendres	Propiconazole	72,80	0,85	0,15	17,65	1,49	30,00	3,35E-01	1,58	5,61E-17	54,00	3	5
	Vertisol	Propiconazole	44,80	1,20	0,33	27,50	2,31	30,00	1,35E-02	6,21	9,10E-65	212,79	1	5

La note de risque est attribuée à l'indicateur AFT est établie selon la formule suivante :

$$\text{RISK} = \text{Note_AFT} \times \text{Application_potentielle}$$

Un exemple de carte de contamination par le propiconazole avec la méthode AFT est présenté sur la Figure 17.

Le risque GUS se rapproche du risque AFT associé à une faible infiltration pour le propiconazole. Ainsi, les différences cartographiques sont particulièrement marquées dans les zones à forte infiltration (moitié Nord de l'île) ou encore pour les vertisols (Note_GUS = 1) avec un potentiel de transfert AFT plus important.

Risque de contamination des eaux souterraines par le PROPICONAZOLE
Méthode : AFT

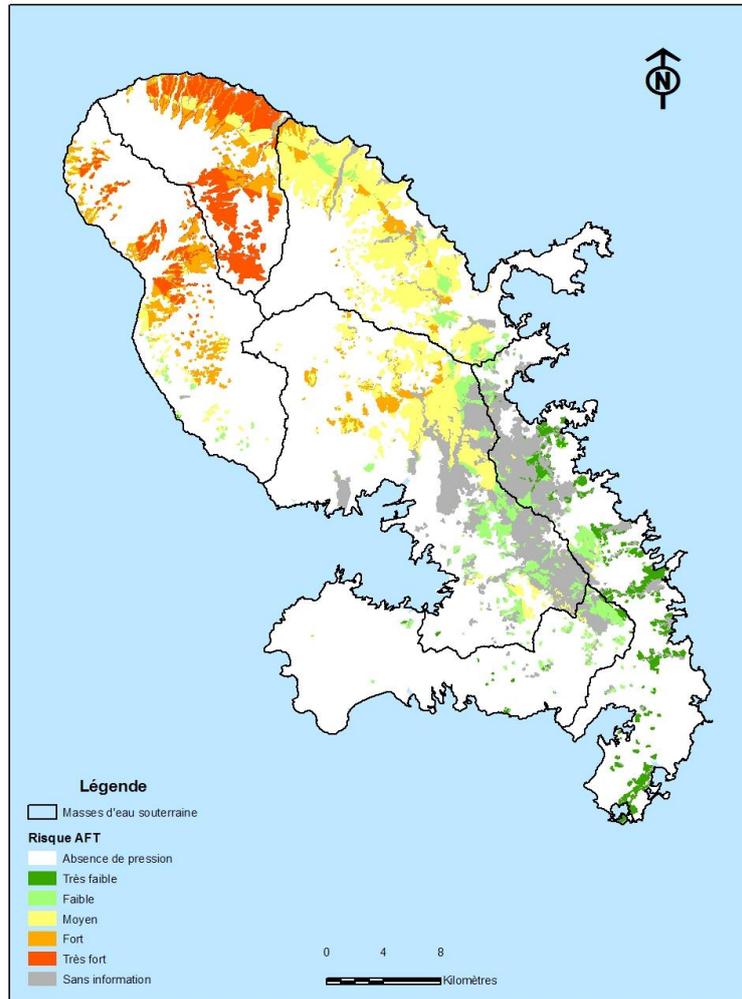


Figure 17 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode AFT (source : BRGM/RP-61976)

3.4.4 Croisement AFT et vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines

Principe général

Le principe de l'indicateur repose sur le croisement de l'index AFT spatialisé et de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines. La lame d'eau infiltrée (recharge des

nappes) participant au calcul de l'AFT permet d'appréhender en partie la vulnérabilité des aquifères. Cependant, au-delà de l'infiltration approchée par l'IDPR, la carte de vulnérabilité intègre également l'épaisseur de la zone non saturée (dans les secteurs où l'information est connue). En outre, les échelles cartographiques des deux données (infiltration et vulnérabilité) sont différentes.

La note de risque est obtenue en croisant la note AFT attribuée à la molécule et la note vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines selon la formule suivante :

$$\text{RISK} = \text{Note_AFT} \times \text{Note_Vulnérabilité} \times \text{Application potentielle}$$

La note de risque de 5 ne pourra être obtenue que dans les cas où se superposent une note AFT égale à 5 et une note de vulnérabilité égale à 5. Ainsi, les différences entre les 2 approches cartographiques sont d'autant plus marquées pour les molécules à fort potentiel de transfert.

La prise en compte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines dans le calcul du risque de contamination entraîne globalement un abaissement de la note de risque. Plus le potentiel de transfert est fort, plus la probabilité d'abaissement de la note est élevée.

Application à la Martinique

A titre d'illustration, la carte de contamination par le propiconazole avec la méthode AFT + vulnérabilité est présentée sur la Figure 18.

Pour le propiconazole, le risque "AFT" est supérieur au risque « AFT/vulnérabilité » pour les masses d'eau Nord, Nord Atlantique, Nord Caraïbe et Centre et similaire pour les masses d'eau Sud Atlantique et Sud Caraïbe.

Risque de contamination des eaux souterraines par le PROPICONAZOLE
Méthode : AFT / Vulnérabilité

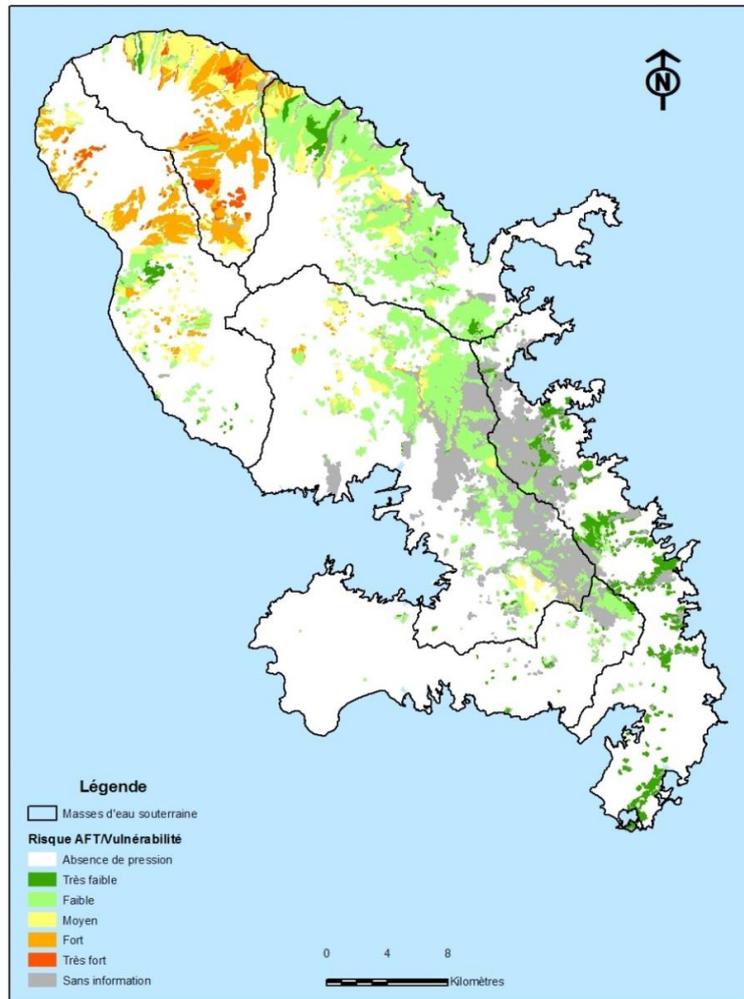


Figure 18 Carte de risque de contamination des eaux souterraines par le propiconazole avec la méthode AFT + vulnérabilité (source : BRGM/RP-61976-FR)

3.5 COMPARAISON DES METHODES GUS ET AFT SPATIALISES

3.5.1 Comparaison des notes de risque

Le Tableau 20 présente une synthèse des notes (de 1 à 5) calculées pour l'indice de GUS ainsi que pour l'index AFT dans les deux conditions d'infiltration extrêmes (0,2 mm/j et 6,85 mm/j). Pour une analyse complète, le lecteur peut se référer au rapport BRGM/RP-61976-FR. Une synthèse est proposée ci-après.

L'indice de GUS propose une évaluation du risque de contamination des eaux souterraines plus lissée, avec une plus faible variabilité du niveau de risque en fonction du type de sol. Cela est particulièrement marqué pour les molécules fortement adsorbable (glyphosate et chlordécone) ou, au contraire, fortement lessivable (oxamyl). Pour ces 3 molécules, le niveau de risque (note attribuée) reste quasiment toujours identique quel que soit le type de sol (par exemple note 1 pour le glyphosate quel que soit le sol).

À l'inverse, l'index AFT présente pour chaque molécule une évaluation du risque beaucoup plus contrastée. Cela s'explique par la prise en compte de la lame d'eau infiltrée dans le

calcul de l'AFT. Il s'avère que la valeur de l'index l'AFT est avant tout contrôlée par les conditions d'infiltration. En effet, dans la très grande majorité des cas, le risque évolue d'une contamination très faible à faible pour l'infiltration minimale (0,2 mm/j) à fort à très fort pour l'infiltration maximale (6,85 mm/j). Pour le glyphosate et la chlordécone, la variabilité du risque en fonction des conditions d'infiltration est moins marquée, avec : un risque très faible à moyen pour le glyphosate en raison d'une forte adsorption (valeurs de K_{oc} très élevées) et un risque moyen à très fort pour la chlordécone en raison d'une forte persistance de la molécule (DT_{50} élevé).

En revanche, pour un même sol, les risques associés à chaque molécule apparaissent plus contrastés avec l'indice de GUS. Même si les molécules aux coefficients d'adsorption extrêmes ne sont pas considérées, le ferrisol est, par exemple, concerné par des molécules à risque de lessivage faible (propiconazole) et des molécules à risque fort (2,4-D et S-métolachlore). Avec l'AFT, comme évoqué précédemment, le risque est finalement contrôlé en premier lieu par les conditions climatiques pour ces molécules aux valeurs de K_{oc} et DT_{50} plutôt modérées.

Aucune des 2 méthodes n'apparaît adaptée pour cartographier le risque de contamination des eaux souterraines par le glyphosate. En effet, avec une constante d'adsorption, K_{oc} , très élevée et une DT_{50} relativement faible, le risque calculé est faible à très faible dans les 2 cas.

En ce qui concerne la chlordécone et l'oxamyl, le facteur AFT s'avère beaucoup plus approprié que l'indice de GUS, ce dernier suggère, en effet, un potentiel de lessivage faible à très faible pour la chlordécone et moyen à fort pour l'oxamyl. Pour de telles gammes de valeurs du K_{oc} , le poids accordé à la DT_{50} dans le calcul de l'indice de GUS ne permet pas de pondérer le potentiel de lessivage, au contraire du facteur AFT.

Tableau 20 - Synthèse des notes GUS et AFT calculées pour chaque couple molécule-sol (source BRGM/RP-61976-FR)

Molécules	Type de sol	Note GUS	Note AFT q=0.2 mm/j	Note AFT q=6.85mm/j
2,4-D	Nitisol	2	1	4
	Andosol	3	1	4
	Sol peu évolué sur cendres	3	1	5
	Vertisol	3	1	5
	Ferrisol	4	2	5
Chlordécone	Ferrisol	1	3	5
	Vertisol	1	3	5
	Sol peu évolué sur cendres	1	4	5
	Andosol	2	2	5
	Nitisol	2	3	5
Diuron	Vertisol	2	1	5
	Sol peu évolué sur cendres	2	2	5
	Andosol	3	1	5
	Ferrisol	3	1	5
	Nitisol	4	3	5
Glyphosate	Ferrisol	1	1	2
	Andosol	1	1	3
	Nitisol	1	1	3
	Sol peu évolué sur cendres	1	1	3
	Vertisol	1	1	3
Oxamyl	Sol peu évolué sur cendres	3	1	2
	Andosol	5	1	3
	Ferrisol	5	1	5
	Nitisol	5	1	5
	Vertisol	5	1	5
Propiconazole	Vertisol	1	1	5
	Ferrisol	2	1	5
	Sol peu évolué sur cendres	2	3	5
	Andosol	3	1	5
	Nitisol	3	2	5
S-métolachlore	Vertisol	3	2	5
	Ferrisol	4	2	5
	Sol peu évolué sur cendres	4	3	5
	Andosol	5	1	5
	Nitisol	5	2	5

3.5.2 Confrontation des cartes de risque avec la qualité des eaux souterraines

Pour chaque molécule, les résultats seront discutés et confrontés à la qualité des eaux souterraines. Un exemple de cartographie comparative est proposé pour le propiconazole sur la Figure 19.

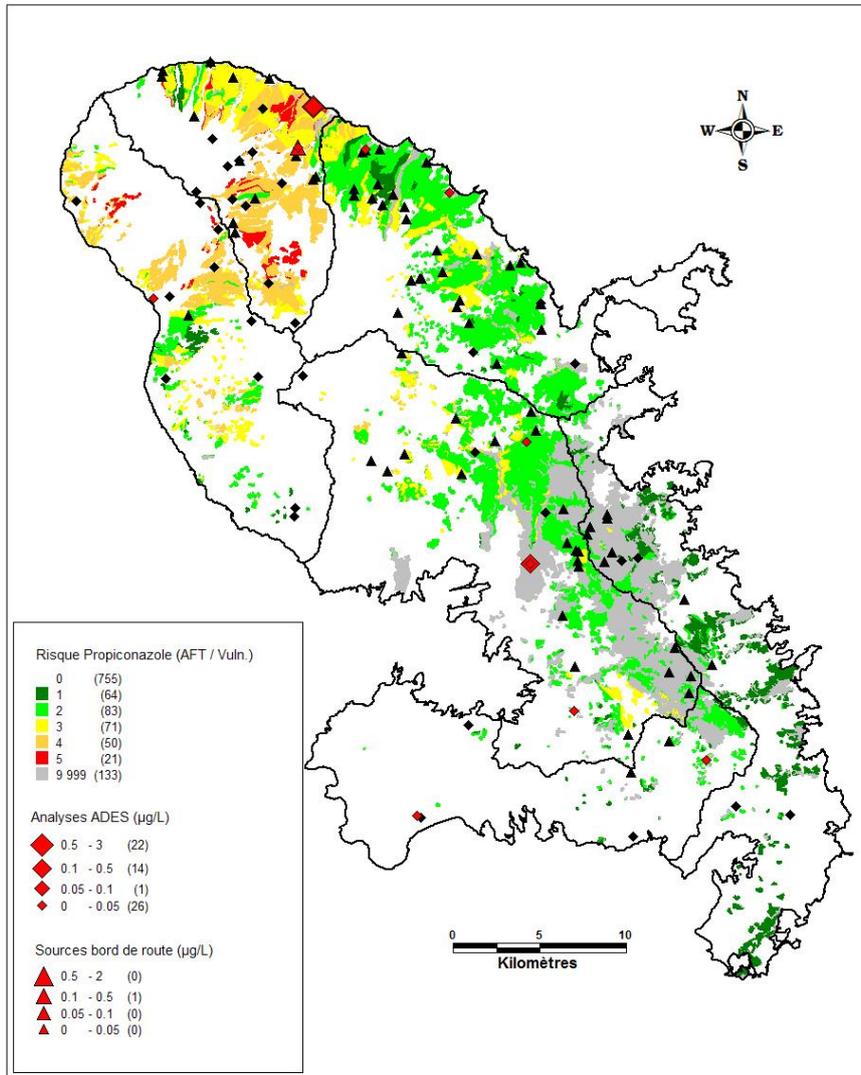


Figure 19 Confrontation du risque de contamination par le propiconazole avec la méthode AFT/vulnérabilité avec la qualité des eaux souterraines

Dans le cas du propiconazole, le faible nombre de quantifications constaté ne permet pas de vraiment confronter les résultats cartographiques à partir de l'état de contamination des eaux souterraines. En outre, le forage du Lamentin – Habitation Ressource avec une des plus fortes concentrations ($0,45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) fait partie des rares points de prélèvement montrant des détections, mais il est implanté au droit de sols alluvionnaires non traités par la présente étude. La carte de risque issue de la méthode "AFT / Vulnérabilité" permet tout de même de mettre en exergue un risque de contamination plus important pour la masse d'eau Nord où les plus fortes concentrations (hors Lamentin) sont mesurées.

Dans le cas de l'oxamyl, le potentiel de transfert AFT semble plus approprié pour appréhender le risque de contamination des eaux souterraines.

Pour la chlordécone, l'approche AFT est beaucoup plus satisfaisante puisque le risque de transfert est moyen à fort pour les plus faibles lames d'eau infiltrées. Toutefois, le risque peut

paraître sous-estimé du fait des circulations rapides associées à du transfert colloïdal depuis la surface jusqu'aux nappes.

Pour le diuron, les fortes concentrations mesurées sur la masse d'eau Nord sont en accord avec la carte de risque de contamination des eaux souterraines établie par la méthode "AFT / Vulnérabilité" qui fait bien ressortir le risque fort sur cette zone.

Pour le glyphosate, aucune des méthodes cartographiques testées ne semblent représenter de façon satisfaisante le risque de contamination des eaux souterraines par le glyphosate. En effet, les indices de GUS et AFT suggèrent l'absence de risques de lessivage. Or, le glyphosate et son produit de dégradation, l'AMPA, sont ponctuellement retrouvés dans les eaux souterraines à des concentrations significatives. Il est possible que la contamination ponctuellement observée soit la conséquence d'un transfert du glyphosate vers les eaux souterraines sous forme particulaire (adsorbé à des particules). Comme pour la chlordécone, des circulations rapides depuis la surface jusqu'aux nappes pourraient aussi conduire à ce même résultat, la sorption et la dégradation étant alors limitées puisqu'il ne s'agit pas de processus instantanés.

3.5.3 Conclusions

Les cartes proposées permettent de décrire les grandes tendances du risque de contamination des eaux souterraines à l'échelle de la Martinique. Exception faite du glyphosate, ces tendances sont, dans la plupart des cas, validées par les résultats d'analyses disponibles en Martinique.

Les résultats par la méthode "AFT" apparaissent fortement contrôlés par la carte de l'infiltration moyenne issue, après regroupement en 9 classes de valeur, d'un modèle hydrologique global (Vittecoq et al., 2007).

Par conséquent, l'apport de la carte de vulnérabilité apparaît pertinent avec une représentation du risque plus contrastée et surtout plus réaliste dans le nord de l'île. En effet, il apparaît, après confrontation des résultats à la qualité des eaux souterraines, que la méthode "AFT" surestime le risque de contamination dans le nord de l'île pour les molécules aux potentiels de transfert les plus importants (2,4-D, diuron, propiconazole et S-métolachlore).

En outre, la prise en compte de la carte de vulnérabilité permet d'intégrer à l'évaluation du risque l'épaisseur de la zone non saturée (dans les quelques secteurs où elle est connue) et indirectement la nature des formations géologiques constitutives. Il est, en effet, rappelé que l'indice IDPR permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations du sous-sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie.

En définitive, après analyse des résultats cartographiques, la méthode consistant à croiser la carte de l'AFT et la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines aboutit aux cartes de risque les plus pertinentes. Excepté pour le glyphosate, les résultats sont, en effet, satisfaisants pour toutes les molécules. Cette méthode est alors à préconiser si les données sont disponibles.

Limites de la méthode

Données d'entrées

- Le jeu de valeurs unique pour le K_{oc} et la DT_{50} a été attribué à chaque grand type de sol (valeurs moyennes). Or, les résultats obtenus pour les sols étudiés par

l'intermédiaire de plusieurs parcelles (andosols et ferrisols) montrent que les variations peuvent être significatives. Ces différences sont particulièrement marquées pour l'andosol ;

- L'étude de dégradation sur les matériaux de la zone non saturée est soumise à une certaine incertitude (possible contamination bactériologique lors du broyage des matériaux), cette dernière n'a pas été considérée dans l'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines ;
- Des voies d'infiltration et de circulation rapides des eaux à travers les sols et la zone non saturée ne sont pas considérées.
- Les sols alluvionnaires n'ont pas été traités par la présente étude.

Cartes et SIG

La qualité des cartes initiales est primordiale pour que les cartes de résultats soient de bonne qualité. Cela est d'autant plus vrai que certains facteurs ont une influence croisée. Les incertitudes qu'engendrent normalement l'utilisation des SIG sont très importantes dans ce type d'outils puisqu'ils sont exclusivement basés sur des cartes et des outils cartographiques.

Les erreurs liées aux SIG sont dues à la nature même des données. Les données sont présentées sous forme de polygones aux limites strictes ce qui dans le cas des sols et des sous-sols est irréaliste. Les variations des couches et des horizons se font graduellement. L'utilisation SIG engendre donc des erreurs à toutes les frontières des polygones. De plus, chaque polygone ne peut représenter qu'une valeur. Cette valeur est généralement une moyenne de toutes les valeurs mesurées sur la zone. La variabilité naturelle a été gommée et les valeurs atypiques écartées. Ceci peut engendrer des erreurs dans le sens où les valeurs atypiques peuvent avoir une très grande influence sur les transferts même si elle ne représente qu'une surface très petite. A l'échelle temporelle d'une exploitation agricole, les bases de données telles que le Corine Land Cover peuvent devenir rapidement obsolètes. Des parcelles de vignes peuvent devenir des champs, des bois peuvent être coupés tandis que des champs peuvent devenir des lotissements. Une vigilance doit être portée à la représentativité des bases de données d'occupation du sol.

3.6 CALCUL D'UN INDICE DE RISQUE DE TRANSFERT GLOBAL A L'ECHELLE DE LA MASSE D'EAU

3.6.1 Indice de risque de transfert par masse d'eau pour les molécules d'intérêt

Cas général

Sous ArcGis©, les notes de risque (0 à 5) ont été agrégées par masse d'eau souterraine dans le but de calculer un indice global de risque par molécule. Le principe repose sur le calcul du barycentre selon les superficies en jeu ; cela permet de ne pas prendre en compte les zones de lacune dans le calcul.

Le risque de contamination des eaux souterraines pour chacune des molécules peut ainsi être comparé à l'échelle de la masse d'eau. Seuls les résultats des cartes "AFT / Vulnérabilité" ont été exploités.

Application à la Martinique

Le calcul d'un indice de risque de transfert global à l'échelle de la masse a été réalisé pour la Martinique. La Figure 20 propose une représentation graphique de ces indices de risque par masses d'eau.

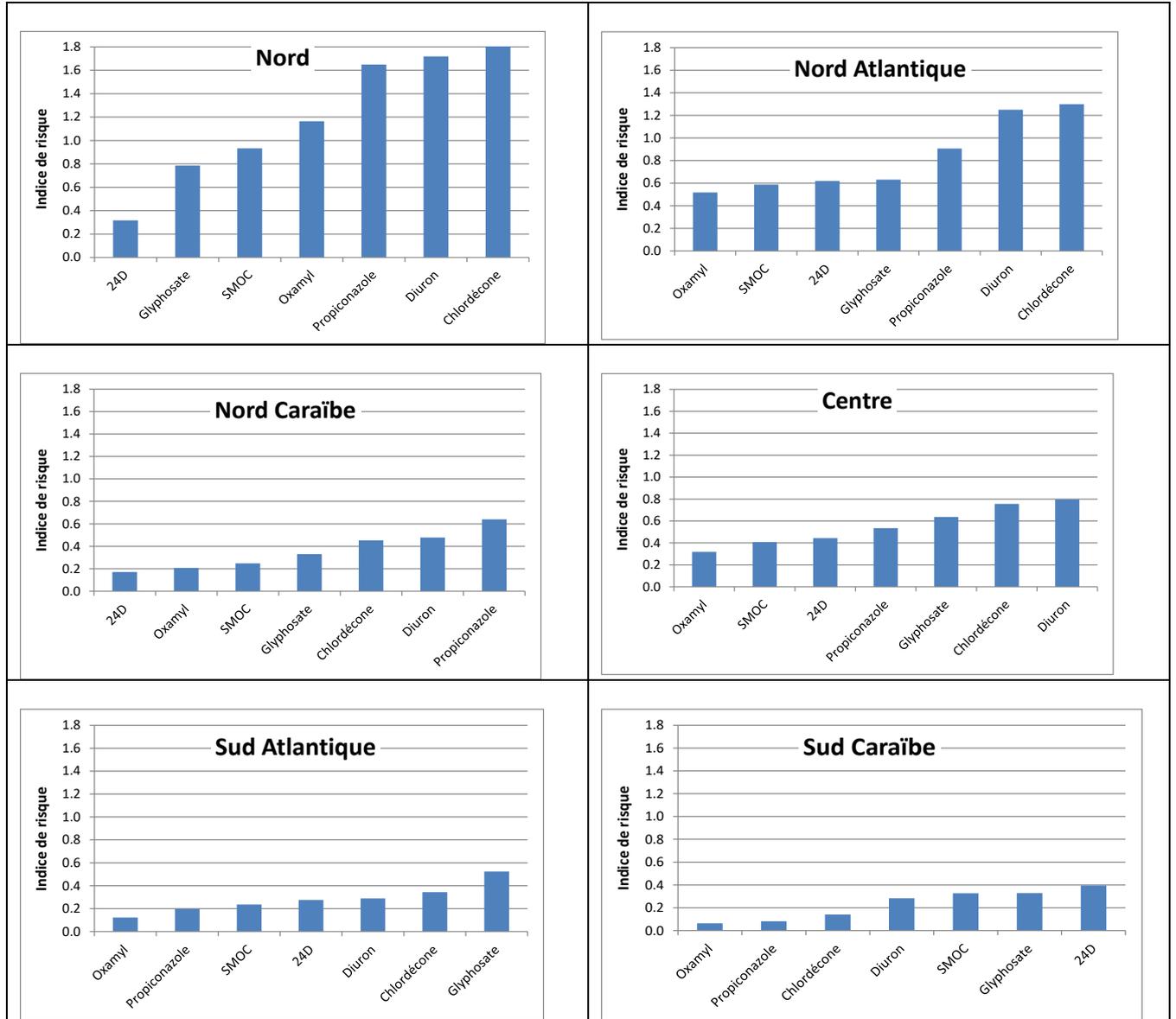


Figure 20 Représentation graphique des indices de risque calculés par molécule pour chaque MESO

Grâce aux différentes valeurs des indices de risque par molécule pour chaque MESO, une note de risque de transfert global peut être attribuée par MESO. Le résultat de l'affectation des notes pour le transfert est synthétisé dans le Tableau 21.

Tableau 21 - Résultats du calcul de l'indice de risque de transfert global par MESO

CdEuMasseD	NomMasseDE	Transfert
FRJG201	Nord	fort
FRJG202	Nord Atlantique	moyen
FRJG203	Nord Caraïbe	faible
FRJG204	Centre	moyen
FRJG205	Sud Atlantique	faible
FRJG206	Sud Caraïbe	faible

3.6.2 Limite de la méthode

Les lacunes d'information les plus importantes concernent les masses d'eau Centre et Sud Atlantique en raison d'une plus forte représentativité des sols alluvionnaires et des sols fersiallitiques sur ces MESO.

3.7 SYNTHÈSE DES DONNÉES ET MÉTHODES DU TRANSFERT DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES

Les différentes étapes de la méthode décrite ci-avant sont :

- Assollement et usages des produits phytosanitaires
- Spatialisation des paramètres en fonction de la carte pédologique (nature et propriétés des sols)
- Détermination des fonctions de transferts des molécules d'intérêt
- Etablissement de cartes de contamination
- Comparaison avec la qualité des eaux souterraines

Données utilisées	Type	Source
Historique de la sole agricole	Couche cartographique	CNASEA
Caractéristiques physico-chimiques des sols % carbone/ teneur en eau volumique à la capacité au champ	Données expérimentales /bibliographiques	
Carte pédologique	Couche cartographique	Données géo référencées INRA-Données IRD
KOC / DT50	Données expérimentales /bibliographiques Tableau	Bibliographie Base de données SIRIS2012-v5.3.1
Propriétés physique et chimique de substances	agritox	http://www.agritox.anses.fr/
Caractéristique des phytosanitaires		http://e-phy.agriculture.gouv.fr/
Pluviométrie annuelle	Carte des isohyètes	Météo France
IDPR	Couche cartographique	BRGM

4 Détermination de la pression significative

4.1 CROISEMENT PRESSION BRUTE / TRANSFERT GLOBAL

4.1.1 Méthodologie globale

La détermination des pressions significatives est réalisée selon le principe de croisement des deux sources d'information : pressions brutes en pesticides (§ 2.3.2) et risque de transfert à l'échelle de la MESO (§ 3.6.1).

Une grille peut être proposée pour permettre de croiser ces deux informations (Tableau 22) et obtenir la pression significative en phytosanitaires sur les eaux souterraines.

Tableau 22 - Tableau de passage de la pression brute à la pression significative

		Indicateur Pression brute		
		Faible	Moyen	Fort
Risque de transfert	Faible	Faible	Faible	Moyen
	Moyen	Faible	Moyen	Fort
	Fort	Faible	Fort	Fort

Application à la Martinique

A partir des différents résultats obtenus sur le département de la Martinique, la pression significative par MESO est synthétisée dans le Tableau 23.

Tableau 23 - Pressions significatives obtenues par MESO en Martinique

CdEuMasseD	NomMasseDE	Pression brute	Transfert	Pression significative
FRJG201	Nord	fort	fort	fort
FRJG202	Nord Atlantique	fort	moyen	fort
FRJG203	Nord Caraïbe	moyen	faible	faible
FRJG204	Centre	moyen	moyen	moyen
FRJG205	Sud Atlantique	moyen	faible	faible
FRJG206	Sud Caraïbe	faible	faible	faible

4.1.2 Cartes résultantes

Les résultats peuvent être présentés sous forme de cartes afin d'obtenir une représentation spatiale des pressions significatives.

La comparaison des cartes de pressions agricoles globales en pesticides et de pressions significatives à l'échelle des MESO permettent de mettre en évidence les effets du transfert des molécules notamment sur les MESO FRJG203 et FRJG205 pour lesquelles les pressions brutes sont atténuées (Figure 21).

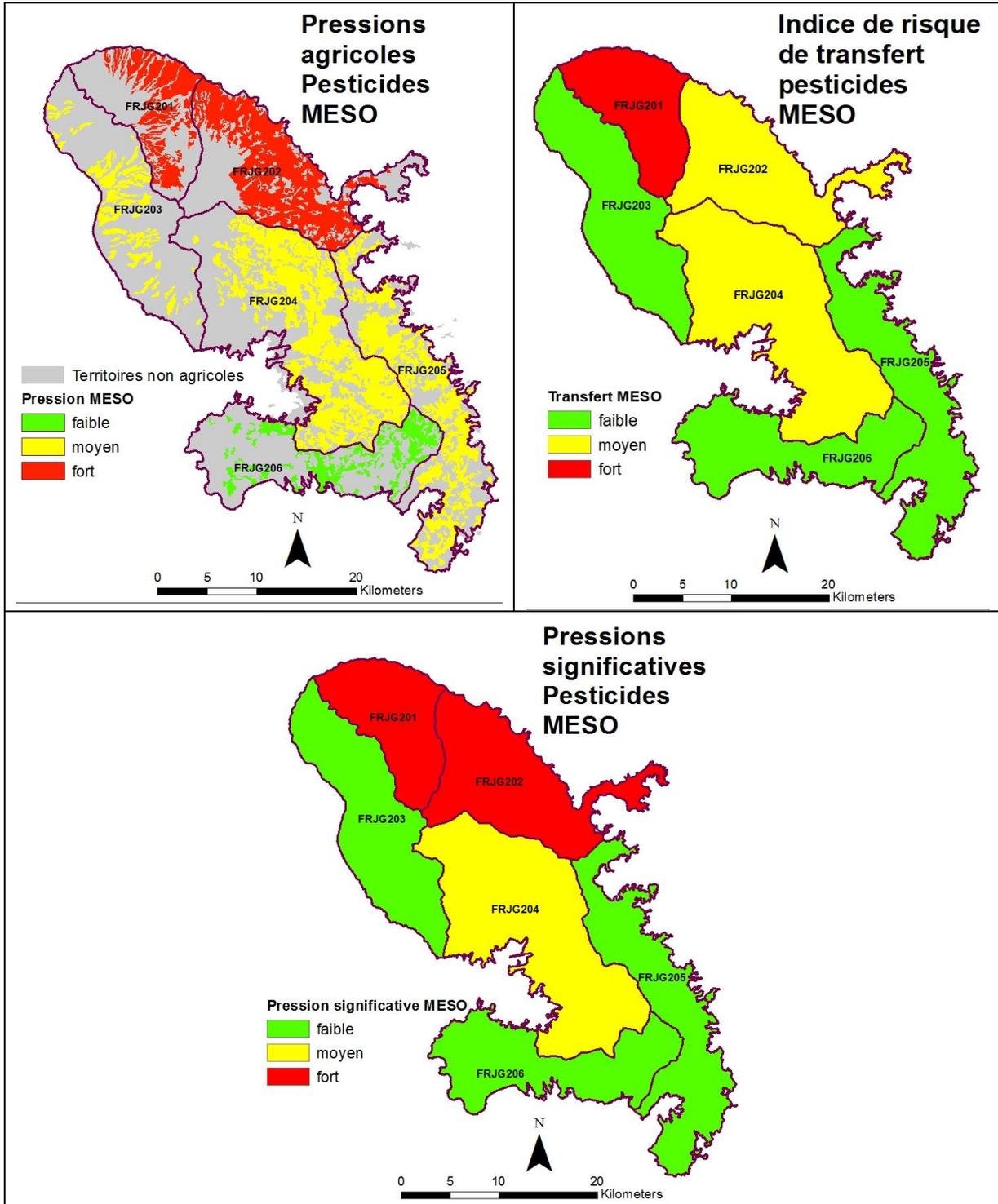


Figure 21 Comparaison des cartes de pressions agricoles (pressions brutes), indice de risque de transfert et pressions significatives pesticides à l'échelle des MESO pour la Martinique

4.2 VALIDATION / ANALYSE PRESSION IMPACT

La validation des pressions significatives en phytosanitaires s'appuie sur deux types d'information : la connaissance des molécules historiques et leur persistance et les analyses des concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines.

4.2.1 Persistance des molécules historiques

Cas général

Il est fondamental de prendre en considération le problème de la persistance des molécules historiques et de l'existence d'un stock de ces substances dans le sol et/ou la zone non saturée qui pourrait donc être remobilisé sous certaines conditions.

Les améliorations de pratiques agricoles ne se traduisent donc que de façon différée sur la qualité de l'eau. Les conditions de remobilisation de ces stocks et/ou simplement de transfert continu au sein de la zone non saturée restent complexes et sont à étudier spécifiquement.

Application à la Martinique

Les informations mentionnées sont ci-dessous citées dans Brugneaux et al. (2004). Les molécules utilisées en Martinique dans les années 60 étaient essentiellement des organochlorés et notamment, le gamme-HCH (lindane), l'aldrine et la dieldrine. A la fin des années 60, elles auraient été remplacées progressivement par le chlordécone, un autre organochloré jugé plus efficace. Dès 1971, les organochlorés font l'objet de restrictions d'usage car ils sont suspectés d'avoir des impacts négatifs sur les sols et les milieux aquatiques. La chlordécone sera interdite en Martinique en 1993. Dans les années 80-90, les organophosphorés et les carbamates sont introduits et remplacent progressivement les organochlorés. Les premiers organophosphorés (malathion, méthyl parathion, disulfoton et diazinon) sont alors largement utilisés en Martinique mais ensuite remplacés par d'autres organophosphorés, moins toxiques (terbuphos, cadusaphos, izaphos, phénamiphos). En 1998, les organophosphorés représentaient près de 90% des produits importés.

Des données CIRAD publiées dans Balland et al. (1998) et mentionnées dans Brugneaux et al. (2004) permettent de souligner l'importance des traitements effectués sur la banane en 1996. En effet, les quantités appliquées sur banane sont de 1231 tonnes (dont 948 tonnes d'insecticides et nématicides) alors qu'elles représentent 171 tonnes pour l'ensemble ananas, canne à sucre, cultures maraîchères et fruitières.

4.2.2 Temps de transfert et âge de l'eau

Cas général

L'un des principaux facteurs pouvant expliquer une différence entre les pressions significatives estimées et les impacts observés est le temps de transfert des molécules entre la surface et la nappe. Ce même temps de transfert doit être pris en compte pour nuancer les relations entre pressions significatives et impacts.

Le temps de transfert de molécules phytosanitaires est différent de celui de la molécule d'eau (au moins supérieur ou égal) mais les données et informations sur le temps de transfert et âge de l'eau sont intéressantes à exploiter dans l'étape de validation des résultats.

En l'absence de grands aquifères sédimentaires dans les DOM, les masses d'eau de niveau 1 soumis aux pressions comportent rarement des eaux de quelques dizaines d'années. Les méthodes pour estimer l'âge de l'eau sont indiquées à l'Annexe 8.

Application à la Martinique

Dans le cadre d'études menées sur la qualité des eaux en Martinique et particulièrement sur la contamination des eaux souterraines par des produits phytosanitaires (notamment chlordécone) et par le nitrate, plusieurs estimations de l'âge des eaux ont été réalisées sur différents bassins versants à partir des méthodes présentées en annexe 8. Les modèles pistons, exponentielles ou mélanges binaires donnent des estimations d'âges différents en fonction des sites de prélèvements (voir les tableaux en annexe 9).

L'étude menée par Vittecoq et al. en 2007 portant sur la datation des eaux souterraines de Martinique a permis d'établir une méthodologie de datation des eaux souterraines dans les DOM en contexte volcanique tropicale afin de réaliser un suivi efficace de leur contamination par les nitrates et les produits phytosanitaires (Gourcy et al. 2008). Une campagne a été réalisée en avril 2007, l'incertitude sur les âges mesurés est d'environ 3 ans. Ces âges classés en groupe sont présentés sous la forme d'une carte (Figure 22) rendant compte de la distribution spatiale de l'âge des eaux. On remarque que la majorité des eaux jeunes se trouvent dans le nord de l'île alors que les eaux anciennes se distribuent dans la partie Nord-Atlantique, au Centre et au Sud de la Martinique.

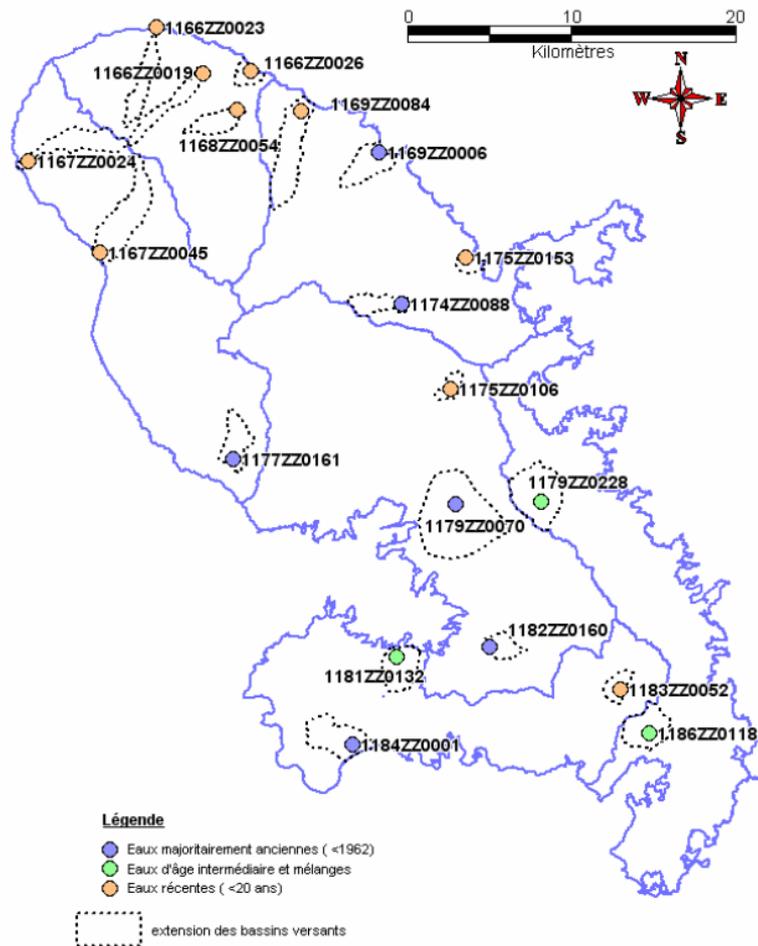


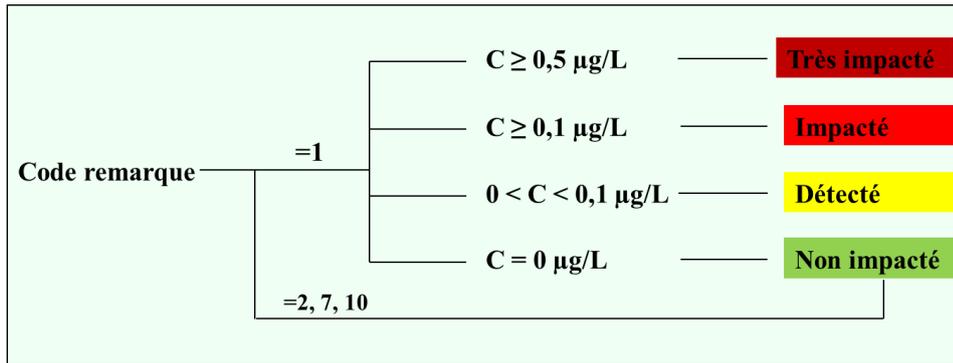
Figure 22 Répartition géographique des groupes d'eau classés en fonction de leur âge (source : Vittecoq et al. 2007)

4.2.3 Concordance pression-impact-état

Cas général

Un traitement statistique basé sur toutes les analyses des concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines effectuées sur toute la période disponible est réalisé afin de déterminer des secteurs les plus impactés par des phytosanitaires et in fine valider les résultats obtenus concernant les pressions significatives.

La Figure 23 illustre le principe de classification des analyses à partir des données ADES. Différents statuts d'impact ont été attribués en fonction de la validité de l'analyse (code remarque) et de la concentration (C) mesurée du paramètre phytosanitaire. L'éventuelle variation de la limite de détection ou quantification et la possible présence de limites de quantification ou détection élevée sont prises en compte.



NB : Code remarque

- 2 = > seuil de détection
- 10 = < seuil quantification
- 0 = analyse non faite
- 1 = domaine de validité
- 7 = traces

Figure 23 Principe de classification d'une analyse

Le Tableau 24 présente un bilan des analyses disponibles sur les différents qualitomètres de Guadeloupe (extraction ADES sur la période 1999-2014) et Martinique (extraction ADES sur la période 1993-2015) et la classification de ces analyses selon le principe expliqué plus haut.

Tableau 24 - Exemple de classification des analyses pour la Guadeloupe (période 1999-2014) et la Martinique (1993-2015) à partir des données ADES

	Nbre de qualitomètres	Nbre de paramètres phyto	Nbre d'analyses	Période	Très impacté	Impacté	Déteecté	Non impacté
Guadeloupe	37	436	66292	1999-2014	88	157	444	65603
Martinique	67	390	116665	1993-2015	411	520	1543	114132

Une fois les analyses classées, on fait la sommation pour chaque qualitomètre :

- du nombre total d'analyse,
- du nombre total d'analyse ayant comme statut « non impacté »,
- du nombre total d'analyse ayant comme statut « déteecté »,
- du nombre total d'analyse ayant comme statut « impacté » et « très impacté »,

On réalise ensuite les pourcentages respectifs au trois critères précédents (non impacté, déteecté et impacté ou très impacté), toutes molécules confondues.

La visualisation de ces pourcentages sur une carte permet de comparer par masse d'eau souterraine, les qualitomètres qui sont plus ou moins impactés par l'ensemble des produits phytosanitaires. Une information intéressante à exploiter est le nombre de qualitomètres ayant 100% d'analyses avec le statut non impacté comparativement avec le nombre total de qualitomètres au sein de la masse d'eau. Plus ce pourcentage sera grand, plus les pressions significatives de la masse d'eau devraient être faibles.

Il faut également croiser ces informations avec ceux relatifs aux molécules historiques et aux âges de l'eau.

Application à la Martinique

L'annexe 10 synthétise les pourcentages obtenus suite à la classification des analyses par qualitomètre pour la Martinique (extraction ADES de 2016). Le Tableau 25 indique par exemple le pourcentage du nombre de qualitomètres jamais impacté par masse d'eau souterraine en Martinique. La comparaison entre les pressions significatives et les analyses statistiques sur les concentrations en produits phytosanitaires réalisées selon le principe présenté plus haut est présentée sur la Figure 24.

On peut constater :

- Une bonne cohérence des deux résultats pour les masses d'eau FRGJ201 et FRGJ202. Sur ces masses d'eau, pour lesquels les pressions significatives sont estimées fortes, la majorité des qualitomètres possèdent un pourcentage non nul d'analyses impactées à très impactées.
- Sur la masse d'eau FRGJ203 pour laquelle la pression significative est estimée faible, quasiment la moitié des qualitomètres n'ont jamais été impacté. Les seuls détectons ou impacts observés sont très localisés ; comme par exemple pour le qualitomètre 1167ZZ0045 se situant sur des bananerais et à proximité des champs de canne à sucre et ayant une proportion non négligeable d'analyses impactées par la chlordécone. Les résultats sont donc cohérents pour cette masse d'eau.
- Sur les masses d'eau FRJG206 et FRGJ205 : Sud Caraïbe et Sud Atlantique pour lesquelles des pressions significatives faibles sont estimées, on retrouve une proportion non négligeable de qualitomètres pour lesquels les analyses réalisées n'ont révélé aucune contamination par les produits phytosanitaires (100% d'analyses « non impactées »). Cependant, il y a quelques qualitomètres où la qualification des analyses est au niveau le plus fort (impacté voire très impacté). Il s'agit soit de zones de pressions isolées (cf carte de pression par îlots §2.3.1) avec des superficies de culture faibles, soit de molécules historiques qui ne sont plus commercialisées aujourd'hui. La chlordécone essentiellement pour les piézomètres 1184ZZ001/S1 et 1183ZZ0052/PZ, du diuron pour le qualitomètre 1181ZZ0131/PZ (d'ailleurs il n'existe que 5 analyses au total sur ce qualitomètre et si on supprime la seule analyse impactée à cause du diuron ce qualitomètre n'est plus en rouge sur la carte) ou encore l'asulame pour le qualitomètre 1181ZZ0132/PZ. Une autre carte a été réalisée sans quelques molécules historiques (asulame, bromacil, chlordécone, dieldrine, diuron, hexazinone, métalaxyl, monuron) afin de mettre en évidence cette problématique, elle est présentée sur la Figure 25. On voit que le qualitomètre 1181ZZ0131/PZ localisé sur la masse d'eau FRGJ206 devient vert c'est-à-dire jamais impacté.
- Pour la masse d'eau FRGJ2014, une pression significative moyenne semble tout à fait cohérente avec les résultats des analyses par qualitomètre.

Tableau 25 Pourcentage et nombre de qualitomètres jamais impactés par masse d'eau souterraine en Martinique

MESO	nbre total qualito	qualito jamais impacté (nombre et pourcentage)	
FRJG201	16	5	31%
FRJG202	7	2	29%
FRJG203	17	8	47%
FRJG204	15	7	47%
FRJG205	5	2	40%
FRJG206	7	3	43%

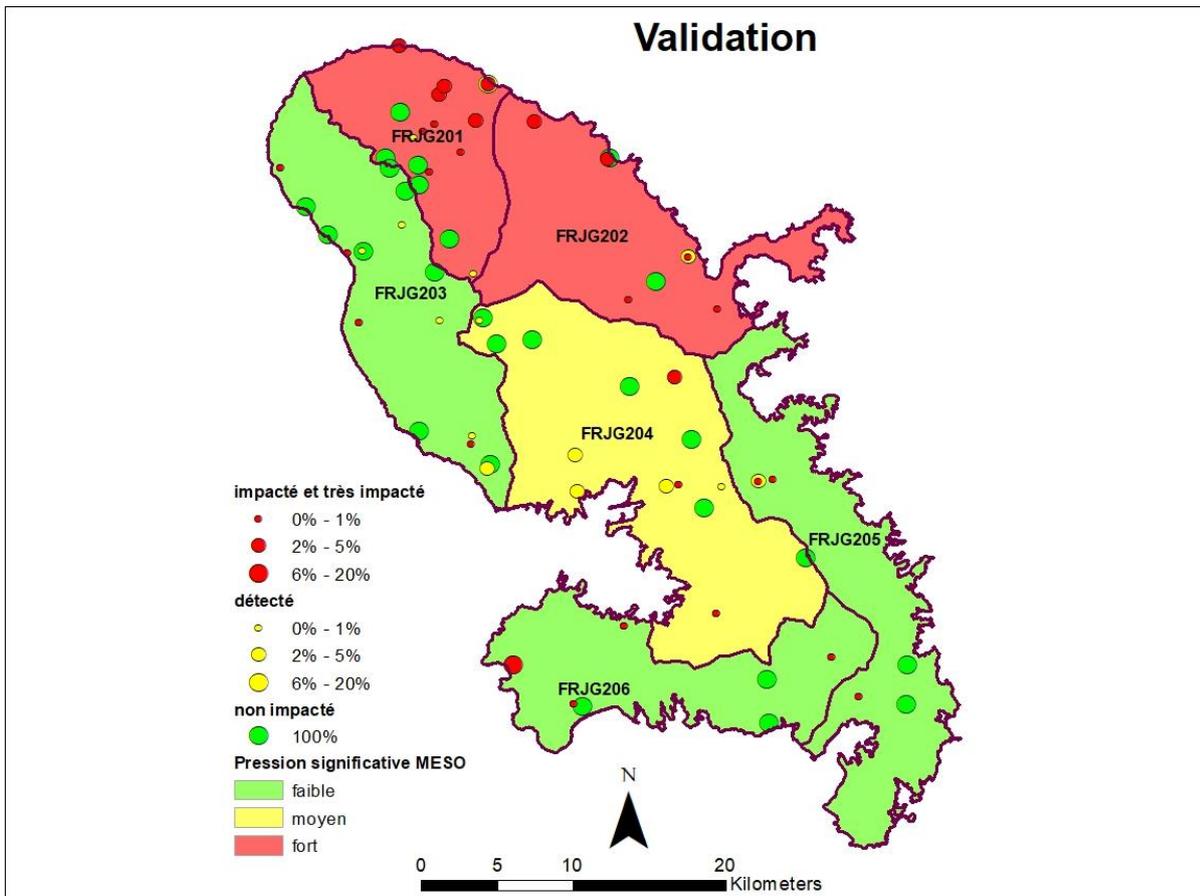


Figure 24 Confrontation des pressions significatives à l'échelle de la masse d'eau et des résultats de l'analyse statistique sur les concentrations en produits phytosanitaires par qualitomètre

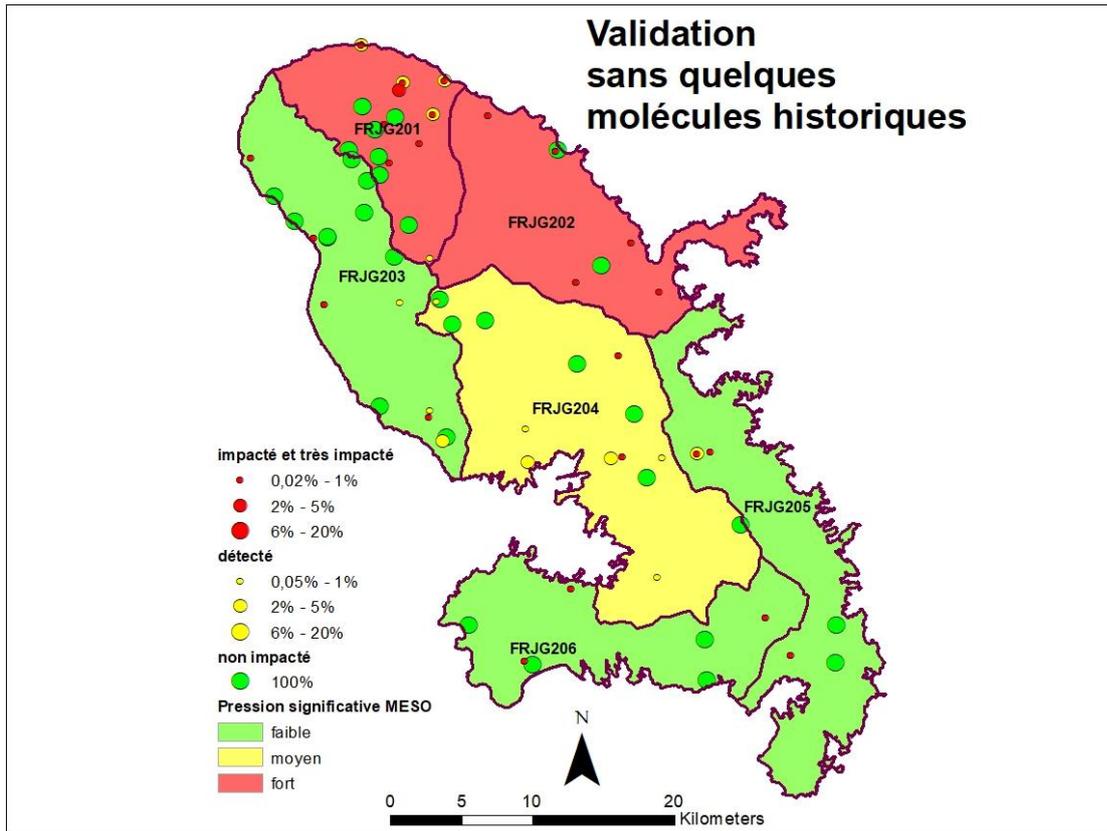


Figure 25 Confrontation des pressions significatives à l'échelle de la masse d'eau et des résultats de l'analyse statistique sur les concentrations en produits phytosanitaires par qualitomètre sans les molécules historiques

5 Conclusion

L'analyse pression-impact des activités agricoles sur les eaux souterraines dues aux produits phytosanitaires est un travail complexe à réaliser :

- d'une part du fait des connaissances hydrogéologiques partielles et de la méconnaissance des voies d'infiltration et de circulation rapides des eaux à travers les sols et la zone non saturée ;
- d'autre part à cause des modalités spécifiques de transfert à chaque produit phytosanitaire ;
- enfin, du fait des problématiques de changement d'échelle et d'agrégation à la masse d'eau souterraine qui peut s'avérer très approximatif dans le cadre où peu de données de contrôle sont disponibles.

Dans tous les cas, l'avis d'expert et la connaissance hydrogéologique locale restent fondamentaux à cette analyse.

La méthode proposée dans ce guide s'articule autour de trois étapes principales :

- Tout d'abord, la détermination des pressions brutes agricoles phytosanitaires qui repose sur une couche cartographique d'occupation du sol avec distribution des cultures et une détermination à dire d'experts des pressions en produits phytosanitaires exercées sur ces différentes cultures. Un calcul de pondération des pressions sur les surfaces cultivées est réalisé à l'échelle de la masse d'eau.
- La deuxième grande étape de la méthodologie consiste à estimer un risque global de transfert des produits phytosanitaires à l'échelle de la masse d'eau souterraine. Une méthode est privilégiée pour l'étude du risque de contamination mais d'autres propositions méthodologiques sont faites en lien avec les données disponibles. Ces méthodes reposent sur un travail de spatialisation des molécules étudiées en fonction de la carte pédologique et de leur propriété. Les méthodes préconisent l'utilisation de cartes de vulnérabilité intrinsèque ou de l'Indice de développement et de persistance des réseaux et de cartes de flux précités ou infiltrés.
- La dernière étape est le croisement des deux sources d'information : pressions brutes et risque de contamination pour l'établissement des pressions significatives. La validation des résultats est effectuée à partir d'une classification de toutes les analyses des concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines.

La méthode a été déployée entièrement sur le département de la Martinique. La partie relative au transfert s'inspire d'une étude réalisée en 2013 par Baran et al. à partir de quelques molécules sélectionnées. Malgré la non exhaustivité des données (tous les grands types de formation n'ont pas été étudiés en laboratoire) et des hypothèses prises (valeurs moyennes affectées à chaque grand type de sol pour le Koc et la DT50), les résultats obtenus montrent dans l'ensemble des résultats cohérents à l'échelle de la masse d'eau. Elle peut cependant être complétée par l'étude de nouvelles molécules pour compléter et abonder les résultats obtenus.

C'est pourquoi les méthodes proposées peuvent être agrémentées par l'acquisition de données complémentaires sur la connaissance des pratiques agricoles (molécules et quantités

appliquées), les caractéristiques physico-chimiques des molécules mais également sur la qualité des eaux souterraines. En effet, considérant d'une part la persistance reconnue de certaines molécules (chlordécone, lindane, diuron etc.) et d'autre part l'existence de temps de transfert lent parfois de plusieurs décennies, il semble nécessaire de continuer à suivre une liste la plus exhaustive possible de molécules y compris de molécules très anciennes dont les usages sont interdits. A l'inverse, des molécules homologuées très récemment peuvent servir de traceurs de circulation plus rapide (quelques mois à quelques années) dans des secteurs où l'âge de l'eau semble beaucoup plus récent et/ou à des périodes où une infiltration très rapide pourrait se produire (saison des pluies par exemple).

6 Bibliographie

Allier D, Vittecoq B., Mardhel V. (2008) Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique. BRGM/RP-56283-FR.

ACTA (2008) - Index Phytosanitaire 2008. 44 ed.; Association de Coordination Technique Agricole, Paris. 844 p

ASP (2013) - Registre Parcellaire Graphique 2013: contours des îlots cultureux et leur groupe de cultures majoritaire des exploitations. Agence de services et de paiement (ASP).

Aunay B., Lachassagne P., Stollsteiner P. (2009). Identification des modalités d'exploitation des ressources en eaux souterraines du domaine d'altitude de l'Est de La Réunion – Phase 2. BRGM/RP-57185-FR. 125p.

Aunay B., Brugeron A., Vaudour K., Wuilleumier A. (2011) - Détermination de la vulnérabilité des pressions et des risques de pollution sur cinq Bassins d'Alimentation de Captages prioritaires à l'île de la Réunion. BRGM/RP-59057-FR.

Bailey, G.W., White, J.L. (1970) - Factors influencing the adsorption, desorption, and movement of pesticides in soil Residue reviews, 32: 29-92

Balland M., Mestres, R., Fagot, M. (1988) - Rapport sur l'évaluation des risques liés à l'utilisation de produits phytosanitaires en Guadeloupe et en Martinique. MATE, MAPE. 96 p

Baran, N., Arnaud, L. (2013) - Cartographie des risques de contamination des eaux souterraines par les produits phytosanitaires en Martinique. Rapport BRGM/RP-61976-FR. 103 p

Baran N., Barras A.V., (2007). Processus de transfert des produits phytosanitaires du sol vers les eaux souterraines en Martinique. Rapport de phase 1. BRGM/RP5595-FR 68p.

Baran N., Barras A.V., (2008). Processus de transfert des produits phytosanitaires du sol vers les eaux souterraines en Martinique. Phase 2 : études de processus de sorption et de dégradation dans les sols et phase 3 : préconisations de suivi dans les eaux souterraines. BRGM/RP56658-FR 89p.

Bazot S., Bois P., Joyeux C., Lebeau T., (2007). Mineralization of diuron [3-(3,4-dichlorophenyl)-1, 1-dimethylurea] by co-immobilized *Arthrobacter* sp. and *Delftia acidovorans*. Biotechnol. Lett 29, 749-754.

Benoit, P. (1994) - Rôle de la nature des matières organiques dans la stabilisation des résidus de polluants organiques dans les sols. Thèse à l'INA-PG, 194 p

Bernard H., Chabaliere P.F., Chopart J.L., Legube B., Vauclin M., (2005). Assessment of herbicide leaching risk in two tropical soils of Reunion Island (France). Journal of Environmental Quality 34, 534-543.

- Bessière H.** (2016) – Guide méthodologique pour l'analyse Pressions-Impact dans le cas de pollutions industrielle dans les départements d'Outre-Mer. Rapport final. BRGM/RP-65558-FR, p.76.
- Boivin A., Amellal S., Schiavon M., van Genuchten M.T.,** (2005a). 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) sorption and degradation dynamics in three agricultural soils. *Environmental Pollution* 138, 92-99.
- Boivin A., Cherrier R., Schiavon M.,** (2005b). A comparison of five pesticides adsorption and desorption processes in thirteen contrasting field soils. *Chemosphere* 61, 668-676.
- Boesten, J.** (2000) - Modeler subjectivity in estimating pesticide parameters for leaching models using the same laboratory data set. *Agricultural water management*, 44(1-3): 389-409
- Borggaard O.K., Gimsing A.L.,** (2008). Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science* 64, 441-456.
- Brenot A., Vittecoq B., Négrel P., Mardhel V.,** (2008). Caractérisation et différenciation géochimique des eaux souterraines de la Martinique. BRGM/RP-56266-FR.
- Brugneaux S., Pierret L., Mazataud V.,** (2004). Les agressions d'origine anthropique sur le milieu marin côtier et leurs effets sur les écosystèmes coralliens et associés de la Martinique. Les cahiers de l'Observatoire, N°1. Fort de France: Observatoire du Milieu Marin Martiniquais, 96p.
- Boesten, J.** (2000) - Modeler subjectivity in estimating pesticide parameters for leaching models using the same laboratory data set. *Agricultural water management*, 44(1-3): 389-409
- Brunet, N., Guichard, L., Omon, B., Pingault, N., Pleyber, E., Seiler, A.** (2008) - L'indicateur de fréquence de traitements (IFT) : un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 56: 131-141
- CA Martinique** (2007a) - Fiche technique - Banane (export). Chambre d'Agriculture Martinique. Cultures tropicales, 2 p
- CA Martinique** (2007b) - Fiche technique - Canne à sucre. Chambre d'Agriculture Martinique. Cultures tropicales, 2 p
- CA Réunion** (2013) - Deux nouveaux herbicides homologués. *La Réunion Agricole*, 13: 16-17
- Calvet, R. (1989).** Adsorption of organic chemical. *Environmental Health Perspectives* 83: 145-177.
- Calvet R., Barriuso E., Bedos C., Benoit P., Charnay M.P., Coquet Y.,** (2005). Les pesticides dans le sol. Conséquences agronomiques et environnementales. Ed. France Agricole. ISBN 2-85557-119-7. 637p.
- CLC** (2012) - CORINE Land Cover 2012. Ministère de l'écologie. Disponible à : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/clc/fichiers/>.
- Desprats JF., Comte JP., Chabier Ch.,** (2004). Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de phase 3. Rapport BRGM/RP-53262-Fr.

Didier, L. (2011) - La banane en Guadeloupe et en Martinique- La banane, un pilier de l'agriculture des Antilles. Agreste. Primeur, 262. 4 p

DISAR (2015) - (Diffusion Interactive des Statistiques Agricoles de Référence) - Données en ligne - Available on internet on <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>.

Dubus, I.G., Brown, C.D., Beulke, S. (2003) - Sources of uncertainty in pesticide fate modelling. The Science of the Total Environment, 317: 53-72

Ducreux, L., Ratsimihara, T., Brugeron, A., Castillo, C., Lopez, B., et al. (2014) - Etude des relations Pressions - Impacts - Etats à l'échelle des masses d'eau souterraine de Guadeloupe dans le cadre de la révision de l'état des lieux. Rapport BRGM/RP-63816-FR. 146 p

Ducreux, L., Surdyk, N., Devenoges, Q. (2013) - Evaluation de l'état des masses d'eau souterraine de la Guadeloupe dans le cadre de la révision de l'état des lieux de 2013. Rapport final Rapport BRGM/RP-62685-FR. 63 p

E-phy (2014) - Le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages des matières fertilisantes et des supports de culture homologués en France.

Elsass, P., Surdyk, N. (2009) - Etude prospective de l'évolution des concentrations en phytosanitaires en nappe d'Alsace. BRGM/RP-57404-FR. 67 p

Farenhorst A., Londry K.L., Nahar N., Gaultier J., (2008). In-field variation in 2,4-D mineralization in relation to sorption and soil microbial communities. Journal of Environmental Science and Health Part B 43, 1-7.

Gaultier J., Farenhorst A., Cathcart J., Goddard T., (2008). Degradation of [carboxyl-¹⁴C] 2,4-D and [ring-U-¹⁴C] 2,4-D in 114 agricultural soils as affected by soil organic carbon content. Soil Biology & Biochemistry 40, 217-227.

Giacomazzi S., Cochet N., (2004). Environmental impact of diuron transformation: a review. Chemosphere 56, 1021-1032.

Gimsing A.L., Szilas C., Borggaard O.K., (2007). Sorption of glyphosate and phosphate by variable-charge tropical soils from Tanzania. Geoderma 138: 127-132.

Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Gourcy L., Baran N., Vittecoq B. (2008) – Improving the knowledge of pesticides and nitrate transfer using age-dating tools (CFC, SF₆, 3H) in a volcanic island (Martinique, French West Indies). JHournal of contaminant hydrology, 108:107-117.

Gustafson, D.I. (1989) - Groundwater ubiquity score : a simple method for assessing pesticide leachability. Environmental Toxicology and Chemistry, (8): 339-357

Hatilissn, E. (2007) - L'entretien de la canne à sucre. Canne info- Lettre d'information du CTCS de la Guadeloupe, N°17: 4

IT2 (2011) - Manuel du planteur de banane de guadeloupe de martinique. Institut Technique Tropical. 30 p

- Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, C.** (1983) - Elements of soil physics - Developments in soil science. Elsevier Science B.V., Amsterdam. 228 p
- Liyanage J.A., Watawala R.C., Piyal Aravinna A.G., Smith L., Kookana R.S.,** (2006). Sorption of carbofuran and diuron pesticides in 43 tropical soils of Sri Lanka. Journal of Agricultural and Food Chemistry 54, 1784-1791.
- Merini L.J., Cuadrado V., Flocco C.G., Giuliotti A.M.,** (2007). Dissipation of 2,4-D in soils of the Humid Pampa region, Argentina: a microcosm study. Chemosphere 68, 259-265.
- Nicar, D.** (2009) - Memento Agricole 2009 (Résultat 2008). Agreste Martinique. 2 p
- Oliver D.P., Kookana R.S., Quintana B.,** (2005). Sorption of pesticides in tropical and temperate soils from Australia and the Philippines. J. Agric. Food Chem. 53, 6420-6425.
- Odeadom** (2003) - (Office de développement de l'économie agricole d'outre-mer)- Rapport d'activité 2002-2003. Odeadom. 63 p
- Odeadom** (2010) - (Office de développement de l'économie agricole d'outre-mer)- Rapport d'activité 2010. Odeadom. 90 p
- PPDB** (2015) - The Pesticide Properties Database (PPDB.) Available on internet on <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/index2.htm>.
- Rao, P.S.C., Hornsby, A.G., Jessup, R.E.** (1985) - Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. Soil & Crop Science Society of Florida - Proceedings, 44: 1-8
- Smelt J.H., Van de Peppel-Groen, Van der Pas L.J.T., Dijksterhuis A.,** (1996). Development and duration of accelerated degradation of nematicides in different soils. Soil Biol. Biochem. 28, 1757-1765.
- Sorensen S.R., Albers C.N., Aamand J.,** (2008). Rapid mineralization of the phenylurea herbicide diuron by *Variovorax* sp. strain SRS16 in pure culture and within a two-member consortium. Applied and Environmental microbiology 74, 2332-2340.
- Sorensen S.R., Schultz A., Jacobsen O.S., Aamand J.,** (2006). Sorption, desorption and mineralisation of the herbicides glyphosate and MCPA in samples from two Danish soil and subsurface profiles. Environmental Pollution 141, 184-194.
- Strathmann T.J., Stone A.T.,** (2001). Reduction of carbamate pesticides oxamyl and methomyl by dissolved Fe^{II} and Cu^I. Environ. Sci. Technol., 35, 2461-2649.
- Surdyk, N., Dubus I.G., Crouzet, C., Gautier, A., Flehoc, C., Nolan, B.T.** (2008) - Estimation de la mobilité dans les sols de molécules ioniques à caractère acide faible : application à l'évaluation des risques environnementaux dans le cadre de l'homologation de produits phytosanitaires. Rapport BRGM/RP-56702-FR. 111 p
- Surdyk, N., Gutierrez, A., Gourcy, L., Lamotte, C.** (2011) - Réduction de l'apport azotée dans les Aires d'Alimentation des Captages AEP de la plaine de Mauguio. Approche par modélisation BICHE. Rapport BRGM. RP-59917-FR 118 p

- Surdyk, N., Vernoux, J.F.** (2012) - Approche de la vulnérabilité spécifique des eaux souterraines vis-à-vis des produits phytosanitaires. Rapport BRGM. RP-59656-FR. 91 p
- Tiktak, A., de Nie, D., van der Linden, T., Kruijne, R.** (2002) - Modelling the leaching and drainage of pesticides in the Netherlands: The GeoPEARL model. *Agronomie*, 22: 373–387.
- Trevisan, M., Errera, G., Capri, E., Padovani, L., Del Re, A.A.M.** (1999) - Environmental potential risk indicator for pesticides. In *Comparing Environmental Risk Indicators for Pesticides: Results of the European CAPER Project*. Centre for Agriculture and the Environment: Utrecht, The Netherlands. pp 141-147.
- Vereecken H.**, (2005). Mobility and leaching of glyphosate: a review. *Pest Management Science* 61: 1139-1151.
- Vittecoq B., Gourcy L., Baran N.**, (2007). Datation des eaux souterraines de Martinique par l'analyse conjointe des CFC, SF6 et tritium et relation avec les concentrations en nitrates et produits phytosanitaires. BRGM/RP-55844-FR, 50 p.
- Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., Ladouche B., Larechal J.C., Petit V.**, (2007). Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR, 221p.
- Vittecoq B., Lachassagne P., Traineau H.**, (2008). Hydrogéologie du flanc est de la Montagne Pelée, BRGM/RP-55936-Fr.
- Wagenet, R.J., Hutson, J.L.** (1989) - LEACHM Leaching Estimation and Chemistry Model. A process-based model of water and solute movements, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. *Continuum Vol. 2 (Version 2.0)*. Water Resources Institute, Center for Environmental Research, Cornell University.:
- Wauchope, R.D., Yeh, S., Linders, J.B.H.J., Kloskowski, R., Tanaka, K., et al.** (2002) - Pesticide soil sorption parameters : theory, measurement, uses, limitations and reliability. *Pest Management Science*, 58(5): 419-445
- Weber J.B., Miller C.T.**, (1989). Organic chemical movement over and through soil. Reactions and movement of organic chemicals in soils. SSSA Spécial Publication n°22. Sawhney B.L., Brown K.(eds). **Agreste Martinique** (2011) - Premières tendances. Agreste Données. N°7 Septembre 2011. 4p
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C.** (1999) - Development and use of a database of HYdraulic PRoperties of European Soils (HYPRES). *Geoderma*, 90: 169-185
- Yu Y., Zhou Q-X.**, (2005). Adsorption characteristics of pesticide methamidophos and glyphosate by two soils. *Chemosphere* 58, 811-816.

Annexe 1

Devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement

Toute une série de mécanismes vont donc contribuer à la concentration finale en pesticides observée dans les eaux souterraines. A l'application du produit, les phénomènes de dérive, de volatilisation et de photolyse peuvent diminuer la dose atteignant ou restant dans le sol. Durant le transfert au travers des sols, les phénomènes de sorption, de dégradation et de prélèvement par les plantes peuvent également minimiser les flux au-delà de la zone racinaire. Puis, lors de la traversée de la zone non saturée, un potentiel de sorption et de dégradation peut persister dans certains cas. Pour finir, dans le milieu saturé, des phénomènes de dilution, de sorption et de dégradation peuvent intervenir. Ces différents processus sont présentés succinctement dans la partie qui suit. Pour plus d'informations il est possible de se rapporter à Mouvet et Baran (2005) ou Calvet et al. (2005).

Temps de transfert

Dans une première étude (Vittecoq et al., 2007) ont été effectués des tests préliminaires de datation des eaux souterraines sur 19 sites du réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Ces tests ont permis de tester la méthode de datation des eaux par les chlorofluorocarbones (CFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) dans le contexte spécifique volcanique insulaire de la Martinique, ce type d'analyse n'ayant jamais été réalisé en milieu tropical et en contexte volcanique. Il en ressort que la méthode de datation par les CFC peut être utilisée avec succès en milieu volcanique alors que les résultats des analyses de SF₆ sont moins probants compte tenu de la présence naturelle de ce gaz dans ces milieux. Outre la validation de la méthode, cette approche menée à l'échelle de la Martinique a permis de distinguer trois groupes d'eau :

- Des eaux majoritairement anciennes (<1950),
- Des eaux d'une vingtaine d'années avec une composante d'eau plus actuelle plus ou moins importante (1988-2002),
- Des eaux d'âge intermédiaire.

Cette classification en fonction de l'âge de l'eau estimé pour cette campagne a ainsi permis d'expliquer l'absence de contamination en produits phytosanitaires (et en nitrates) en certains points par un temps de transfert de plusieurs décennies.

Transport vers l'atmosphère

Généralement le terme de volatilisation est utilisé pour parler de la remobilisation du produit appliqué depuis le sol vers l'atmosphère. Toutefois elle peut se produire au moment même de l'application du phytosanitaire car, lors de l'application par pulvérisation, les phytosanitaires forment des aérosols qui peuvent être transportés dans l'atmosphère (phénomène appelé "spray-drift") (Jury et al., 1987). L'érosion éolienne peut également provoquer le transport de particules contaminées de sol.

La volatilisation est fortement dépendante de la pression de vapeur saturante des molécules. Celle des pesticides est variable mais pour la plupart inférieure à 10 Pa, les rendant peu sensibles à la volatilisation (Bedos et al., 2001 cité dans Bedos et al., 2002). Ce sont des substances qualifiées de peu volatiles ou de semi-volatiles (à l'exception des fumigants). Les quantités volatilisées sont en général plus grandes à partir des surfaces foliaires qu'à partir du sol.

D'une manière générale, tous les processus qui favorisent la diffusion de vapeur comme l'augmentation de la température, de fortes concentrations en phytosanitaires ou une augmentation de l'humidité du sol, contribuent à augmenter la volatilisation. A l'inverse, les

processus qui limitent la diffusion de vapeur comme l'adsorption, réduisent la volatilisation. Les pertes par volatilisation sont donc très variables d'une molécule à une autre et selon les caractéristiques du sol.

Il s'agit d'un phénomène complexe qui a été jusqu'à maintenant peu étudié car les expérimentations de volatilisation sont lourdes à mettre en place et les dosages de l'air délicats à effectuer. Cependant les quelques résultats disponibles montrent que ce phénomène n'est pas à négliger. La région Centre a par exemple réalisé en 2002 des campagnes de mesures des produits phytosanitaires dans l'air qui ont conclu à la présence récurrente dans l'air de molécules phytosanitaires (lindane et trifluraline) avec des fréquences de détection respectives de 93 % et 100 % (GREPPPE, 2003).

Transport vers les eaux de surface

Les pluies excédentaires alimentent les eaux de surface par trois voies préférentielles d'écoulement : le ruissellement de surface, les écoulements latéraux sous la surface du sol du fait d'une rupture de perméabilité (qui peut être occasionnée par la présence d'un substrat imperméable ou d'une semelle de labour) ou le drainage agricole. Ce type de contamination est caractérisé par sa grande variabilité spatio-temporelle et dépend principalement de la perméabilité du sol, de la pente et du travail du sol.

Phénomènes de dégradation

Ce terme englobe les phénomènes de biodégradation et de transformations chimiques. La grande diversité de voies de dégradation peut engendrer la libération dans l'environnement d'un grand nombre de produits de dégradation différents.

La biodégradation

La biodégradation conduit à une disparition des produits phytosanitaires parents (matière active) et à la formation de métabolites sous l'action des micro-organismes du sol. Cette dégradation est souvent lente juste après l'application du produit puis son taux augmente parallèlement à l'augmentation de la population des micro-organismes susceptibles de dégrader le pesticide. Le temps de demi-vie d'une molécule ($T_{1/2}$ ou DT_{50}), correspondant à la durée nécessaire pour que 50 % de la quantité appliquée soit dégradée, fournit une indication sur la rapidité de la dégradation. Cette valeur peut varier de quelques jours à plusieurs mois ou années selon la molécule (solubilité, formulation, molécule de synthèse) et les conditions environnementales (population bactérienne, concentration initiale de produit, type de sol, humidité, température, pH, etc.). Cette durée peut également être raccourcie lorsque le produit est appliqué régulièrement, du fait de l'adaptation de la population microbienne du sol.

La biodégradation a principalement été étudiée sous condition aérobie. Toutefois des études récentes montrent que la dégradation en conditions anaérobies existe pour certaines molécules (Larsen et al., 2001). De plus, même si la biodégradation existe quelles que soient les conditions redox, il est probable que les voies de dégradation diffèrent selon que le milieu est aérobique ou anaérobique, pouvant engendrer ainsi la production de différents métabolites.

La photodégradation

La photodégradation englobe les processus de photolyse et de phototransformation. En phase aqueuse dans les premiers millimètres superficiels de sol ou à la surface des végétaux, les pesticides peuvent être dégradés sous l'effet de la lumière. La photolyse peut-être directe ou indirecte selon que c'est l'énergie absorbée qui entraîne une transformation directe de la

molécule ou l'énergie absorbée par les constituants du milieu (eau, sol). La photodégradation se produit dans l'eau mais existe également en phase adsorbée à la surface des végétaux ou du sol.

La dégradation abiotique

La dégradation biotique est souvent considérée comme le processus majeur de la dégradation pour un grand nombre de pesticides. La dégradation biotique n'est toutefois pas le seul processus existant dans les sols puisque des processus de dégradation abiotique peuvent également se mettre en place. Dans les zones où l'activité biologique est réduite comme dans les horizons de sols profonds ou les eaux souterraines, certains de ces processus de dégradation abiotique peuvent devenir prépondérants.

Les voies de transformation abiotiques majeures sont l'hydrolyse, les réactions d'oxydo-réduction, la déhydrohalogénéation et la photolyse. L'oxydation se produit préférentiellement dans la partie supérieure de la zone non saturée alors que les réactions de réduction peuvent se produire de manière plus probable dans les eaux souterraines.

L'hydrolyse est due à la réaction d'une molécule d'eau avec une molécule organique qui conduit à la coupure de cette dernière et au remplacement d'un atome ou groupe d'atome par un groupe hydroxyle (OH). L'hydrolyse peut se produire aussi bien en solution que pour des molécules adsorbées (Calvet et al., 2005). Les valeurs de demi-vie d'hydrolyse sont extrêmement variables d'une molécule à l'autre (1 journée à plus d'une année).

Les pesticides participent à des réactions d'oxydation (perte d'électrons) ou de réduction (gain d'électrons). Certains groupes fonctionnels (groupe nitro-aromatique, groupe sulfoxyde, groupe alkyl) peuvent être réduits dans les conditions naturelles. L'oxydation est susceptible d'affecter tous les groupes fonctionnels même si certaines réactions sont plus fréquentes que d'autres (Calvet et al., 2005).

Phénomènes de rétention

Rétention biologique : l'absorption par les plantes

Les phytosanitaires peuvent être absorbés par les plantes. Une partie ne sera pas métabolisée et, à la mort du végétal, il sera restitué au milieu où il pourra être à nouveau métabolisé (Gouy, 1993). Cependant, un métabolisme partiel peut intervenir dans la plante engendrant la création de produits moins phytotoxiques.

Rétention physico-chimique : l'adsorption

L'adsorption a été définie par l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) comme « l'enrichissement d'une ou plusieurs espèces chimiques sur une interface ». Le cas le plus fréquent d'adsorption pour les phytosanitaires correspond à l'adsorption sur une phase solide à partir d'une phase liquide. Les interactions peuvent être plus ou moins fortes. Lorsque l'interaction est faible, l'adsorption est dite physique alors que quand elle est forte, le terme d'adsorption chimique est retenu. Différents types d'interactions sont possibles : échange d'ions, interactions avec les cations, interactions polaires, transfert de charges, forces de Van der Waals, etc.

Le processus inverse de l'adsorption, la désorption, n'est pas toujours totalement réversible, des processus d'hystérésis étant fréquemment observés. Les processus d'adsorption et de désorption ne sont pas des processus instantanés. Généralement l'adsorption est plus rapide

que la désorption, sans doute à cause des phénomènes de fixation chimique. La structure du sol et la diffusion moléculaire ont une influence sur les cinétiques de ces phénomènes car elles conditionnent l'accessibilité aux sites d'adsorption.

De nombreux facteurs influencent l'adsorption. Tout d'abord les propriétés de la molécule adsorbée, telles que sa structure, sa solubilité, son coefficient de partition eau/solvant organique (K_{ow}), sa taille et sa forme. Les propriétés de l'adsorbant jouent également un rôle dans la cinétique d'adsorption, via les constituants minéraux (argiles, oxydes, etc.) et organiques qui le composent. La matière organique joue ainsi généralement un rôle prépondérant. Pour finir, des facteurs externes interviennent également et influencent l'adsorption. La composition ionique de la phase liquide est importante parce qu'elle joue sur le pH de la solution et que les ions minéraux en solution peuvent entrer en concurrence avec les phytosanitaires chargés. Il est également considéré que le taux d'adsorption augmente à basse température et dans les sols secs. Enfin, il semblerait que les molécules adsorbées soient moins biodégradables que si elles restent en solution.

Formation de résidus liés

L'utilisation de molécules marquées radioactivement a permis de mettre en évidence l'immobilisation d'une fraction non extractible de produits phytosanitaire dans les sols, fraction comportant non seulement la molécule mère mais aussi ses produits de dégradation. Le vieillissement des résidus dans le sol provoque une diminution de leur disponibilité, notamment pour repasser sous forme dissoute. En revanche leur transport à l'état adsorbé peut être favorisé.

La formation de résidus liés dans le sol contribue donc, au moins temporairement, à réduire le risque de transfert d'une substance vers les eaux souterraines.

La proportion de résidus liés est dépendante de la molécule et des conditions du milieu. Pour une incubation de 100 j, la proportion de résidus liés varie de moins de 10 % pour certaines molécules (pendiméthaline) à plus de 60 % (isoproturon, metalaxyl, phenmedipham – Calvet et al., 2005).

Trois mécanismes sont invoqués pour expliquer l'existence de ces résidus liés :

- stabilisation physique (piégeage physique dans la nanoporosité de composés humiques des sols)
- stabilisation chimique (création de liaisons chimiques notamment avec les substances humiques)
- stabilisation microbiologique (la microflore intervient comme un lieu de stockage des résidus et régulent les flux entre les différents compartiments et la mobilisation).

Etude Martinique (Baran et al., 2013)

« la constante d'adsorption des molécules étudiées (oxamyl, 2,4-D, diuron, propiconazole, chlordécone, glyphosate) est contrôlée, de façon plus ou moins marquée, par la teneur en carbone organique.

En ce qui concerne la dégradation des molécules, suivie pendant 106 à 127 jours, les résultats obtenus relèvent des disparités entre les molécules et pour une molécule donnée, entre les sols.

Annexe 2

Le registre Parcellaire Graphique

Source : <http://www.asp-public.fr/ses-savoir-faire/mise-disposition-du-registre-parcellaire-graphique-anonyme>

Conformément à la réglementation communautaire (n° 1593/2000), la France a mis en place depuis 2002, le Registre Parcellaire Graphique (RPG). Le Registre Parcellaire Graphique ou RPG développé dans le cadre du suivi des aides PAC données aux agriculteurs. Le RPG est un système d'information géographique permettant l'identification des parcelles agricoles et des cultures qui y sont assolées, ainsi que d'obtenir certaines informations sur les exploitations agricoles concernées. Ces informations sont disponibles sur la France entière, de manière exhaustive sur les surfaces déclarées à la PAC, soit la quasi-totalité des surfaces en herbe et cultivées, à l'exception des cultures pérennes pour lesquelles les informations sont plus fragmentaires.

Ce dispositif, administré par l'Agence de Services et de Paiement (ASP), est utilisé pour la gestion des aides européennes à la surface. Il contient environ 6 millions d'îlots, soit plus de 27 millions d'hectares, déclarés annuellement par près de 400 000 agriculteurs.

Depuis 2007, l'ASP diffuse une version anonyme des données graphiques du RPG associées à certaines des données déclarées par les exploitants. Ces données fournissent des informations détaillées sur l'occupation du sol et les structures foncières et permettent par exemple de conduire des projets ou des études d'aménagement du territoire, de protection de la faune ou de la flore, de gestion de la qualité de l'eau ou de prévention des risques. La diffusion des données est réservée aux usages relevant d'une mission de service public ou d'une activité non commerciale. Toute mise à disposition de données s'accompagne d'une convention/licence type décrivant les données mises à disposition et l'usage qui en sera fait.

La diffusion de ces données se fait à titre payant exception faite des services centraux et déconcentrés de l'Etat. Le cas échéant, le montant facturé correspond aux seuls frais de mise à disposition des données.

L'îlot, unité cartographique de base des données RPG

Un îlot correspond à un ensemble contigu de parcelles culturales exploitées par un même agriculteur. Le dessin des îlots est mis à jour chaque année par les agriculteurs sur la base de l'orthophoto de l'Institut Géographique National (BD ORTHO® de l'IGN). La précision géographique du RPG correspond généralement à l'échelle du 1:5000 et sauf exception, il n'y a pas de recouvrements entre les îlots déclarés une même année. Par ailleurs, par le biais des déclarations, chaque îlot est associé à un ensemble de données alphanumériques liées à l'occupation du sol (nature de la culture et surface) ou aux caractéristiques de l'exploitation.

Comme précisé précédemment, les données RPG sont disponibles à l'échelle des îlots PAC, tandis que les cultures sont mises en place par les exploitations agricoles sur des parcelles culturales. Ces parcelles culturales s'appuient elles-mêmes sur des parcelles cadastrales appartenant à des propriétaires. Une parcelle culturale peut s'étaler sur plusieurs parcelles cadastrales et vice-versa.



Figure 26 Parcelles cadastrales et culturales (source : Géoportail). Gauche : plusieurs parcelles culturales (limites rouges) dans une parcelle cadastrale (limite noire). Droite : plusieurs parcelles cadastrales (limite noire) dans une parcelle culturale (limite rouge)



Figure 27 Ilots PAC et parcelles culturales. Gauche : un îlot (limite bleue) contenant plusieurs parcelles culturales (limite rouge). Droite : deux îlots contenant chacun une seule parcelle culturale

Niveaux d'information associés aux îlots

Les données mises à disposition sont rendues anonymes, c'est-à-dire privées de toute déclaratives associées, organisées selon les 4 niveaux d'information suivants :

Tableau 26 Différents niveaux d'information des données ASP

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Données graphiques	X	X	X	X
Identifiant numérique et non significatif par îlot	X	X	X	X
Commune de localisation de l'îlot issue du formulaire S2		X	X	X
Cultures de l'îlot regroupées selon une nomenclature de 28 groupes		X	X	X
Surfaces des regroupements obtenus		X	X	X
Surface de référence de l'îlot			X	X
Caractère irrigué ou non de l'îlot			X	X
Forme juridique de l'exploitation			X	X
Surface déclarée de l'exploitation			X	X
Département de rattachement administratif du dossier			X	X
Classe d'âge pour les exploitants individuels			X	X
Identifiant numérique non significatif de l'exploitation				X

Description détaillée des fichiers de données ASP de niveau 4

Les données mises à disposition par l'ASP sont rendues anonymes. Ces données sont constituées de trois lots de fichiers, contenant chacun un ensemble d'informations (Tableau 27). Les noms de ces fichiers ont été modifiés à partir de l'année 2010.

Tableau 27 : Nom et description des fichiers de données ASP de niveau 4

Nom fichiers	Description	Exemple																																																																																																								
<p><u>2006-2009 :</u> ilot-description_XXXX_YYY .csv</p> <p><u>2010-2012 :</u> ILOTS-ANONYMES-NIVEAU4_YYY_date.csv</p>	<p>Renseignements administratifs sur l'îlot et l'exploitation agricole qui l'exploite (une ligne par îlot)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>NUM_ILOT</th> <th>COMMUNE_ILOT</th> <th>FORME_JURIDIQUE_EXPL</th> <th>CLASSE_AGE_EXPL</th> <th>SURF_DECLAREE_EXPL</th> <th>DEPT_RATTACHEMENT_EXPL</th> <th>SURFACE_REFERENCE_ILOT</th> <th>ID_EXPL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>079-1</td><td>79043</td><td></td><td>D</td><td>83.84</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-2252</td></tr> <tr><td>079-2</td><td>79043</td><td></td><td>D</td><td>83.84</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-2252</td></tr> <tr><td>079-3</td><td>79043</td><td></td><td>D</td><td>83.84</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-2252</td></tr> <tr><td>079-4</td><td>79043</td><td></td><td>D</td><td>83.84</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-2252</td></tr> <tr><td>079-5</td><td>79280</td><td>EARL</td><td></td><td>102.43</td><td>49</td><td>0.11</td><td>079-2253</td></tr> <tr><td>079-6</td><td>79280</td><td>EARL</td><td></td><td>102.43</td><td>49</td><td>0.58</td><td>079-2253</td></tr> <tr><td>079-7</td><td>49236</td><td>EARL</td><td></td><td>102.43</td><td>49</td><td>9.70</td><td>079-2253</td></tr> <tr><td>079-8</td><td>79280</td><td>EARL</td><td></td><td>102.43</td><td>49</td><td>0.02</td><td>079-2253</td></tr> <tr><td>079-9</td><td>49102</td><td>EARL</td><td></td><td>102.43</td><td>49</td><td>3.85</td><td>079-2253</td></tr> <tr><td>079-10</td><td>79195</td><td></td><td>C</td><td>105.75</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-1506</td></tr> <tr><td>079-11</td><td>79195</td><td></td><td>C</td><td>105.75</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-1506</td></tr> <tr><td>079-12</td><td>79195</td><td></td><td>C</td><td>105.75</td><td>49</td><td>0.00</td><td>079-1506</td></tr> </tbody> </table>	NUM_ILOT	COMMUNE_ILOT	FORME_JURIDIQUE_EXPL	CLASSE_AGE_EXPL	SURF_DECLAREE_EXPL	DEPT_RATTACHEMENT_EXPL	SURFACE_REFERENCE_ILOT	ID_EXPL	079-1	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252	079-2	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252	079-3	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252	079-4	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252	079-5	79280	EARL		102.43	49	0.11	079-2253	079-6	79280	EARL		102.43	49	0.58	079-2253	079-7	49236	EARL		102.43	49	9.70	079-2253	079-8	79280	EARL		102.43	49	0.02	079-2253	079-9	49102	EARL		102.43	49	3.85	079-2253	079-10	79195		C	105.75	49	0.00	079-1506	079-11	79195		C	105.75	49	0.00	079-1506	079-12	79195		C	105.75	49	0.00	079-1506
NUM_ILOT	COMMUNE_ILOT	FORME_JURIDIQUE_EXPL	CLASSE_AGE_EXPL	SURF_DECLAREE_EXPL	DEPT_RATTACHEMENT_EXPL	SURFACE_REFERENCE_ILOT	ID_EXPL																																																																																																			
079-1	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252																																																																																																			
079-2	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252																																																																																																			
079-3	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252																																																																																																			
079-4	79043		D	83.84	49	0.00	079-2252																																																																																																			
079-5	79280	EARL		102.43	49	0.11	079-2253																																																																																																			
079-6	79280	EARL		102.43	49	0.58	079-2253																																																																																																			
079-7	49236	EARL		102.43	49	9.70	079-2253																																																																																																			
079-8	79280	EARL		102.43	49	0.02	079-2253																																																																																																			
079-9	49102	EARL		102.43	49	3.85	079-2253																																																																																																			
079-10	79195		C	105.75	49	0.00	079-1506																																																																																																			
079-11	79195		C	105.75	49	0.00	079-1506																																																																																																			
079-12	79195		C	105.75	49	0.00	079-1506																																																																																																			
<p><u>2006-2009 :</u> ilot_groupe_culture_XXXX_YYY .csv</p> <p><u>2010-2012 :</u> ILOTS-ANONYMES-GROUPES-CULTURE_YYY_date.csv</p>	<p>Détail des surfaces de groupes de cultures présents sur chaque îlot (plusieurs lignes par îlot si plusieurs groupes de cultures la même année sur l'îlot)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID_ILOT</th> <th>CODE_GROUPE_CULTURE</th> <th>SURFACE_GROUPE_CULTURE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>117337</td><td>2</td><td>5.06</td></tr> <tr><td>117338</td><td>2</td><td>1.79</td></tr> <tr><td>117339</td><td>1</td><td>3.32</td></tr> <tr><td>117340</td><td>18</td><td>1.03</td></tr> <tr><td>117340</td><td>1</td><td>6.12</td></tr> <tr><td>117341</td><td>19</td><td>0.2</td></tr> </tbody> </table>	ID_ILOT	CODE_GROUPE_CULTURE	SURFACE_GROUPE_CULTURE	117337	2	5.06	117338	2	1.79	117339	1	3.32	117340	18	1.03	117340	1	6.12	117341	19	0.2																																																																																			
ID_ILOT	CODE_GROUPE_CULTURE	SURFACE_GROUPE_CULTURE																																																																																																								
117337	2	5.06																																																																																																								
117338	2	1.79																																																																																																								
117339	1	3.32																																																																																																								
117340	18	1.03																																																																																																								
117340	1	6.12																																																																																																								
117341	19	0.2																																																																																																								
<p>Fichiers SIG (shapefile, =4 fichiers) :</p> <p><u>2006-2009 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • ilot_XXXX_YYY.dbf • ilot_XXXX_YYY.prj • ilot_XXXX_YYY.shp • ilot_XXXX_YYY.shx <p><u>2010-2012 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • SURFACES-XXXX-ILOTS_ANONYMES_YYY_date.dbf • SURFACES-XXXX-ILOTS_ANONYMES_YYY_date.prj • SURFACES-XXX-ILOTS_ANONYMES_YYY_date.shp • SURFACES-XXXX-ILOTS_ANONYMES_YYY_date.shx 	<p>Contour des îlots : un polygone par îlot, correspondant à une ligne de la table attributaire (fichier .dbf) contenant l'identifiant d'îlot.</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID_ILOT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>117337</td></tr> <tr><td>1</td><td>117338</td></tr> <tr><td>2</td><td>117339</td></tr> <tr><td>3</td><td>117340</td></tr> <tr><td>4</td><td>117341</td></tr> <tr><td>5</td><td>117465</td></tr> <tr><td>6</td><td>414535</td></tr> <tr><td>7</td><td>701531</td></tr> <tr><td>8</td><td>701648</td></tr> <tr><td>9</td><td>701650</td></tr> <tr><td>10</td><td>701771</td></tr> </tbody> </table>	ID_ILOT	0	117337	1	117338	2	117339	3	117340	4	117341	5	117465	6	414535	7	701531	8	701648	9	701650	10	701771																																																																																	
ID_ILOT																																																																																																										
0	117337																																																																																																									
1	117338																																																																																																									
2	117339																																																																																																									
3	117340																																																																																																									
4	117341																																																																																																									
5	117465																																																																																																									
6	414535																																																																																																									
7	701531																																																																																																									
8	701648																																																																																																									
9	701650																																																																																																									
10	701771																																																																																																									

Signification des codes de groupe de cultures

Les données fournies par l'ASP concernant les cultures déclarées sont regroupées en une nomenclature en 28 « groupes de cultures ». Le nom des cultures donné dans le Tableau 28 l'est à titre indicatif et non exhaustif. Des variations pouvant exister d'un département à l'autre quant au contenu exact d'un même groupe de cultures

Tableau 28 Signification des codes de groupe de cultures

Valeur	Libellé
0	PAS D'INFORMATION
1	BLE TENDRE
2	MAIS GRAIN ET ENSILAGE
3	ORGE
4	AUTRES CEREALES
5	COLZA
6	TOURNESOL
7	AUTRES OLEAGINEUX
8	PROTEAGINEUX
9	PLANTES A FIBRES
10	SEMENCES
11	GEL (SURFACES GELEES SANS PRODUCTION)
12	GEL INDUSTRIEL
13	AUTRES GELS
14	RIZ
15	LEGUMINEUSES A GRAINS
16	FOURRAGE
17	ESTIVES LANDES
18	PRAIRIES PERMANENTES
19	PRAIRIES TEMPORAIRES
20	VERGERS
21	VIGNES
22	FRUITS A COQUE
23	OLIVIERS
24	AUTRES CULTURES INDUSTRIELLES
25	LEGUMES-FLEURS
26	CANNE A SUCRE
27	ARBORICULTURE
28	DIVERS

Annexe 3

Répartition des cultures d'après le RPG pour la Guadeloupe, la Réunion et la Guyane et d'après Agreste pour Mayotte

Guadeloupe

Tableau 29 Répartition des cultures en Guadeloupe d'après le RPG

CODE GROUPE CULTURE	groupements cultures	cultures	superficie	%
	total		27261.13	100.0%
26	canne à sucre		12849.76	47.1%
18	prairies permanentes		6840.29	25.1%
28	divers		3174.67	11.6%
27	arboriculture	agrumes, banane, café, ananas	2524.22	9.3%
25	légumes-fleurs	pomme de terre, légumes de plein champ, maraîchage sous serre, fleurs	1334.7	4.9%
20	vergers		296.2	1.1%
19	prairies temporaires		135.14	0.5%
24	autres cultures industrielles		82.05	0.3%
13	autres gels		17.98	0.1%
16	fouillage		5.15	0.0%
7	autres oléagineux		0.97	0.0%

Réunion

Tableau 30 Répartition des cultures à la Réunion d'après le RPG

CODE GROUPE CULTURE	groupements cultures	superficie	%
	total	38082.64	100.0%
26	canne à sucre	22898.24	60.1%
18	prairies permanentes	9184.57	24.1%
28	divers	3049.24	8.0%
25	legumes-fleurs	1101.4	2.9%
20	vergers	637.37	1.7%
27	arboriculture	401.6	1.1%
24	autres cultures industrielles	347.97	0.9%
19	prairies temporaires	208.47	0.5%
16	fouillage	139.43	0.4%
17	estives landes	84.19	0.2%
2	Mais grain et ensilage	22.1	0.1%
21	vignes	7.81	0.0%
8	proteagineux	0.25	0.0%

Guyane

Tableau 31 Répartition des cultures en Guyane d'après le RPG

CODE_GROUPE_CULTURE	groupements cultures	superficie	%
	Total général	21143.24	100.0%
18	prairies permanentes	11101.44	52.5%
28	divers	4261.35	20.2%
13	autres gels	2346.64	11.1%
20	vergers	1447.64	6.8%
14	riz	995.61	4.7%
25	légumes-fleurs	340.09	1.6%
27	arboriculture	307.89	1.5%
16	fouillage	137.63	0.7%
17	estives landes	97.67	0.5%
26	canne à sucre	59.65	0.3%
19	prairies temporaires	39.47	0.2%
2	mais grain et ensilage	5.04	0.0%
4	autres céréales	2.7	0.0%
24	autres cultures industrielles	0.42	0.0%

Mayotte

Tableau 32 Répartition des cultures à Mayotte selon Agreste

culture	proportion de la SAU couverte par la culture
total	73.7
manioc	24.7
ambrevade	11.1
banane	35.5
ylang-ylang et vanille	2.4

Annexe 4

Pressions dues à l'exploitation de canne à sucre

Le CIRAD de La Réunion communique sur les pratiques phytosanitaires sur la canne à sucre depuis 2012 (Martin et Esther, 2013 ; Martin et al., 2012 ; Martin et al., 2013a, b, c). Le contenu de ces publications peut être résumé comme dans ce qui suit:

- La canne à sucre est attaquée par de nombreuses pestes, notamment des insectes et des maladies bactériennes ou fongiques. Cependant, grâce à un large recours à la résistance variétale contre les maladies et à la lutte biologique contre le ver blanc, aucun insecticide ni fongicide de synthèse n'est plus utilisé en culture cannière sur l'île de La Réunion (Côte et al., 2011, dans Martin et al., 2012). **En conséquence cette culture consomme peu de produits phytosanitaires, essentiellement des herbicides (Martin et al., 2012).**
- La gamme des substances actives (SA) herbicides et produits correspondants homologués a changé beaucoup de 2003 à 2012 (Martin et al., 2013a).
 - neuf SA impliquées dans neuf produits ont été retirés
 - neuf produits correspondant à huit SA ont été homologués
 - deux produits contenant 2,4-D ont été requalifiés à dose réduite
 En conséquence des changements fréquents de la gamme de produits et SA disponibles, les pratiques phytosanitaires sont constamment réadaptées et actualisées.
- Une estimation de l'indicateur de pression « IFT herbicides » (IFT = Indice de Fréquence de Traitements) a été faite pour les années 2009-2012 (Martin et al., 2012, Martin et al., 2013b).
- Des activités pour adapter les programmes d'application afin d'optimiser l'IFT dans le cadre du plan ECOPHYTO 2018 sont en cours, pour la canne à sucre (Martin et Esther, 2013) et aussi pour d'autres cultures (MAAF, 2011). Il faut bien noter que l'IFT est surtout un indicateur pédagogique (Martin et al., 2013b) et pas un indicateur de risque.
- Un programme de surveillance (monitoring) des pesticides existe à La Réunion depuis 1999 (Martin et al., 2013c). Les résultats de la première décennie de surveillance ont été compilés par le BRGM de La Réunion (BRGM, 2013 ; <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61477-FR.pdf>).

Il faut noter que les programmes d'application des pesticides sont variés du fait de la diversité des exploitations. Pour la canne de La Réunion, il existe de grandes exploitations gérées avec un bon suivi et de petites exploitations avec beaucoup d'inconnues.

Annexe 5

Cycle cultural de la banane

Lorsqu'il est mis en place, le plant de banane peut rester plusieurs années en terre. Les plants sur les parcelles sont généralement détruits au bout de quatre-cinq ans car les rendements diminuent. Il peut néanmoins arriver que des parcelles soient cultivées de manière pérenne. Les rendements diminuent pour différentes raisons. Une des principales raisons reste la perte de densité due à la chute de certains plants à cause du parasitisme IT2, 2011.

Si une bananeraie est détruite, elle peut être replantée le cycle suivant sur la même parcelle. Il est tout de même conseillé de réaliser une rotation et si possible d'insérer une jachère IT2, 2011. Deux types de cycle sont donc à distinguer dans une bananeraie, celui où la plantation est réalisée et les suivants.

Le premier cycle de culture d'un bananier est celui de la mise en place au champ des plants. Ces plants peuvent provenir de rejets (voir ci-dessous), de souches ou de culture in vitro. L'objectif principal de l'utilisation de culture in vitro est de disposer de plantes plus saines, en particulier indemnes de nématodes, de virus et de bactéries.

Une fois plantée, la tige centrale (qui est souvent confondue avec un tronc) va grossir. Au cours de sa croissance végétative, le bananier va émettre d'autres tiges depuis la base sous la forme de rejets latéraux. Ces rejets vont être coupés, cette pratique est appelée œilletonnage. Dans une bananeraie déjà établie, cette pratique permet de sélectionner les rejets les plus intéressants afin de maintenir un nombre constant de pieds productifs. De plus, elle permet de sélectionner les rejets les plus performants en évitant les phénomènes de concurrence. En cas de besoin, il est possible de réduire la densité, ou inversement l'augmenter IT2, 2011.

Dès l'émergence de l'inflorescence, commencent les soins aux régimes. Les feuilles susceptibles de gêner le développement du régime, ou risquant d'abimer les fruits par frottement, sont enlevées. Cette opération consiste à découper ou écarter les feuilles en contact avec l'inflorescence. Dans la mesure du possible, cette pratique est limitée au maximum afin de ne pas diminuer le potentiel photosynthétique du bananier.

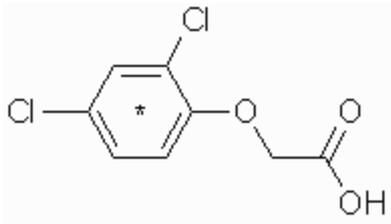
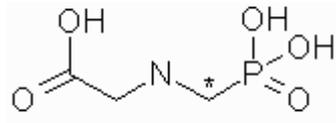
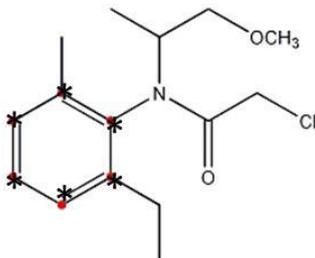
Durant la floraison, le bourgeon mâle et les dernières rangées de fleurs sont supprimés afin de privilégier la croissance des fleurs supérieures qui donneront les fruits. L'ensemble des fruits, appelé régime, est ensuite gainé à l'aide d'un film de polyéthylène pour être protégé.

Le marquage des régimes se fait également durant la floraison et permet les prévisions de récolte. En effet, les différents régimes arrivés à ce stade sont marqués d'une bande de couleur spécifique dans le but de connaître leur âge et de prévoir la date de récolte à un âge physiologique déterminé.

Les bananes sont récoltées en respectant le calendrier défini aux champs. Le but est que les bananes arrivent vertes et non mûres après leur transport, la maturation étant provoquée de manière artificielle en mûrisserie. Le stade de récolte sera donc fonction des délais et des conditions prévalant entre la coupe et l'entrée en mûrisserie.

Annexe 6

Formules structurales et voies de dégradation de quelques molécules d'intérêt

	<p>2.4D (<i>marqué uniformément sur le cycle</i>)</p> <p>Herbicide, acide phénoxyalcanoïque</p> <p>Numéro CAS : 94-75-7</p> <p>Formule brute : C₈H₆Cl₂O₃</p> <p>masse moléculaire (g mol⁻¹) : 221.04</p>
	<p>Glyphosate (<i>P-methylene -14C</i>)</p> <p>Herbicide, amino-phosphonate</p> <p>Numéro CAS : 1071-83-6</p> <p>Formule brute : C₃H₇NO₅P</p> <p>masse moléculaire (g mol⁻¹) : 168.07</p>
	<p>S-métolachlore (<i>marqué uniformément sur le cycle</i>)</p> <p>Herbicide, chloroacétanilide</p> <p>Numéro CAS : 87392-12-9 isomère S ; 178961-20-1 isomère R</p> <p>Formule brute : C₁₅H₂₂ClNO₂</p> <p>masse moléculaire (g mol⁻¹) : 283.8</p>

Formules structurales et caractéristiques générales des molécules étudiées (l'astérisque correspond à la position des carbones marqués)

Voies de dégradation pressentie

Dans la littérature, pour certaines molécules des voies de dégradation potentielle sont décrites. Un bref état de l'art est ici présenté.

Cas du 2,4-D

S'appuyant sur les travaux de Young et Oh (2006), Merini et al. (2007) propose le schéma suivant de dégradation biologique du 2.4D (Figure 28). Ces auteurs ont montré qu'après seulement 8 heures, une dégradation abiotique se produit mais qu'elle reste limitée, la dégradation biotique étant prédominante. Le métabolite 2,4-DCP est détecté dans les échantillons stériles et non stériles mais seulement jusque 7 jours suggérant sa dégradation en d'autres métabolites par ces mêmes auteurs.

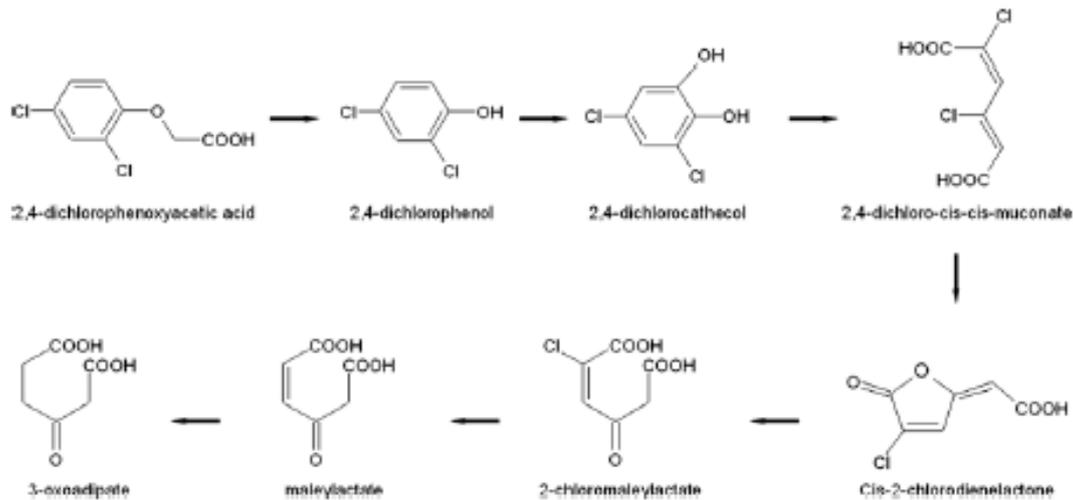


Figure 28 : Voies de dégradation biologique du 2.4D cité dans Merini et al. (2007)

Cas du glyphosate

Dans le cas du glyphosate, seule les voies de dégradation biotique sont décrites (Borggaard et Gimsing, 2008). Une seule voie va conduire à la production de sarcosine et glycine alors que la deuxième voie de dégradation conduit à la formation d'AMPA.

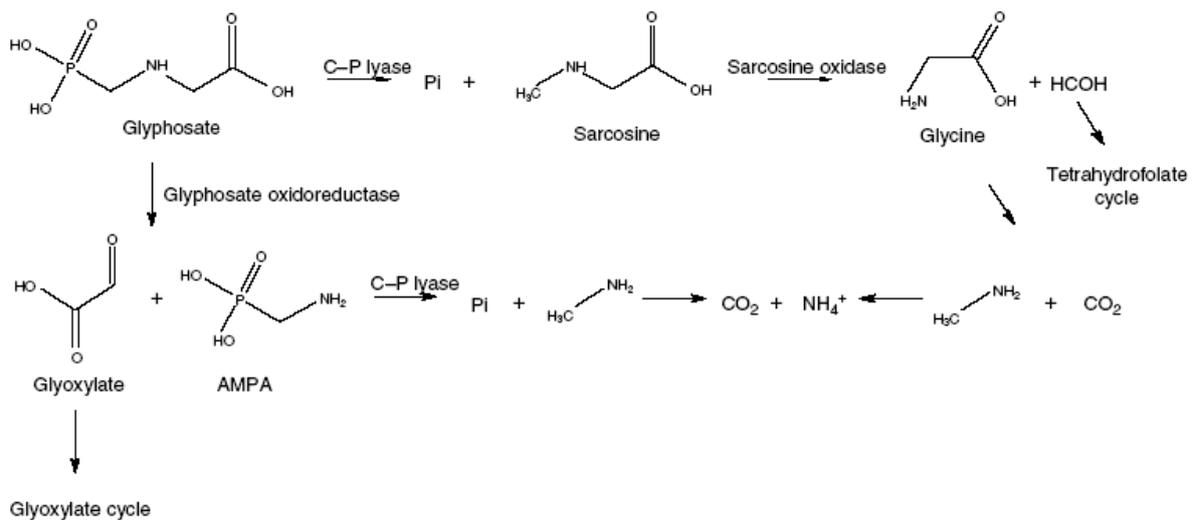


Figure 29 : Voies de dégradation biotique du glyphosate, cité dans Borggaard et Gimsing (2008)

Cas du S-métolachlore

Dans la littérature scientifique, aucun schéma présentant les voies de dégradation biotique de cette substance n'a pu être trouvé.

Annexe 7

GUS des molécules étudiées en fonction des différents types de sol

	Molécule	Koc	DT50	GUS
Andosol	2,4-D	260.638163	26.9933333	2.14
Ferrisol	2,4-D	150.702179	61.245	3.22
Nitisol	2,4-D	177.469419	9.38	1.70
Sol peu évolué sur cendres	2,4-D	133.067535	15.17	2.22
Vertisol	2,4-D	143.81363	15.4	2.19
Andosol	Chlordécone	2668	600	1.59
Ferrisol	Chlordécone	3700	600	1.20
Nitisol	Chlordécone	2539	600	1.65
Sol peu évolué sur cendres	Chlordécone	5476	600	0.73
Vertisol	Chlordécone	5005	600	0.84
Andosol	Diuron	723.666667	45.9555556	2.21
Ferrisol	Diuron	334.5	34.9666667	2.20
Nitisol	Diuron	273	100	3.13
Sol peu évolué sur cendres	Diuron	709	36	1.79
Vertisol	Diuron	1076	43.2	1.58
Andosol	Glyphosate	6332.25204	24.2455098	0.29
Ferrisol	Glyphosate	13092.6348	13.9588005	-0.13
Nitisol	Glyphosate	5742.14807	12.2390253	0.26
Sol peu évolué sur cendres	Glyphosate	13323.1079	8.12574001	-0.11
Vertisol	Glyphosate	9099.76197	20.7364813	0.05
Andosol	Oxamyl	4.06659908	11.2867383	3.44
Ferrisol	Oxamyl	2.2439146	16.7368774	4.40
Nitisol	Oxamyl	1.98592693	31.6555618	5.55
Sol peu évolué sur cendres	Oxamyl	3.26926072	5.32779872	2.53
Vertisol	Oxamyl	3.42493616	16.4441571	4.21
Andosol	Propiconazole	858	52.4111111	1.88
Ferrisol	Propiconazole	929	42	1.68
Nitisol	Propiconazole	506	53.5	2.24
Sol peu évolué sur cendres	Propiconazole	1503	72.8	1.53
Vertisol	Propiconazole	2276	44.8	1.06
Andosol	S-métolachlore	144.666667	75.8666667	3.48
Ferrisol	S-métolachlore	157	53.0166667	3.11
Nitisol	S-métolachlore	104	47.9666667	3.33
Sol peu évolué sur cendres	S-métolachlore	314	76	2.83
Vertisol	S-métolachlore	439	55.5	2.37

Annexe 8

Age de l'eau : méthode

Mesure de la concentration en radio-isotope associé au temps de demi vie, évolution de la teneur

La datation au tritium (^3H), qui est un radio-isotope, marqueur de masse d'eau contemporaine, permettant de dater des eaux jusqu'à 1952 environ. Le tritium est produit dans l'atmosphère entre 1952 et 1963 lors des essais thermonucléaires aériens. On peut donc distinguer les eaux souterraines possédant des eaux de précipitations sans tritium (antérieures à 1952) de celles rechargées par des précipitations ayant été en contact avec le tritium dans l'atmosphère (postérieures à 1952). Cependant, la faiblesse du signal actuel de tritium dans les eaux de pluie entre 0,5 et 2 UT (unité tritium, mesuré à Miami) limite l'utilisation de ce traceur d'âge dans les DOM.

Mesure de la concentration en gaz dissous dans l'eau, calcul de la concentration atmosphérique à l'aide de la loi d'Henry

Les méthodes de datation aux CFCs et SF_6 (IAEA 2006) consiste en la mesure de gaz dissous (aux origines principalement anthropiques) dans les eaux. Les traceurs gazeux SF_6 et CFC présent dans l'atmosphère se diffusent dans la zone non saturée avant de pénétrer dans les eaux souterraines sous la forme de gaz dissous selon la loi d'Henry. Il suffit ensuite pour dater la période de recharge de la nappe (période à laquelle les eaux étaient en contact avec les gaz présents dans l'atmosphère) de comparer les teneurs en traceurs dans les eaux, au chroniques des teneurs dans l'atmosphère de ces deux gaz.

La datation aux CFC, qui sont des composés halogénés, CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (dichlorodifluorométhane) et CFC-13 (trichlorotrifluoroéthane), aussi nommés fréons. Ils contaminent l'atmosphère et ne proviennent que d'activité anthropiques ; ils sont utilisés comme gaz réfrigérants, propulseur, solvants, et agents d'expansion dans les mousses de matière plastiques. Cette méthode permet de dater les eaux jeunes postérieures à 1970 puisque le suivi des concentrations atmosphériques en CFC a eu lieu à partir de cette période. Depuis 2000, la mise sur le marché de CFC est interdite, et les dispositifs en contenant doivent impérativement être récupérés et détruits. Les concentrations sont globalement en baisse, mais le démantèlement des produits contenant des CFC entraîne encore une diffusion atmosphérique du gaz.

La datation au SF_6 , hexafluorure de soufre est une autre datation possible. Il s'agit d'un gaz à l'origine anthropique à 99%. Il est produit depuis 1953 et utilisé pour ses capacités isolantes pour réaliser des doubles vitrages notamment. Son utilisation n'est pas interdite, mais le protocole de Kyoto de 1997 le reconnaît comme gaz à effet de serre et recommande d'en réduire l'émission. La teneur en SF_6 dans l'atmosphère est donc suivie, ce qui nous permet de dater les eaux souterraines par comparaison avec ces chroniques.

Modèle de circulation des eaux et détermination de l'âge des eaux

L'âge d'une eau souterraine ne peut être obtenu exactement, car une eau souterraine se compose la plupart du temps d'un mélange de plusieurs eaux de surface d'âge différent. Une estimation de la répartition des âges des eaux est réalisée, en relation avec un modèle conceptuel de circulation de l'eau ; piston, exponentielle ou mélange binaire (Maloszewski and Zuber, 1982) afin d'estimer au mieux le pourcentage des eaux souterraines d'un certain âge présentes.

- **Le modèle piston (P)** se base sur l'hypothèse d'un déplacement du fluide suivant un modèle convectif. Le temps de séjour n'est pas distribué dans la nappe, il est linéaire depuis la zone de la recharge jusqu'à la zone de prélèvement, il n'y a pas de mélange dans la nappe et la

vitesse des eaux est homogène. Il permet de donner un âge apparent unique aux eaux souterraines, sans que le temps de séjour ne soit distribué dans la nappe. Ce modèle est le plus simple de ceux proposés (figure 1).

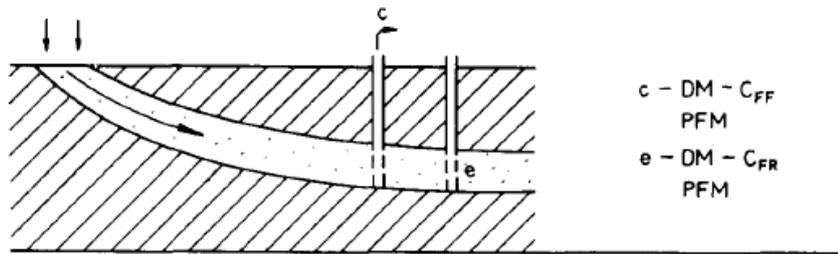


Figure 1 : Modèle piston selon Maloszewski and Zuber (1982)

- **Le modèle exponentiel (EM)**, qui attribue à la distribution des temps de séjour de l'eau dans les nappes souterraines une forme exponentielle décroissante. Le modèle exponentiel correspond à la distribution des temps de séjours dans la nappe ayant été obtenue par un bilan de masse, dans le cas théorique d'un réacteur discontinu à mélange parfait. Dans le cadre d'une étude sur un aquifère, on interprète ce modèle comme la résultante sur une verticale de plusieurs lignes d'écoulements d'âges différents, plus récents sur les lignes d'écoulements supérieur correspondant à une recharge plus récente (figure 2). Ce modèle correspond au résultat du mélange d'eau causé par une dispersion hydrodynamique des eaux dans le système.

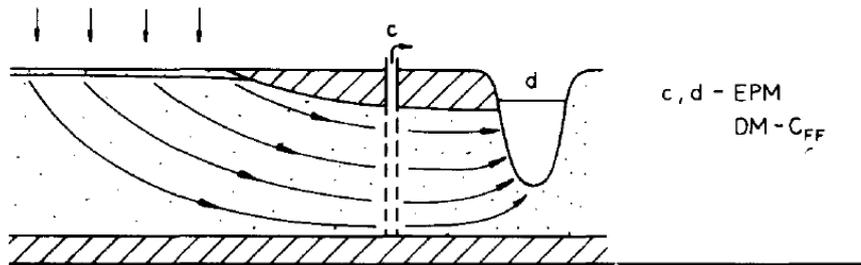


Figure 2 : Modèle exponentiel selon Maloszewski and Zuber (1982)

- **Le modèle de mélange binaire (BM)** est le troisième type de mélange simple qui puisse être utilisé. L'eau souterraine est formée par un mélange de deux eaux d'âges différents. L'âge sera donné par un pourcentage d'eau ancienne, antérieur au traceur utilisé et un pourcentage d'eau jeune, entrant dans la gamme de mesure des traceurs en solution.

Incertitude sur l'estimation des âges de l'eau

La contamination de l'air ambiant.

Dans les conditions de prélèvement de terrain, malgré que l'échantillonnage se fasse sous eau, il existe un risque de contamination de l'échantillon à l'air ambiant, qui augmenterait sa teneur en gaz dissous, plus forte dans l'atmosphère que dans une eau plus ou moins ancienne.

La contamination locale de l'atmosphère.

Il peut exister une contamination locale en gaz, du fait de l'existence de décharge sauvage, contenant des appareils électroménagers susceptibles de dégager des gaz CFC ou SF6 dans

l'atmosphère ou dans les eaux qui alimente la nappe ou d'appareil non démantelé fonctionnant encore avec ses gaz et en rejetant localement en zone urbaine.

Épaisseur de la ZNS (zone non saturée)

L'épaisseur de la zone non saturée, si elle est supérieure à 10 mètres ne correspond pas exactement à celle de l'atmosphère, on aura alors une surestimation de l'âge des eaux de 1 à 2 ans pour une valeur proche de 10 mètres. En revanche, pour une ZNS, d'épaisseur inférieure à 10 mètres, la concentration en traceurs dissous dans les eaux sera représentative de la teneur de ces gaz dans l'atmosphère.

L'altitude et la température de la zone de recharge

Il est nécessaire de prendre en compte la température de la recharge (température d'équilibre air-air, lorsque l'échantillon d'eau était isolé de l'atmosphère) pour le calcul de la teneur en CFC initiale dans l'atmosphère (IAEA 2006). On estime cette température à l'aide la température moyenne de l'eau au cours du prélèvement ou dans le cas d'une ZNS épaisse de la température annuelle moyenne de l'air.

En ce qui concerne l'altitude, une surestimation de l'altitude moyenne à la recharge est corrélée à une diminution de la température moyenne estimée de la zone de recharge.

Ces deux paramètres influent sur le calcul de l'incertitude, et doivent être pris en compte.

L'excès d'air

L'excès d'air correspond à une teneur en gaz dissous dans l'aquifère qui sera supérieure à celle attendue, le traceur SF₆ y est particulièrement sensible. Dans le cas du traceur CFC-11, ce phénomène est négligeable au vu de la grande solubilité de ce traceur.

L'effet de sorption

Le phénomène de sorption dépend du milieu, il a principalement lieu dans les milieux dont les teneurs en carbone organique dissous sont fortes, et il y a sorption principalement pour le CFC.

La dégradation microbienne des traceurs

En milieu anaérobie, la dégradation microbienne affecte la concentration en CFC, particulièrement en CFC-11, il reste cependant possible de dater les eaux dans ces milieux en se basant sur les teneurs en CFC-12 et SF₆ dissous.

Annexe 9

Age de l'eau : compilation de données de Martinique

Dans le cadre d'études menées sur la qualité des eaux en Martinique et particulièrement sur la contamination des eaux souterraines par des produits phytosanitaires (notamment chlordécone) et par le nitrate. Plusieurs estimations de l'âge des eaux ont été réalisées sur différents bassins versants à partir des méthodes présentées plus haut. Les modèles pistons, exponentielles ou mélanges binaires donnent des estimations d'âges différents en fonction des sites de prélèvements (voir les tableaux ci-dessous).

Estimation de l'âge des eaux

Dans un premier temps les données associées à la campagne de mesure de la contamination en chlordécone dans les eaux souterraines et de surface en étiage (Charlier J.-B., et al. 2014) seront traitées. Lors de cette campagne, ont été notamment réalisé des mesures sur la teneur en traceurs CFC et SF6 présentes dans les eaux permettant une estimation de l'âge des eaux souterraines en Martinique et en Guadeloupe.

Dans le bassin associé à la rivière Galion, le piézomètre localisé à source Bassignac 3, présente des âges très différents pour les mesures qui ont été réalisé en avril 2013 et en avril 2014. En 2013, les eaux sont estimées datées d'un an avec un an d'incertitude de mesure. Elles sont donc particulièrement jeunes. En 2014, les eaux ont un âge calculé à l'aide du modèle exponentiel de l'ordre de 22 ans avec 6 années d'incertitude de mesure. On explique cette distinction par les très fortes précipitations ayant eu lieu peu de temps avant le prélèvement d'avril 2013, qui se sont infiltrés dans le système et ont par leur excès rajeuni momentanément et probablement localement les eaux. Ainsi après une heure de pompage pour Bassignac ($T_0=1h$), l'âge des eaux mesuré reste à 22 ans en 2014.

De même pour la source « Malgré tout » les mesures obtenues en 2013 et 2014 divergent. En avril 2013 les mesures indiqués un âge estimé de 15 ans avec une incertitude de 4 ans, alors qu'en mars 2014 les données indiquent une eau datée de 2008 +/- 4 ans.

Enfin, certaines données apparaissent avec la mention « non exploitable », cette mention signifie que l'incertitude de mesure est trop élevée dans le cas des piézomètres 3 et 5 de la sucrerie. En effet, la mesure de la teneur en CFC de ceux-ci est très faible tandis que les teneurs en SF6 sont élevés. L'hypothèse de l'existence d'un processus de dégradation bactérienne en milieu anoxique affectant uniquement les concentrations en CFC dissous dans l'eau est émise. De plus, les valeurs en dioxygène dissous très faible (<0.6 mg/l) mesurées étayent cette hypothèse. L'existence d'un phénomène de dégradation d'un traceur au moins, associé à un milieu anoxique en absence d'excès d'air, limite la précision de l'âge estimé sur ce site. La datation de la recharge entre 2004 et 2005 est donnée à titre indicatif, ici.

Dans le cas du forage de la Borelli, les teneurs en traceurs CFC et SF6 mesurés sont très faibles. On émet l'hypothèse d'un mélange d'eau jeune et ancienne, d'âge supérieur à 200 ans (et donc ne comportant pas ces traceurs récents) selon le modèle exponentiel avec une incertitude de 50 ans. Le modèle mélange binaire propose une eau ancienne (antérieur à 1930) mélangé à 10% d'une eau récente daté de 2000 +/- 5 ans. Le modèle piston quant à lui suggère une recharge aux années 1970. La faiblesse des teneurs en traceur mesuré ne permet donc pas de conclure.

Toutes les autres valeurs récapitulées au sein du tableau ci-dessous sont exploitables

Bassin	Localisation	Code BSS	Date	Age calculé	P	EM	BM	Incertitude
Galion	piézomètre Trinité-Galion		15/04/2013			25		5
Galion	Source malgré tout		16/04/2013			15		4
Galion	Piezo 5 - sucrerie		17/04/2013	2004 ou 2005				Non exploitable
Galion	Piezo 3 - sucrerie		17/04/2013	2004 ou 2005				Non exploitable
Galion	source Bobak		17/04/2013	1998 à 2000				
Galion	source bassignac		18/04/2013			12		3
Galion	source bassignac 2		18/04/2013	2012				
Galion	source bassignac 3		18/04/2013	2012				1
Galion	source st laurent		18/04/2013	2010				
Galion	forage la Borelli		19/04/2013	ante 1970				Non exploitable
Galion	Source Capitaine		19/04/2013		2000			1
Galion	source Isaïe		19/04/2013	2009				2
Galion	Source Iagrosillière		19/04/2013	2006				1
Galion	Malgré tout MTF1-A(t=1h)		27/03/2014		2008			4
Galion	Malgré tout MTF1-B(t=5h)		27/03/2014		2008			4
Galion	Source bassignac 3		01/04/2014			22		6
Galion	forage Bassignac BF1-A(t=1h)		01/04/2014			22		6
Galion	MVF1-B(t=5h)		08/04/2014	2009				1

Récapitulatif des âges calculés sur différents points en Martinique (campagne 2013-2014)

Dans le cadre de l'étude du transfert de chlordécone vers les eaux souterraines en Martinique, réalisé sur le site de chez Lélène et du Chalvet, (2013) l'âge des eaux est estimé sur les deux sites. Les traceurs CFC-12 et CFC-113 seulement sont utilisés car des décharges sauvages contaminent en CFC-11 et SF6 les eaux. Les mesures sont réalisées sur une période allant de Janvier 2011 à Mai 2012 au site de « chez Lélène » et de Janvier 2007 à Janvier 2012 au « Chalvet ». Les variations saisonnières des teneurs en traceurs sont inférieures à l'incertitude analytique existant sur leurs teneurs. Le modèle retenu pour la circulation des eaux souterraines et le modèle piston.

L'étude estime un âge compris entre 5 et 8 ans en se basant sur de nouvelles méthodes de calcul considérées comme plus robustes. Ainsi, alors que le rapport annuel par Arnaud et al. (2011) indiquait plutôt un âge de l'eau compris entre 10 et 20 ans sur le site Chalvet, l'âge estimé en 2013 est de l'ordre de 5 à 8 ans (tableau 2). Ceci se voit confirmé par une contamination des eaux par des produits phytosanitaires d'utilisation récente (métalaxyl, S-métachlore, propiconazole, diuron).

Lieu dit	Code BSS	Date	Mélange Piston	Âge estimé
Chalvet	1166ZZ0026	17/04/2007	2003	5-8 ans
Chalvet	1166ZZ0026	17/04/2007	1990	
Chalvet	1166ZZ0026	11/12/2008	2008	
Chalvet	1166ZZ0026	26/01/2009	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	19/03/2009	1996	
Chalvet	1166ZZ0026	30/04/2009	1996	
Chalvet	1166ZZ0026	07/05/2009	1999	
Chalvet	1166ZZ0026	04/06/2009	1991	
Chalvet	1166ZZ0026	02/07/2009	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	06/08/2009	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	08/10/2009	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	03/12/2009	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	07/01/2010	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	25/02/2010	1997	
Chalvet	1166ZZ0026	12/04/2010	1991	
Chalvet	1166ZZ0026	20/05/2010	1991	
Chalvet	1166ZZ0026	17/06/2010	1991	
Chalvet	1166ZZ0026	19/07/2010	1992	
Chalvet	1166ZZ0026	16/08/2010	1993	
Chalvet	1166ZZ0026	20/09/2010	1992	
Chalvet	1166ZZ0026	18/10/2010	1991	
Chalvet	1166ZZ0026	21/03/2011	2001	
Chalvet	1166ZZ0026	15/04/2011	2008	
Chalvet	1166ZZ0026	23/05/2011	2008	
Chalvet	1166ZZ0026	20/06/2011	2003	
Chalvet	1166ZZ0026	19/07/2011	2008	
Chalvet	1166ZZ0026	22/08/2011	2004	
Chalvet	1166ZZ0026	19/09/2011	2000	
Chalvet	1166ZZ0026	17/10/2011	2007	
Chalvet	1166ZZ0026	14/11/2011	2007	
Chalvet	1166ZZ0026	12/12/2011	2003	
Chalvet	1166ZZ0026	17/01/2012	2007	
Chez Ielene	1168ZZ0054	11/04/2011	2007	
Chez Ielene	1168ZZ0054	20/06/2011	2005	
Chez Ielene	1168ZZ0054	19/07/2011	2009	
Chez Ielene	1168ZZ0054	22/08/2011	2007	
Chez Ielene	1168ZZ0054	19/09/2011	2007	
Chez Ielene	1168ZZ0054	17/10/2011	2007	
Chez Ielene	1168ZZ0054	14/11/2011	2004	
Chez Ielene	1168ZZ0054	12/12/2011	2008	
Chez Ielene	1168ZZ0054	17/01/2012	2008	
Chez Ielene	1168ZZ0054	13/02/2012	2008	
Chez Lélène	1168ZZ0054	17/04/2007	1991	

Récapitulatif des âges calculés sur différents points en Martinique (campagnes 2007 à 2012) dans le cadre de l'estimation du transfert du chlordécone dans les eaux.

Annexe 10

Analyse statistique sur les concentrations en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines en Martinique

Étiquette	déecté	non_impac t	impacté_ e	CdEuMasse D	NomMasseDE	SurfaceTo t
1173ZZ0065/S	0,1%	99,9%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0037/F1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0055/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0047/S	0,8%	99,0%	0,2%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0046/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0051/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0044/ABF2	0,9%	98,7%	0,4%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0049/S	0,2%	99,8%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0043/MBF 1	0,5%	99,2%	0,3%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0048/AEP	0,2%	99,7%	0,1%	FRJG201	Domaine Nord	114
1168ZZ0054/PZ	4,4%	93,0%	2,6%	FRJG201	Domaine Nord	114
1166ZZ0020/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1166ZZ0032/S	2,5%	95,3%	2,2%	FRJG201	Domaine Nord	114
1166ZZ0019/S	1,9%	96,2%	1,9%	FRJG201	Domaine Nord	114
1166ZZ0026/NF8	5,4%	91,6%	3,0%	FRJG201	Domaine Nord	114
1166ZZ0023/S	1,6%	96,3%	2,1%	FRJG201	Domaine Nord	114
1175ZZ0154/NF4	0,0%	99,6%	0,4%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1174ZZ0088/PZ	0,6%	98,9%	0,5%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1175ZZ0190/BF1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1175ZZ0153/S	1,6%	97,5%	0,9%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1169ZZ0006/F	0,8%	98,1%	1,1%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1169ZZ0184/F2	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1169ZZ0084/NF7	1,1%	97,2%	1,7%	FRJG202	Domaine Nord Atlantique	177
1177ZZ0078/CNS1	4,5%	95,5%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1177ZZ0165/CNF2	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1177ZZ0161/FLF1	0,0%	99,8%	0,2%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1177ZZ0177/PZ2	0,5%	99,5%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1177ZZ0173/PZ	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1172ZZ0063/SD6	0,7%	99,1%	0,1%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1173ZZ0068/S	0,1%	99,9%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179

1173ZZ0062/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1167ZZ0045/NF6	0,9%	98,8%	0,3%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1167ZZ0031/SPF1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1167ZZ0042/F1BIS	0,1%	99,9%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1167ZZ0023/RBS1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1168ZZ0053/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1167ZZ0037/AV1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1168ZZ0050/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1168ZZ0052/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1167ZZ0024/PRS1	0,5%	99,5%	0,1%	FRJG203	Domaine Nord Caraïbe	179
1182ZZ0160/F2	0,6%	99,1%	0,3%	FRJG204	Domaine Centre	279
1183ZZ0053/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1179ZZ0157/CR-S2	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1178ZZ1711/AM2	2,5%	97,5%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1179ZZ0282/S	0,5%	99,5%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1179ZZ0202/OFO6	1,5%	98,5%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1179ZZ0070/2F02	1,0%	98,5%	0,5%	FRJG204	Domaine Centre	279
1178ZZ2018/S	2,5%	97,5%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1179ZZ0158/PR-S1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1174ZZ0087/PZ	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1175ZZ0106/F	1,1%	97,6%	1,3%	FRJG204	Domaine Centre	279
1173ZZ0072/SP2	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1174ZZ0089/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1173ZZ0127/AEP	0,1%	99,9%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1173ZZ0076/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG204	Domaine Centre	279
1186ZZ0119/CMF1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG205	Domaine Sud Atlantique	182
1186ZZ0118/SMA4	0,2%	99,6%	0,2%	FRJG205	Domaine Sud Atlantique	182
1183ZZ0026/S1	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG205	Domaine Sud Atlantique	182
1179ZZ0228/S11	1,7%	97,5%	0,8%	FRJG205	Domaine Sud Atlantique	182
1179ZZ0299/NF2	0,0%	99,1%	0,9%	FRJG205	Domaine Sud Atlantique	182

1185ZZ0120/PZ	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151
1184ZZ0016/DF2	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151
1184ZZ0001/S1	0,8%	98,7%	0,5%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151
1185ZZ0121/S	0,0%	100,0%	0,0%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151
1181ZZ0131/PZ	0,0%	80,0%	20,0%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151
1183ZZ0052/PZ	0,7%	98,7%	0,7%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151
1181ZZ0132/PZ	0,3%	99,4%	0,3%	FRJG206	Domaine Sud Caraïbe	151



Centre scientifique et technique
Direction XXXXXXXXXXXX (en entier et en minuscules)
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr