



HAL
open science

Outils et méthodes pour une politique territoriale de gestion raisonnée des pratiques agricoles : cas d'application dans la région de la Béqaa au Liban.

Farah Kanj

► **To cite this version:**

Farah Kanj. Outils et méthodes pour une politique territoriale de gestion raisonnée des pratiques agricoles : cas d'application dans la région de la Béqaa au Liban.. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2018. Français. NNT : 2018MON30019 . tel-01983155

HAL Id: tel-01983155

<https://theses.hal.science/tel-01983155>

Submitted on 16 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par **Université Paul-Valéry Montpellier 3**

Préparée au sein de l'école doctorale 60
Et de l'unité de recherche UMR GRED

Spécialité : **Géographie et Aménagement de
l'espace**

Présentée par **Mme Farah Kanj**

**Outils et méthodes pour une politique territoriale de
gestion raisonnée des pratiques agricoles : cas
d'application dans la région de la Béqaa au Liban**

Soutenue le 6 juillet devant le jury composé de

| | |
|---|-------------------------------|
| M. Jean-Paul Bord, Professeur de géographie, Université Paul-Valéry Montpellier 3 | Directeur de thèse |
| Michael Davie, Professeur de géographie, Université François Rabelais de Tours | Rapporteur |
| Nadine Nassif, Professeur en Sciences environnementales et droit de l'environnement, Faculté d'Agronomie, Département d'Environnement, Beyrouth, Liban | Rapporteur |
| M. Salem Darwich, Professeur en agro-économie, Faculté d'agronomie, Beyrouth (Liban) | Examineur |
| M. Philippe Le Grusse, Enseignant-chercheur, Administrateur scientifique principal, CIHEAM-IAM Montpellier, Sciences de gestion, Développement Agricole | Examineur |
| Mme Mélanie Requier-Desjardins, Enseignante-Chercheure, Administrateur scientifique CIHEAM-IAM Montpellier, Sciences Économiques et de Gestion | Examineur |
| Mme Marjorie Le Bars, Chargée de Recherche, Modélisation des Systèmes Complexes, Institut de Recherche pour le Développement (IRD) | Examineur |
| Mme Élisabeth Mandart, Professeur associé, CIHEAM-IAM Montpellier, Biologiste spécialisée en Génétique, Biochimie, Biologie cellulaire et Microbiologie | Examineur |



REMERCIEMENT

C'est avec grand plaisir que j'exprime à travers ces lignes mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont dirigé, soutenu, aidé à accomplir et achever mon modeste travail grâce à leurs encouragements si précieux, en particulier :

M. Jean-Paul BORD, mon directeur de thèse qui n'a cessé d'alimenter ma réflexion tout au long de ces années de travail et qui a contribué de très près, avec ses suggestions et ses conseils, à l'élaboration de toutes les parties de ce document. C'est grâce à sa présence et à son entière disponibilité que j'ai pu mener mon travail à terme, qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

M. Philippe LE GRUSSE, pour avoir initié ce travail et pour son encadrement, sa patience et son sérieux qui ont permis l'aboutissement de ce travail de recherche. Je tiens à les remercier vivement.

M. Salem DARWICH, pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui.

Mme Nadine NASSIF et M. Michael F. DAVIE, en acceptant d'évaluer mon travail et de faire partie du jury, m'ont procuré beaucoup de fierté et d'honneur. Je tiens à les remercier vivement.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Doyen de la Faculté d'Agronomie, Université Libanaise *Professeur Samir MEDAWAR* qui m'a beaucoup encouragé et soutenu dans mon travail.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ma thèse et d'assister à ma soutenance : *Mme Marjorie LE BARS, Mme Élisabeth MANDART, Mme Mélanie REQUIER-DESJARDINS*.

Un grand remerciement aux équipes de recherche du CIHEAM-IAMM, surtout *M. Hatem BELHOUCLETTE* pour avoir cru en moi en m'accueillant au laboratoire d'Accueil Méditerranéen en Economie et Science Sociale (LAMES), et de l'UMR GRED (UPVM/IRD).

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur *Omar BESSAOUD* pour son soutien scientifique et moral, Madame *Tahani ABDELHAKIM*, pour ses suggestions utiles, ses conseils judicieux et son amitié et Madame *Anne COBACHO*, pour son soutien et son amitié.

Je remercie également Monsieur Oussama *MIGHRIBI* pour ses conseils qui m'ont aidé à finaliser ce travail.

Je tiens à exprimer mes reconnaissances aux personnes suivantes :

Monsieur Imad NAHAL et Madame Lama HAIDAR du Ministère de l'Agriculture Libanais pour les informations utiles sur la filière des pesticides au Liban.

Dr. Ghaleb FAOUR, Directeur du Centre National de Télédétection, CNRS, Liban pour les données cartographiques mises à disposition pour l'élaboration des cartes thématiques de notre recherche.

Dr. Ihab JOMAA, chef de département d'irrigation et de météorologie à l'Institut de Recherche Agronomique Libanais (IRAL) pour les données climatiques qui ont été mises à notre disposition pour achever notre travail.

L'ingénieur *Salim MAALOUF*, chef de centre agricole de Zahlé pour les données statistiques agricoles de la Béqaa Centrale.

Les ingénieurs *Amal SALIBI et Rima HAJJAR* du Ministère de l'Agriculture Libanais pour les données statistiques du secteur agricole libanais.

J'associe à ces remerciements le personnel de l'IAMM notamment le service informatique et le centre de documentation. Merci Mapie, Yves, Marie-Noëlle, Rafaele, Dominique, Marie Hélène, Isabelle, Zoubida et Laure.

Je remercie mon cher fiancé Hussein YAZBECK pour son soutien, sa patience, son aide et son bonne humeur. Il était la lumière de mon chemin de réussite.

Ma gratitude s'adresse aussi aux agriculteurs de la Beqaa Centrale pour leur chaleureux accueil.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Un grand merci à ma famille pour leur aide et leur soutien.

Encore MERCI !!!!!

RÉSUMÉ

Les pratiques d'intensification résultant des politiques de modernisation mises en œuvre dans les pays du Nord et du Sud de la Méditerranée entraînent souvent des consommations excessives d'engrais et de produits phytosanitaires (PP) qui exercent un impact négatif, à la fois sur l'environnement - pollution diffuse des eaux et du sol - et sur la santé des agriculteurs et des populations. Ces pratiques agricoles posent aujourd'hui la question de la durabilité de ces modes de production et de consommation alimentaires.

Ce travail de recherche qui est à la jonction de deux disciplines – la science agronomique et la géographie - analyse l'impact d'utilisation des PP sur la qualité du sol et les eaux souterraines. Pour répondre à cet objectif de recherche assigné, nous avons mobilisé la conception de la modélisation de la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. Ce travail consiste à mettre en œuvre un outil d'aide à la décision dédiée aux intervenants au niveau de notre territoire d'étude – le caza de Zahlé (Liban). Cette étude se fonde sur l'utilisation de plusieurs outils: SIG, analyse statistique et modèle d'évaluation des risques de devenir des PP dans l'environnement (PEARL) en introduisant l'indicateur de fréquence de traitement.

Les résultats de l'analyse nous a permis d'identifier les zones à forte pression phytosanitaire, qui sont les communes situées sur la plaine du caza (Hoch Ghanam, Bar Elias, Ferzol, Terbol, Ablah, Anjar, Quab Elias), les cultures les plus consommatrices des PP (vigne, pomme, cerise, pomme de terre et blé) et les substances les plus utilisées au niveau du territoire étudié (alfa cyperméthrin, diméthoate, flutriafol, oxychlorure de cuivre, hydroxyde de cuivre, methomyl, chlorpyrifos-ethyl, glyphosate, lambda cyhalothrin et proquinazid). Elle nous a également permis d'évaluer la qualité des eaux souterraines en se basant sur la prédiction des concentrations des matières actives lixiviées au niveau de notre zone d'étude. Quatre matières actives ont été retenues comme des substances qui lixivient le plus pour atteindre les eaux souterraines : méthomyl, flutriafol, chlorpyrifos-ethyl et alfa cyperméthrin. Nos résultats de prévision des concentrations de ces pesticides sur une année nous a permis d'identifier les zones vulnérables en termes de risque de contaminations. Les zones cultivées de vigne sur les sols sableux et argile sableux sont sensible sur la matière active chlorpyrifos-ethyl ($> 0.1\mu\text{g/l}$), flutriafol ($>1\mu\text{g/l}$) et méthomyl ($>1\mu\text{g/l}$). Les zones cultivées de pomme de terre sur les sols sableux et argile sableux sont sensible sur la matière active alfa cyperméthrin ($> 1\mu\text{g/l}$) et methomyl ($>1\mu\text{g/l}$). Les zones cultivées de pomme sur les sols sableux sont sensibles sur la matière actives flutriafol avec une concentration entre 0.1 et $1\mu\text{g/l}$.

Mots clés: Pollution diffuse, territoire, modélisation, PEARL, sol, eaux souterraines, pratiques agricoles.

ABSTRACT

Intensification of agricultural practices resulting from modernized policies implemented in countries of North and South Mediterranean often lead to excessive use of fertilizers and Phytosanitary Products (PP). These have a negative impact on both the environment, through the leaching of pollutants to water and soil, and on the health of farmers and the population at large. This is why these agricultural practices now pose the question of the sustainability of these methods of production and food consumption.

This interdisciplinary research work, which links both agronomy and geography, analyzes the impact of using PPs on the quality of soil and groundwater. To meet the identified objective of the research, we mobilized the concept of modeling the management of pollution diffused from agricultural origins. This work consists of implementing a decision support tool dedicated to stakeholders in the study area – the caza of Zahlé in Lebanon. This study was based on the use of several tools: GIS, statistical analysis and risk assessment model of PP leaching in the environment (PEARL) by introducing an indicator of frequency of treatment. The results of the analysis allowed us to identify areas of high phytosanitary pressure, which are the communes located on the plain of the caza (Hoch Ghanam, Bar Elias, Ferzol, Terbol, Ablah, Anjar, Quab Elias), crops most consuming PP (vine, apple, cherry, potato and wheat) and the most used substances in the study area (alfa cypermethrin, dimethoate, flutriafol, copper oxychloride, copper hydroxide, methomyl, ethyl-chlorpyrifos, glyphosate, lamda cyhalothrin and proquinazid). Results also allowed for the evaluation of the quality of groundwater based on the predictions of the concentrations of active ingredients leached at the level of the study area. Four active ingredients were identified as the most leached to groundwater: methomyl, flutriafol, ethyl-chlorpyrifos and alfa cypermethrin. Our results of forecasting the concentrations of these pesticides annually allowed us to identify vulnerable zones in terms of a risk of contamination. The areas cultivated with vines on sandy and sandy clay soils were found to be sensitive to the active ingredient ethyl-chlorpyrifos ($> 0.1 \mu\text{g} / \text{l}$), flutriafol ($> 1 \mu\text{g} / \text{l}$) and methomyl ($> 1 \mu\text{g} / \text{l}$). Areas cultivated with potato on sandy and sandy clay soils were found to be sensitive to the active ingredient alfa cypermethrin ($> 1 \mu\text{g} / \text{l}$) and methomyl ($> 1 \mu\text{g} / \text{l}$); and finally area cultivated with apple on sandy soils were found to be sensitive to the active ingredient flutriafol with a concentration ranging between 0.1 and $1 \mu\text{g} / \text{l}$.

Key words: Diffuse pollution, Territory, modeling, PEARL, soil, groundwater, agricultural practices.

TABLE DE MATIERE

| | |
|---|-----------|
| REMERCIEMENT | 3 |
| RÉSUMÉ | 5 |
| ABSTRACT | 5 |
| TABLE DE MATIERE | 7 |
| LISTE DES ABREVIATIONS | 12 |
| LISTES DES FIGURES | 14 |
| LISTE DES TABLEAUX | 19 |
| INTRODUCTION GENERALE | 22 |
| PREMIERE PARTIE | 29 |
| GESTION RAISONNEE D'EVALUATION DU RISQUE DE LA POLLUTION DIFFUSE DUE AU PRODUITS PHYTOSANITAIRES ET OUTIL D'AIDE A LA DECISION | 29 |
| INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE | 30 |
| PROBLEMATIQUE | 30 |
| CHAPITRE I | 34 |
| CONCEPT DE LA GESTION RAISONNEE EN AGRICULTURE | 34 |
| 1. La révolution du néolithique : l'invention de l'agriculture en Méditerranée | 35 |
| 2. La révolution fourragère, première révolution technique agricole | 41 |
| 3. Les consommations d'engrais et pesticides : instrument majeur de la modernisation agricole | 46 |
| 4. Les politiques agro-environnementales à l'origine de l'agriculture raisonnée | 56 |
| 5. La mise en place d'une agriculture raisonnée | 61 |
| Conclusion du chapitre 1 | 64 |
| CHAPITRE II | 65 |
| POLLUTION DIFFUSE ET GESTION DES RISQUES LIÉS À L'UTILISATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES | 65 |
| 1. Pollution diffuse : Définition et impacts environnementaux | 65 |
| 2. Devenir des pesticides dans les compartiments de l'environnement | 69 |
| 3. Gestion des risques liés à l'utilisation des pesticides et réduction de la pollution diffuse | 86 |
| Conclusion du chapitre 2 | 98 |
| CHAPITRE III | 99 |

| | |
|---|------------|
| LA MODÉLISATION COMME INSTRUMENT D'ÉVALUATION DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES AU NIVEAU D'UN TERRITOIRE | 99 |
| 1. Le rôle de la modélisation dans l'évaluation du risque d'utilisation des produits phytosanitaires | 99 |
| 2. Prise de décision et gestion des risques des produits phytosanitaires | 105 |
| 3. Prise de décision et aide à la décision : comment faire passer le message aux producteurs? | 107 |
| 4. Rôle de la spatialisation dans la détermination des degrés de pollution par les pesticides | 110 |
| Conclusion du chapitre 3 | 111 |
| CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE | 113 |
| DEUXIEME PARTIE | 115 |
| DEVELOPPEMENT D'UNE STRATEGIE D'EVALUATION DE RISQUES DE DEVENIR DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES DANS LA REGION DU CAZA DE ZAHLE | 115 |
| INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE | 116 |
| CHAPITRE IV | 117 |
| LE TERRITOIRE DU CAZA DE ZAHLE ET LES CARACTERISTIQUES DE SON SYSTEME AGRICOLE | 117 |
| 1. Les caractéristiques physiques de la région du caza de Zahlé | 118 |
| 2. Les caractéristiques socioéconomiques de notre territoire | 129 |
| 3. Caractéristique agronomiques et impacts environnementaux | 138 |
| Conclusion du chapitre 4 | 147 |
| CHAPITRE V | 148 |
| DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE ADOPTÉE | 148 |
| 1. Méthode de travail | 148 |
| 2. Typologie des systèmes de production agricoles et caractérisation spatiale | 150 |
| 3. Echantillonnage, acquisition et traitement des données | 159 |
| 4. Calcul d'Indicateur de Fréquence de Traitement, identification des cultures les plus consommatrice de pesticides avec les produits les plus utilisés à l'échelle de notre territoire | 167 |
| Conclusion du chapitre 5 | 173 |
| CHAPITRE VI | 175 |
| DESCRIPTION DU MODÈLE PEARL | 175 |
| 1. Description du modèle PEARL | 175 |
| 1.1. Hydrologie : le modèle SWAP | 178 |
| 1.2. L'avenir des pesticides | 179 |
| 2. Description de la procédure d'utilisation du modèle PEARL | 180 |

| | |
|--|------------|
| 3. Paramètres et variables d'entrées dans PEARL _____ | 188 |
| Conclusion du chapitre 6 _____ | 192 |
| CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE _____ | 194 |
| PARTIE III _____ | 196 |
| EVALUATION DE RISQUE DE TRANSFERT DES PESTICIDES POUR FAIRE EMERGER DES STRATEGIES DE GESTION ET D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE: UTILISATION DU MODELE PEARL _____ | 196 |
| INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE _____ | 197 |
| CHAPITRE VII _____ | 198 |
| ORGANISATION DU TERRITOIRE DE L'EXPLOITATION, PRATIQUES PHYTOSANITAIRES ET CONTRIBUTION A LA POLLUTION DIFFUSE ____ | 198 |
| 1. Description des systèmes de production type _____ | 198 |
| 2. Analyse de l'organisation interne des exploitations agricoles _____ | 206 |
| 3. La perception des agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires ____ | 213 |
| 4. Analyse des calculs de l'indicateur de Fréquence de Traitement _____ | 218 |
| Conclusion du chapitre 7 _____ | 223 |
| CHAPITRE VIII _____ | 225 |
| RÉSULTATS RETENUS DU MODÈLE ET STRATÉGIES PROPOSÉES EN SE BASANT SUR L'ANALYSE DES RÉSULTATS _____ | 225 |
| 1. Caractéristiques des matières actives retenues dans notre analyse _____ | 225 |
| 2. Les type des sols retenus avec les vitesses d'infiltration _____ | 228 |
| 3. L'occupation du sol des cultures retenues au niveau du caza de Zahlé _____ | 231 |
| 4. Analyse des résultats du modèle PEARL _____ | 232 |
| 5. Le transfert des pesticides vers les eaux souterraines : la lixiviation _____ | 263 |
| Conclusion du chapitre 8 _____ | 272 |
| CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE _____ | 274 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES _____ | 276 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____ | 281 |
| ANNEXES _____ | 298 |
| Annexe 1 _____ | 299 |
| Descriptifs résumés des outils et des méthodes de gestion de qualité de ressources en eau contaminé par les pesticides _____ | 299 |
| 1. ARPEGES _____ | 299 |
| 2. HYPE _____ | 299 |
| 3. Indice de Développement et de Persistance de Réseaux (IDPR) _____ | 299 |
| 4. Indice de Fréquence de Traitement (IFT) _____ | 300 |
| 5. INDIGO _____ | 300 |
| 6. I-Phy _____ | 300 |

| | |
|--|------------|
| 7. MACRO _____ | 300 |
| 8. MACRO - MARTHE _____ | 301 |
| 9. Méthode d'analyse agro-anthropologique des pratiques phytosanitaires _____ | 301 |
| 10. Méthode d'évaluation des pratiques phytosanitaires à partir des carnets de plaine 301 | |
| 11. Méthode d'évaluation du potentiel de contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires _____ | 301 |
| 12. Méthode de construction de rotations-types en fonction des types de sol _____ | 302 |
| 13. Méthode de diagnostic Territ'eau _____ | 302 |
| 14. Méthode de formalisation de types de pratiques des agriculteurs _____ | 302 |
| 15. Méthode de reconstitution des séquences de cultures à partir du RPG _____ | 302 |
| 16. Méthode de spatialisation de la BNV-d _____ | 303 |
| 17. Méthode multicritère d'aide à la décision _____ | 303 |
| 18. Méthode statistique d'analyse des données issues des réseaux de surveillance des eaux de surface _____ | 303 |
| 19. Outils d'analyse territorialisée des parcelles des exploitations agricoles concernées par une AAC _____ | 304 |
| 20. Outil de modélisation du transport de pesticide dans les processus de ruissellement et d'érosion basé sur OpenLISEM _____ | 304 |
| 21. PASTIS _____ | 304 |
| 22. PEARL _____ | 304 |
| 23. PESTDRAIN _____ | 305 |
| 24. PeSTICS _____ | 305 |
| 25. PeSTICS-MODCOU _____ | 305 |
| 26. PHYTOPIXAL _____ | 305 |
| 27. RPG Explorer _____ | 306 |
| 28. SACADEAU _____ | 306 |
| 29. SIRIS-Pesticides (Système d'Intégration des Risques par Interaction des Scores pour les pesticides) _____ | 306 |
| 30. STICS-MACRO _____ | 307 |
| 31. SWAT _____ | 307 |
| 32. TyPol _____ | 307 |
| 33. WATSFAR _____ | 308 |
| Annexe 2 _____ | 309 |
| Annexe 3 _____ | 324 |
| Plan d'échantillonnage _____ | 324 |
| 1. Groupe I _____ | 324 |
| 2. Groupe II _____ | 324 |
| 3. Groupe III _____ | 325 |
| 4. Groupe IV _____ | 325 |
| 5. Groupe V _____ | 325 |
| Annexe 4 _____ | 327 |

| | |
|--|------------|
| Les valeurs des IFT par culture et par région | 327 |
| Annexe 5 | 335 |
| Distribution des cultures par exploitation agricole enquêtée | 335 |
| Annexe 6 | 351 |
| Étape de fonctionnement du modèle PEARL | 351 |
| 1. Page principale de PEARL (Source : Modèle PEARL) | 351 |
| 2. Table des propriétés du sol (Source : Modèle PEARL) | 351 |
| 3. Table des données climatiques (Source : Modèle PEARL) | 352 |
| 4. Table du calendrier des cultures (Source : Modèle PEARL) | 352 |
| 5. Table des paramètres de la culture (Source : Modèle PEARL) | 353 |
| 6. Table des propriétés dynamique de la culture (Source : Modèle PEARL) | 353 |
| 7. Table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL) | 354 |
| 8. Freundlich sorption - Table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL) | 354 |
| 9. La transformation - Table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL) | 355 |
| 10. La diffusion - table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL) | 355 |
| 11. Table du programme d'application des substances actives (Source : Modèle PEARL) | 356 |
| 12. Table du contrôle de simulation (Source : Modèle PEARL) | 356 |
| 13. Volet Hydrologie (Source : Modèle PEARL) | 357 |
| 14. Paramètres de la sortie (Source : Modèle PEARL) | 357 |
| 15. Table des catégories et variables de sorties (Source : Modèle PEARL) | 358 |
| Annexe 7 | 359 |
| Bilan de dissipation des matières actives | 359 |
| 1. Pour la culture de vigne | 359 |
| 2. Pour la culture de pomme de terre | 364 |
| 3. Pour la culture de pomme | 369 |
| 4. Pour la culture de cerise | 374 |

LISTE DES ABREVIATIONS

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CAS : Central Administration of Statistics

CCI: Chambre de Commerce et d'Industrie

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CORPEN : Comité d'orientation pour les Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement

D.D.A.F : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt

DDE: Dichlorodiphényldichloroéthylène

DDT: Dichlorodiphényltrichloroéthane

DH: Dose Homologuée

dm : décimètre

DT₅₀ : Temps de demi-vie

DT₅₀: Demi-vie 50%

EHP : Environmental Health Policy

EIQ: Environment Impact Quotient

ETP : Evapotranspiration

EPA: Environmental Protection Agency

FAO: Food and Agriculture Organisation

HCB: Hex chlorobenzène

HCH: Hexachlorocyclohexane

ICARDA/ICARDA: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

IDEA: Indicateur du Durabilité des Exploitations Agricoles

IFT: Indicateur de Fréquence de Traitement

IFT_{moy} : Valeur d'Indicateur de Fréquence de Traitement moyenne

IFT_{tot} : Valeur d'Indicateur de Fréquence de Traitement total

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IP: Indice Pesticide

IPMR: Insecticide Pest Management Rating

IRAL: Institut de Recherche Agronomique Libanaise

IRTE : Indicateur de Risque de Toxicité Environnementale

IRSA : Indicateur de Risque de Santé d'Applicateur

ITC : International Trade Center
K_{oc} : Coefficient de partition organique
LMR: Limite Maximale de Résidu
LRA: Litani River Authority
MA : Matière active
MO: Matières Organique
MOA: Ministère de l'Agriculture
nm : nanomètre
O: Oxygène
OCDE: Organisation de Coopération et de Développement Economique
OH: Hydroxyle
OMS: Organisation Mondiale de la Santé
ONL: Office National du Litani
PALMO: Pesticide Leaching Model
PEARL: Pesticide Leaching at Regional and Local scale
PH: Potentiel Hydrogène
PK_a : Constante d'acidité
PNUD: Programme des Nations Unies pour le Développement
PP: Produits Phytosanitaires
PRMZ: Pesticide Root Zone Model
PPBD : Pesticide Properties DataBase
RGA : Recensement Général Agricole
SAU: Surface Agricole Utile
SPAW: Soil Plant Air Water model
SPISP: Soil Pesticide Interaction Screening Procedure
µg: microgramme
UMR GRED (UPVM/IRD) : Unité Mixte de Recherche « Gouvernance, Risque, Environnement, Développement » (Université Paul-Valéry Montpellier 3/Institut de Recherche pour le Développement)

LISTES DES FIGURES

| | |
|--|-----|
| Figure 1: Quantité de pesticides utilisés dans les pays arabes en kg/ha entre les années 1993 et 2002 (source : Rifai, 2013). | 49 |
| Figure 2: Variation des quantités des engrais chimiques disponibles (kg/ha) (source: enquêtes annuelles réalisées dans les années 2000 par le MOA et la FAO). | 50 |
| Figure 3: Variation des quantités des pesticides disponibles (kg/ha) (source: enquêtes annuelles réalisées dans les années 2000 par le MOA et la FAO). | 50 |
| Figure 4: Variation des rendements de la pomme de terre entre 2000 et 2009 (source: enquêtes réalisées par le MAO et la FAO). | 53 |
| Figure 5: Variation des rendements du blé entre 2000 et 2009 (source: enquêtes réalisées par le MAO et la FAO). | 53 |
| Figure 6: Evolution du pourcentage de la population active agricole par rapport à la population active totale (source : Banque mondiale, 2017). | 55 |
| Figure 7: Pourcentage des dépenses publiques par type d'interventions dans l'UE-15- Plans de développement rural 2007-2013 ((Source : Agricultural and rural development : national study of Italy (Mantino, F; 2008). | 58 |
| Figure 8: Représentation schématique du raisonnement que doivent suivre les agriculteurs souhaitant pratiquer une agriculture raisonnée (Source : © historicaire, CC by-sa 3.0) | 62 |
| Figure 9: Les différentes voies de transfert de la pollution diffuse (CORPEN, 1996). | 69 |
| Figure 10: Les différents sites d'adsorption d'une molécule organique: sur la surface externe de la particule de sol (E) et/ou sur la surface interne des pores (I) (d'après Pignatello (2000)) | 71 |
| Figure 11: Localisation des phénomènes de transport dans l'espace poral (Calvet, 2003b); Diff: diffusion et CD: convection/dispersion | 81 |
| Figure 12: Diagramme schématique de la relation entre la complexité du modèle, la disponibilité des données et la performance prédictive (Source: Grayson et Broschl, 2000) | 101 |
| Figure 13: Processus de prise de décision (Source: élaboration personnelle d'après la réflexion de Boothroyd, 1991 et Chechile, 1991) | 109 |
| Figure 14: Photos prise durant notre travail de terrain, A: vue global du territoire du caza de Zahlé, B: exemples des exploitations agricoles à Nabi Ayla (source: travail de terrain, 2015-2016). | 117 |
| Figure 15: Localisation de notre zone d'étude - caza de Zahlé au niveau du territoire libanais (Source: F. Kanj, 2017-2018). | 118 |
| Figure 16: Circonscriptions foncières de notre zone d'étude (Source: F. Kanj, 2017-2018) | 119 |
| Figure 17: Carte de reconnaissance des sols (Source: Atlas Agricole, 2004). | 121 |
| Figure 18: Total des précipitations mensuelles (mm) durant l'année 2016 (Source: calculs personnels d'après les données collectées d'ICARDA et de IRAL, 2017). | 124 |
| Figure 19: Variation des précipitations annuelles entre 2005 et 2016 (Source: calculs personnels d'après les données collectées d'ICARDA et de IRAL, 2017) | 125 |
| Figure 20: Distribution des précipitations au niveau de notre zone d'étude. (Source: Données collectées du CNRS, F. Kanj, 2016-2017). | 125 |
| Figure 21: Présentation des sous-bassins supérieur et inférieur du bassin versant "Litani" | 127 |
| Figure 22: La répartition des confessions chrétiennes | 131 |
| Figure 23: La répartition des confessions musulmanes | 132 |

| | |
|--|-----|
| Figure 24: La répartition confessionnelle des sièges de députés au niveau du territoire libanais. | 134 |
| Figure 25: Les résultats des élections législatives de 2005 (source: atlas du Liban, 2007). | 135 |
| Figure 26: Les résultats des élections législatives de 2018 (source: réalisation personnelle d'après données des élections du mai 2018). | 136 |
| Figure 27: Répartition de l'occupation du sol dans notre zone d'étude (source: calculs d'après le RGA, 2010). | 139 |
| Figure 28: Statistiques des importations des produits phytosanitaires au Liban en quantité et en valeur (Source: Ministère d'économie et de commerce, 2015) | 140 |
| Figure 29: Taux de croissance des importations des produits phytosanitaires en valeur et en quantité (Source: Ministère d'économie et de commerce, 2016) | 141 |
| Figure 30: Répartition des produits phytosanitaires par catégorie (Source : MOA et Customs, www.customs.gov.lb, 2016). | 141 |
| Figure 31: Répartition du nombre d'entreprises des produits phytosanitaires par Mohafaza (Source : MOA, département de protection, 2016) | 142 |
| Figure 32: Répartition des entreprises importatrices en fonction du type des produits phytosanitaires importés (Source : Calculs du CCI sur la base des statistiques du ministère de l'économie et de commerce, république libanaise, 2016). | 143 |
| Figure 33: Distribution spatiale des points de vente des produits phytosanitaires (Source: F. Kanj 2016-2017). | 145 |
| Figure 34: Distribution des puits au niveau de notre zone d'étude - caza de Zahlé (Source: F. Kanj 2016-2017). | 146 |
| Figure 35: Schéma conceptuel de la méthodologie (Réalisation: Kanj, 2016). | 149 |
| Figure 36: Résultats d'ACP retenue sur Tanagra (Source : Calculs F. Kanj à travers Tanagra). | 155 |
| Figure 37: Cercle de corrélation entre les axes 1 et 2 (Source : Calculs F. Kanj à travers Tanagra). | 155 |
| Figure 38: Résultats de l'AFC retenues sur Tanagra (Source : calculs F. Kanj à travers Tanagra) | 159 |
| Figure 39: Réalisation d'enquêtes auprès des deux agriculteurs à Jdita (source: travail de terrain, 2015-2016). | 164 |
| Figure 40: Exploitation viticole à Forzol (source: travail de terrain, 2015-2016). | 165 |
| Figure 41: Discussion avec un agriculteur lors de notre première visite de terrain en présence de M. Bord J - P, M. Le Grusse P. et M. Darwich S. (Source: visite de terrain, 2015) | 174 |
| Figure 42: Aperçu du processus inclus dans le modèle PEARL et SWAP (Source : Tiktak A. et al., 2003, RIVM report) | 176 |
| Figure 43: Représentation conceptuelle des différentes paramétrisations employées par le modèle PEARL (Source: Salah, 2012) | 178 |
| Figure 44: La relation entre les eaux de surface déduite de la carte topographique (1: 10000) des Pays-Bas et les systèmes de drainage dans SWAP. (Source : Tiktak A. et al., 2003, RIVM report) | 179 |
| Figure 45: Découpage vertical des horizons du sol dans le modèle PEARL | 181 |
| Figure 46: Table des paramètres de la culture (Source : Modèle PEARL) | 183 |

| | |
|--|-----|
| Figure 47: Table du programme d'application des substances actives (Source : Modèle PEARL) | 185 |
| Figure 48: Table des catégories et variables de sorties (Source : Modèle PEARL) | 186 |
| Figure 49: Résultat prédéfini du compartiment eau (Source : Modèle PEARL) | 187 |
| Figure 50: Exemple de résultat des graphes choisis (Source : Modèle PEARL) | 187 |
| Figure 51: Dégradation des eaux de Litani, caza de Zahlé (source: travail de terrain, 2015-2016) | 194 |
| Figure 52: Classification des exploitations en fonction des systèmes de productions agricoles stratifiés (Source: Réalisation Kanj F., 2015). | 199 |
| Figure 53: Exploitation de pomme de terre à Terbol (source: travail de terrain, 2015-2016). | 201 |
| Figure 54: Exploitation de blé à Dalhamyet (source: travail de terrain, 2015-2016). | 202 |
| Figure 55: Exploitation arboricole à Ksara (source: travail de terrain, 2015-2016). | 203 |
| Figure 56: Exploitation viticole à Nabi Ayla (source: travail de terrain, 2015-2016). | 204 |
| Figure 57: Distribution spatiale d'échantillonnage selon la taille et l'orientation des systèmes de production des exploitations (Source: Réalisation Kanj F., 2016). | 205 |
| Figure 58: Technique d'irrigation par aspersion d'une exploitation de pomme de terre à Terbol (source: travail de terrain, 2016) | 208 |
| Figure 59: Répartition de l'origine de l'eau d'irrigation dans notre zone d'étude (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016). | 209 |
| Figure 60: Répartition du moment d'utilisation de l'eau au niveau des exploitations enquêtées (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016) | 209 |
| Figure 61: Répartition de type d'élevage au niveau des exploitations enquêtées (source: travail de terrain de Kanj F., 2016) | 210 |
| Figure 62: Répartition des lieux d'achats des PP au niveau de notre zone d'étude (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016) | 211 |
| Figure 63: Répartition de source des méthodes des quantités des PP (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016) | 212 |
| Figure 64: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face à l'impact des PP sur la santé (travail de Kanj F., 2016). | 215 |
| Figure 65: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face à l'impact des PP sur l'environnement (Source : travail de Kanj F., 2016). | 216 |
| Figure 66: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face au respect des bonnes pratiques lors de l'utilisation des PP (Source : travail de Kanj F., 2016) | 217 |
| Figure 67: photo d'un agriculteur qui prépare un mélange d'engrais chimique sans qu'il prend les précautions pour sa santé (source : travail de terrain, 2016). | 217 |
| Figure 68: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face à la question qu'il faut former et informer les agriculteurs (Source : travail de Kanj F., 2016). | 218 |
| Figure 69: Indicateur de fréquence de traitement moyenne par hectare des différentes cultures (Source : travail de Kanj F., 2016). | 219 |
| Figure 70: Distribution spatial des IFT moyennes par hectare et par commune (source: travail de Kanj F., 2016, données de terrain). | 222 |

| | |
|--|-----|
| Figure 71: Distribution spatial des IFT totaux par commune (Source : travail de Kanj F., 2016, données de terrain). | 223 |
| Figure 72: Les mauvaises pratiques phytosanitaires au niveau du territoire d'étude (source: travail de terrain, 2016) | 224 |
| Figure 73: Types de sol de notre zone d'étude (Source: Kanj F. 2016-2017 d'après la base de données pédologique construite au cours du travail de terrain). | 230 |
| Figure 74: Distribution des parcelles des cultures retenues au niveau du caza de Zahlé (source: Kanj F. 2016-2017). | 231 |
| Figure 75: La quantité perdue de la matière active "chlorpyrifos-éthyl" pour la culture de vigne dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sol sableux) | 235 |
| Figure 76: La quantité perdue de la matière active "flutriafol" pour la culture de vigne dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols limoneux argilo-sableux et F: sol sableux) | 237 |
| Figure 77: La quantité perdue de la matière active "méthomyl" pour la culture de vigne dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sol limoneux argilo-sableux et F: sol s sol limoneux argilo-sableux et F: sol sableux) | 240 |
| Figure 78: La quantité perdue de la matière active "chlorpyrifos-éthyl" pour la culture de pomme de terre dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 245 |
| Figure 79: La quantité perdue de la matière active "alfa cyperméthrin" pour la culture de la pomme de terre dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 247 |
| Figure 80: La quantité perdue de la matière active "méthomyl" pour la culture de pomme de terre dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 249 |
| Figure 81: La quantité perdue de la matière active "chlorpyrifos-éthyl" pour la culture de pomme dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 253 |
| Figure 82: La quantité perdue de la matière active "flutriafol" pour la culture de pomme dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 255 |
| Figure 83: La quantité perdue de la matière active "alfa cyperméthrin" la culture de pomme dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 257 |
| Figure 84: La quantité perdue de la matière active "Alfa cyperméthrin" pour la culture cerise dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 260 |

| | |
|--|-----|
| Figure 85: La quantité perdue de la matière active "flutriafol" pour la culture cerise dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E:sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux) | 262 |
| Figure 86: La variation de la quantité lixiviée de la substance active "chlorpyrifos-éthyl" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL). | 265 |
| Figure 87: La variation de la quantité lixiviée de la substance active "Alfa cypermethrin" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL). | 267 |
| Figure 88: La variation de la quantité lixivié de la substance active "Flutriafol" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL). | 269 |
| Figure 89: La variation de la quantité lixivié de la substance active "Méthomyl" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL). | 271 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1: Dépenses consenties par l'agriculture française (1950-2015) (Source : Histoire de la France rurale, tome IV (1950-1971) et Commission des comptes de l'agriculture (1987-2015). | 47 |
| Tableau 2: Consommation d'engrais (NPK) entre les années 1913 et 1985 (Unité: kg/ha) (Source: Bairoch, 1987) | 48 |
| Tableau 3: Consommation de N, P, K en France, unités 1000 tonnes entre les années 1950 et 2000 (Source: Poulain, 2004) | 48 |
| Tableau 4: Evolution de la SAU et de la production entre 1999 et 2010 (Source : Recensement agricole 1999 et 2010, Ministère de l'Agriculture) | 49 |
| Tableau 5: Evolution historique des rendements de blé (qtx/ hectare) (Source: Bairoch, 1987) | 52 |
| Tableau 6: Evolution des actifs agricoles masculins dans la population active (en %) (Source: Bairoch, 1987) | 54 |
| Tableau 7: Les différents acteurs sur le marché des produits phytosanitaires libanais. (Source: Elaboration personnelle, 2014) | 61 |
| Tableau 8: Exemples des dangers et des risques (Source : Calvet et al., 2005). | 67 |
| Tableau 9: Exemples des dangers et des risques environnementaux (Source : Calvet et al., 2005). | 67 |
| Tableau 10: Principaux indicateurs utilisés pour l'évaluation de risques liés à l'utilisation des pesticides (Source : Hamdi, 2011). | 90 |
| Tableau 11: Les différents processus pris en compte dans les modèles homologués (Source: Rat et al., 2005). | 104 |
| Tableau 12: Caractéristiques générales du Bassin supérieur (Source: Moussa-Haidar, 2014). | 128 |
| Tableau 13: Distribution des villages dans le bassin supérieur du "Litani" correspondant au département (caza) (Source: ONL, 2010 ; ACS, 1997). | 128 |
| Tableau 14: Croissance de la population dans le bassin versant du Litani (LRB) | 128 |
| Tableau 15: Répartition de la population occupée par secteur d'activité | 130 |
| Tableau 16: Distribution du nombre des entreprises des produits phytosanitaires certifiées et en cours de certification par Mohafaza (Source : MOA, département de protection, 2016). | 142 |
| Tableau 17: Les matières actives les plus utilisées dans la région du bassin supérieur du Litani (Source : Moussa-Haidar, 2014) | 144 |
| Tableau 18: Variables quantitatives utilisées pour caractériser les exploitations par analyse ACP par strate de taille (Source : Travail de Kanj F., Tanagra, 2015) | 153 |
| Tableau 19: Variables quantitatives utilisées pour caractériser les exploitations par analyse AFC (Source : travail Kanj F., 2015, analyse dans Tanagra). | 156 |
| Tableau 20: Types des systèmes de productions stratifiés par classe de taille retenue après la réalisation de l'ACP (Source : travail Kanj F., 2015, analyse dans Tanagra) | 157 |
| Tableau 21: Tableau de fréquence des variables pour l'AFC (travail Kanj F., 2015, analyse sur Tanagra) | 158 |
| Tableau 22: Répartition des enquêtes selon le poids de chaque groupe par rapport au total (Source: travail Kanj F. 2015) | 160 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 23: Répartition des agriculteurs enquêtés entre les 5 zones (Source : travail Kanj F., 2015) | 163 |
| Tableau 24: Comparaison entre la SAU moyenne / agriculteur et SAU moyenne / agriculteur enquêté dans les 5 zones (Source : travail de Kanj F., 2015) | 165 |
| Tableau 25: IFT moyen (par hectare) au niveau du territoire et par culture (Source : travail de Kanj F. 2016). | 167 |
| Tableau 26: Calcul du coefficient de variance (CV) par culture (Source : travail de Kanj F. 2016). | 168 |
| Tableau 27: Calcul des quartiles des deux variables IFT moyen par hectare et IFT total pour le choix des cultures les plus consommatrice de pesticides (Source : travail de Kanj F. 2016). | 169 |
| Tableau 28: IFT totaux des cultures les plus consommatrices en pesticides (Source : travail de Kanj F. 2016). | 169 |
| Tableau 29: IFT total par produit commercial au niveau de notre territoire (Source : travail de Kanj F. 2016). | 169 |
| Tableau 30: Calcul des quartiles des IFT totaux (Source : Travail Kanj F., 2016). | 170 |
| Tableau 31: Les noms des 15 produits phytosanitaires les plus utilisés (Source : travail de Kanj F. 2016). | 171 |
| Tableau 32: Liste des produits phytosanitaires les plus utilisés, les noms des matières actives et le type des cultures traitées avec les valeurs des IFT totaux par culture au niveau du territoire d'étude (Source : travail de Kanj F. 2016). | 172 |
| Tableau 33: Les matières actives retenues et les cultures correspondantes (Source : travail de Kanj F. 2016). | 172 |
| Tableau 34: Quantité moyenne des MA les plus utilisés par les cultures choisies (Source : travail de Kanj F. 2016). | 173 |
| Tableau 35: Variables fixées par le modèle concernant les caractéristiques des pesticides utilisés (source: base du données du modèle PEARL) | 191 |
| Tableau 36: Les caractéristiques des substances actives retenues (Source: Base de données FOOTPRINT, 2009). | 192 |
| Tableau 37: Grandes zones spatialisées en fonction des systèmes agricoles dominants (Source: Travail de Kanj F., 2016). | 199 |
| Tableau 38: Résultats récapitulatif des distributions des systèmes de production par groupe (source : d'après les résultats obtenu du Tanagra et les données du RGA, 2010) | 204 |
| Tableau 39 : Représentation de la somme des IFT totaux au niveau de notre territoire d'étude "Caza de Zahlé" (Source: travail de Kanj F., 2016). | 220 |
| Tableau 40: La somme des IFT totaux des cultures par commune (Source: travail de Kanj F., 2016). | 220 |
| Tableau 41: Taux d'infiltration typiques (Source: adapté de Ferguson, 1994) | 230 |
| Tableau 42: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: Réalisation personnelle). | 232 |
| Tableau 43: Le bilan du Chlorpyrifos-éthyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 234 |
| Tableau 44: Le bilan du Flutriafol dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 236 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 45: Le bilan du Glyphosate dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 238 |
| Tableau 46: Le bilan du Proquinazid dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 238 |
| Tableau 47: Le bilan du Méthomyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 239 |
| Table 48: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: Réalisation personnelle). | 241 |
| Table 49: Le bilan du Glyphosate dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 241 |
| Tableau 50: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: Réalisation personnelle). | 242 |
| Tableau 51: Le bilan du Chlorpyrifos-éthyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 244 |
| Tableau 52: Le bilan d'alfa cypermethrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 246 |
| Tableau 53: Le bilan du Méthomyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 248 |
| Tableau 54: Le bilan du Glyphosate dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 250 |
| Table 55: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source:travail de Kanj F., 2017). | 251 |
| Table 56: Le bilan du Chlorpyrifos-éthyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 252 |
| Tableau 57: Le bilan du Flutriafol dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 254 |
| Tableau 58: Le bilan d'alfa cypermethrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 256 |
| Tableau 59: Quantité journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: travail de Kanj F., 2017). | 258 |
| Tableau 60: Le bilan d'alfa cypermethrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 259 |
| Tableau 61: Le bilan du Flutriafol dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 261 |
| Tableau 62: Le bilan du lambda cyhalothrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016) | 263 |
| Tableau 63: Quantités lixiviées (µg/l) pour les substances actives retenues (Source: travail de Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL) | 264 |
| Table 64: 80 ^e percentile des concentrations en pesticides lixiviés par culture et par type de sol (source: travail de Kanj F., 2016-2017). | 275 |

INTRODUCTION GENERALE

Le Liban est le plus petit des Etats continentaux méditerranéens. Sa surface totale (10 452 Km²) est voisine de celle de Chypre. Sa côte est longue de 215 kilomètres et sa largeur varie de 40 à 70 kilomètres. Situé sur la côte Est de la Méditerranée, le Liban a des frontières communes avec la Syrie à l'Est et au Nord, et avec les territoires palestiniens occupés au Sud.

Ce petit pays est composé d'un ensemble très contrasté au niveau du relief et du climat. Mais c'est surtout un ensemble entrelacé de religions, d'économies, de familles et enfin de riches et de pauvres.

Tout d'abord, le **relief** est très accidenté. En fait, le Liban est formé d'une plaine côtière et de deux chaînes de montagnes, de direction Sud-ouest / Nord-est, le Mont-Liban et l'Anti-Liban séparés par une plaine très fertile, la Béqaa, région qui est celle où se situe notre recherche. Les roches qui constituent les deux chaînes de montagnes datent de l'ère secondaire, où apparaissent les couches de calcaire jurassique lité, les couches de grès lité et argilo-sableuses, des sols jaunâtres et des sols rouges en altitude. Nous trouvons des marnes blanches du tertiaire au Mont-Liban. Enfin le versant Ouest du Mont-Liban, très accidenté, comprend de multiples vallées, grottes, fleuves et cours d'eau de diverse importance.

De ce qui précède, il est évident que le calcaire couvre environ les trois quarts du Liban ; et que plus de deux tiers des terres sont en pentes ou en zones de montagnes. Ceci se traduit par le fait que plusieurs générations de paysans ont, par des travaux acharnés de défrichements et de labours, aménagé des terrasses sur les pentes, afin de mieux les exploiter. Ainsi, malgré l'exiguïté de la surface agricole utile, la fragmentation de l'espace et du relief entraînent une diversité de situations paysagères liées à des associations végétales typées, conditionnées par le microclimat des lieux, la topographie et le sol, donc la géologie: paysages de montagne avec une présence de terrasses à muret ou de banquettes, des paysages de plaine irriguée souvent divisée en petites exploitations gérées sur le mode intensif ou semi-intensif, et des territoires côtiers favorables à l'agriculture (Atlas du Liban, 2007).

Ensuite, la **géographie** fait du Liban un des ensembles les plus diversifiés de la Méditerranée : placé au carrefour de l'Europe, de l'Afrique et de l'Asie, le Liban est considéré comme « la Suisse de l'Orient » de par sa géographie. L'omniprésence de la montagne, considérée comme un inconvénient, lui donne une richesse naturelle qui le distingue des pays voisins. Au Liban, quinze rivières (appelées Nahrs) sont à l'origine de cette richesse. Douze sont des rivières côtières naissant sur le flanc occidental du Mont-Liban et descendant droit vers la mer. Les trois autres sont situées à l'intérieur du pays et particulièrement dans la plaine de la Béqaa : le Litani avec un débit de 15 m³/seconde, l'Oronte ou Al-Aassi avec 8,7 m³/seconde et enfin El Hasbani avec 0,37m³/seconde (Atlas du Liban, 2007).

Le **climat** est globalement de type méditerranéen, caractérisé par un été sec et un hiver doux et pluvieux. En effet, les régions côtières sont soumises à l'influence maritime, alors que la plaine de la Béqaa, entre le Mont-Liban et l'Anti-Liban, subit une influence continentale. Les hauteurs, surtout le versant ouest du Mont-Liban, sont plus arrosées¹.

¹ Etant donné la diversité des climats, les précipitations et les températures varient fortement d'une zone à l'autre ; la carte phytogéographique et les chiffres des précipitations et des températures de chaque zone se trouvent en annexe 1.

L'économie libanaise est une **économie de marché** et de libre entreprise avec une prépondérance des secteurs bancaire, commercial et des services. Le gouvernement joue un rôle économique relativement mineur dans une économie essentiellement « libérale » ; son rôle se limite aux fonctions régaliennes classiques : relations extérieures, éducation, justice, sécurité interne et défense du territoire national.

Le Liban est l'un des pays au monde qui abrite le plus de **communautés**. Tout d'abord, les trois grandes religions monothéistes y sont présentes. Ensuite, les deux religions chrétiennes et musulmanes sont elles-mêmes composées de 14 communautés reconnues par l'Etat et organisées par des lois et des décrets ; une communauté israélite est présente mais avec une faible importance numérique, et enfin le pays compte deux communautés musulmanes officiellement reconnues mais non organisées.

Un certain nombre de **grandes familles dirigées par des notables**² dominant depuis longtemps la vie publique et économique du pays. Elles sont souvent issues de familles féodales, ayant consolidé leurs acquisitions foncières au cours de la période ottomane et servi de relais au pouvoir ottoman jusqu'à sa chute. **Celles-ci ont ottomane, soit.** Elles ont constitué après l'indépendance du Liban les nouvelles classes politiques dominant la vie politique du Liban contemporain. Contrairement aux clans familiaux localisés au nord de la Béqaa, ces grandes familles formées de notables politiques sont très nombreuses, dispersées sur tout le territoire et possèdent des milliers d'hectares de terres fertiles.

Les contrastes relevés au Liban trouvent leur expression la plus forte dans l'agriculture. En plus des différences climatiques, topographiques et culturelles vient en effet s'ajouter une différenciation sociale qui a un impact fort sur l'agriculture.

Le Liban se caractérise aujourd'hui par une agriculture dont le poids dans l'économie nationale est relativement faible (5% du PIB), et où l'influence des agriculteurs dans la société a été considérablement diminuée ces dernières décennies. La population active agricole représente, en effet, moins de 10 % de la population totale, avec des chefs d'exploitation de plus en plus âgés, la majorité d'entre eux dépassant 50 ans (RGA, 2010).

En 2014, le secteur des services représentait 70% du PIB (Banque Mondiale) du pays. En second rang vient l'industrie avec près de 24% (Banque Mondiale) du PIB et employant plus de 20% des actifs. Dans le secteur des services, la part du tourisme dans la formation du PIB est de 25%. Ce dernier secteur emploie près du quart (24%) des actifs que compte le pays.

Il faut rappeler que le pays est rattaché aux pays du « croissant fertile ». Il bénéficie de conditions agro-climatiques très favorables, de plaines dotées de terres de qualité et aux ressources en eau suffisantes qui justifie le qualificatif de « château d'eau » du Proche-Orient³. Son agriculture se caractérise par une très grande diversité. De la Béqaa au Mont

² Les grandes familles prennent deux formes au Liban : celles qui sont nombreuses mais qui n'ont pas de pouvoir ou d'activités économiques, et les autres grandes familles qui ont un pouvoir « politique » et agricole en même temps. Du fait de leur acquisition des terres, leur contribution dans l'activité économique est très importante. Les grandes familles de la Béqaa sont De Freij, Haidar, Hraoui, Hamadé, Dandach, Skaff, Eddé, Mansour, etc.

³ Le potentiel net exploitable était estimé à 2,08 milliards de m³ en 2011, ce qui situe ce pays au-delà du seuil de stress hydrique de 1000 mètres cube par an par habitant. Sur ce potentiel utilisable, 60% sont utilisés pour les activités agricoles et plus de la moitié de la surface agricole utile est sous irrigation.

Liban, en passant par les régions littorales ou le Sud, les conditions naturelles déterminent des systèmes d'exploitation spécifiques et autorisent toutes les cultures méditerranéennes : plantations d'oliviers au Nord et au Sud, dans les montagnes qui environnent Beyrouth ou Tripoli, vignobles dans la plaine de la Béqaa et de Baalbeck-Hermel, cultures industrielles (betterave sucrière et tabac), plantations d'agrumes au Nord et au Sud, cultures intensives et parfois même les produits exotiques comme la banane sur les plaines littorales au climat doux et humide.

Si l'agriculture produit des richesses agricoles, elle offre également des emplois et des revenus aux membres de ménages agricoles. L'activité agricole contribue à une vitalité des territoires ruraux, préserve un tissu social relativement dense dans les campagnes et entretient des patrimoines naturels, religieux et culturels.

Cette multifonctionnalité de l'agriculture libanaise a toutefois été compromise par une transition engagée fin des années 1950 - début des années 1960, qui a transformé l'économie libanaise en une économie de services fortement dominée aujourd'hui par l'activité des banques et des services d'intermédiation financière, le commerce et le tourisme. L'agriculture et le monde rural qui jouaient un rôle majeur amorcèrent dès lors un déclin qui s'accrut au fil des ans. La volonté politique d'intégration de l'économie libanaise dans le processus de mondialisation des échanges, les conflits politiques, les guerres et les occupations ont accéléré, dans les années 1970, des transformations qui diminuèrent le rôle et la place du secteur de l'agriculture dans l'économie globale. Le Liban dispose pourtant d'atouts importants et notamment de ressources naturelles (en eau notamment) et humaines (ressources humaines formées et actifs agricoles de plus en plus qualifiés) non négligeables pour répondre aux défis posés par la sécurité alimentaire, celui de la pauvreté ou du développement de territoires ruraux marginalisés.

En dépit de ces transformations importantes, l'agriculture reste dans certains territoires ruraux une activité essentielle qui structure les activités économiques. Elle constitue parfois la seule source de subsistance, sinon le mode de vie dominant de milliers de familles vivant dans les zones rurales. Elle est aussi la seule activité en mesure d'initier ou de favoriser une mise en valeur du potentiel disponible en ressources naturelles du pays.

Le Liban fut pourtant, dans les années 1950, un pays agricole prospère, assurant à ses populations l'essentiel des approvisionnements et exportant des productions excédentaires d'agrumes, de pommes ou de légumes frais dans les pays voisins. Même si la pauvreté et les inégalités sociales et territoriales existaient, l'agriculture jouait un rôle majeur dans les équilibres entre les régions rurales et le monde urbain.

Le Recensement Général Agricole (RGA) de 2010 comptabilisait 169 512 exploitations agricoles dont 4 142 conduites en hors sol. Ces exploitations occupent une superficie de 230 994.2 ha soit près de 22% du territoire libanais (RGA, 2010).

Ces données montrent une baisse des effectifs des exploitations et des surfaces recensées en 1998. En effet, les exploitants étaient au nombre de 194 829, soit une baisse de près de 7% par rapport au RGA de 1998 et la surface agricole utile saisie en 1998 était de 2 479 896 ha soit une baisse de 3,5 % de la SAU par rapport à l'année 2010. La régression de la SAU, qui n'affecte pas toutes les régions, résulte d'une perte de terres agricoles au sein des zones péri-

urbaines et/ou d'une cessation d'activité, jugée non rentable par les habitants des zones les plus reculées.

Mais ce qui est différent dans le RGA en 2010, c'est la superficie qui englobe la SAU y compris les terres en jachères temporaires, les superficies des terres en jachères permanentes (abandonnées de plus de 5 ans), celles des terres incultes, celles des forêts au sein des exploitations agricoles ainsi que d'autres terres non identifiées précédemment (RGA, 2010).

Concernant l'occupation du sol, le territoire libanais est caractérisé par une large diversification de cultures : cultures permanentes (54%), cultures saisonnières (44%) et cultures sous-serre (2%). La détermination des cultures est fonction de la situation géographique et du climat de chaque zone agricole.

Les résultats du recensement 2010 montrent que les arbres fruitiers occupent la première place dans la SAU, suivis par les oliviers, les céréales, les cultures maraîchères et les vignes. Les autres cultures occupent des surfaces minimales une fois comparées à celles citées auparavant.

La comparaison des résultats de l'occupation du sol entre 1998 et 2010, montre une diminution de la SAU occupée par des cultures industrielles et les céréales de l'ordre de 6% et de 2% respectivement. Au contraire, en 2010, la SAU des arbres fruitiers et des légumineuses a augmenté de 5% et de 1,5% respectivement par rapport à 1998. Il est à noter que dans le recensement agricole de 1998, les cultures fourragères ne figuraient pas alors qu'elles ont été recensées dans le RGA de 2010.

Dans cet ensemble productif agricole, la Béqaa Centrale nous est apparue comme très significative pour analyser comment l'agriculture s'est développée ces dernières années en termes de pratiques agricoles, et en particulier dans le recours croissant aux engrais chimiques et aux produits phytosanitaires (PPS). Leur usage excessif, observé ces dernières années et résultant de pratiques agricoles de plus en plus intensives, a eu un impact significatif sur l'environnement.

En effet, comme nous le verrons, cette plaine présente à peu près toutes les différenciations décrites ci-dessus pour l'ensemble de l'agriculture libanaise, tout en possédant certaines spécificités qui vont accentuer encore son caractère exemplaire de région où s'effectue l'utilisation massive des PPS dans la Béqaa.

Enfermée entre les deux chaînes montagneuses de l'Anti-Liban et du Mont-Liban, la plaine de la Béqaa couvre une superficie de 429 097 hectares, soit 41% de la superficie totale du Liban. Cette plaine se divise en plusieurs zones caractérisées, chacune, par un climat, une altitude et des productions différentes. Cette variété de climats et d'altitudes constitue une source de richesse. Ainsi, la plaine de la Béqaa fournit une grande diversité de produits agricoles issus du maraichage, de l'arboriculture et de la viticulture, des céréales, les cultures fourragères ou de l'élevage (bovin laitier notamment). En outre, l'agriculture dans cette plaine représente une activité en forte expansion au cours de ces dernières années.

Le caza de Zahlé qui est notre territoire de recherche se situe à l'intérieur de la plaine ; C'est une région agricole par excellence regroupant une cinquantaine de villages dont 43 sont recensés dans le Recensement Général de l'Agriculture de 2010. La Superficie Agricole

Utile (SAU) totale atteint 20 844 ha dont 520 ha en jachères, soit l'équivalent de 2.3% de la SAU totale (RGA, 2010).

Cette zone présente une importante diversification avec des territoires variés. Elle compte 4 575 exploitations agricoles dont 4 015 très petites exploitations possédant un élevage hors sol et 307 exploitations pratiquant des systèmes mixtes. Les 560 exploitations restantes ne possèdent pas de terres mais pratiquent seulement l'élevage (Analyse des données, RGA, 2010).

Quant aux chefs d'exploitations, il est clair que les femmes ne représentent que 4% alors que 96% des chefs d'exploitation sont des hommes. Il est remarquable que les agriculteurs de la zone d'étude sont âgés (plus de 55 ans) et constituent presque la moitié des agriculteurs. Cette situation montre que l'installation des jeunes agriculteurs reste encore loin d'être achevée (Travail de terrain, F. Kanj, 2016).

Dans la Béqaa centrale, les familles sont en général importantes. Nous avons remarqué que les familles sont composées de 5 membres y compris le chef d'exploitation. La plus petite famille comprend trois personnes et la plus grande compte jusqu'à 14 personnes. Il est à noter que les familles nombreuses se trouvent dans les villages périphériques de la ville principale du caza qui est Zahlé (Travail de terrain, F. Kanj, 2016).

Etant donné que la ville de Zahlé est le chef-lieu de la Béqaa, les fonctions publiques et privées sont largement répandues et occupent une place importante du point de vue des activités à plein temps. Presque le tiers des agriculteurs de la zone travaillent à temps partiel.

En fait, le niveau d'éducation reflète l'état des agriculteurs. Comme ils sont âgés, plus que la moitié d'eux n'ont pas dépassé le niveau primaire (56%). Les autres ont acquis le niveau secondaire et très peu d'entre eux ont atteint le niveau universitaire.

Quant à l'occupation du sol, l'activité agricole est caractérisée par une large diversification de cultures. Elle est dominée par les cultures maraîchères (42% de la SAU), suivie par la céréaliculture (25% de la SAU), l'arboriculture y compris l'oléiculture (15%), la viticulture (8%), les autres cultures annuelles (6%) et enfin les cultures fourragères (4%) (Travail de terrain, F. Kanj, 2016).

Généralement, au Liban et spécifiquement au niveau de notre zone d'étude, la majorité des aménagements des terrains agricoles sont effectués par l'agriculteur lui-même. Aussi, notre territoire se caractérise par un nombre assez important d'entreprises phytosanitaires comparé à d'autres territoires ayant les mêmes caractéristiques.

La diversification et l'intensification de l'agriculture sont les facteurs les plus importants de notre recherche.

Dans cette zone sont pratiquées, d'une part les cultures céréalières en tête d'assolement à grande échelle, suivies par la pomme de terre et les cultures maraîchères, et d'autre part les vignobles et l'arboriculture fruitière.

Etant donné que les cultures maraîchères, les céréales et les arbres fruitiers sont largement présents dans notre zone d'étude, elles sont fortement consommatrices de produits phytosanitaires. L'existence dans le territoire d'étude d'un nombre important d'entreprises phytosanitaires, et ceci en comparaison avec d'autres territoires présentant des caractéristiques

communes dénotent de pratiques agricoles intensives qui sont aujourd'hui à l'œuvre (Travail de terrain, F. Kanj, 2016).

La concentration forte des cultures citées ci-dessus mène obligatoirement à la question des pratiques agricoles menées par les agriculteurs de la région et surtout en matière d'utilisation des fertilisants et des produits phytosanitaires. *Celles-ci exercent un impact sur les ressources naturelles et l'environnement, la santé des agriculteurs et des consommateurs libanais. Cette question constitue l'un des objets central de notre recherche.*

Structure de la thèse

Cette recherche est composée de trois parties.

La première partie intitulée «*Gestion raisonnée, évaluation du risque de pollution diffuse due aux produits phytosanitaires et outils d'aide à la décision*», comprend trois chapitres qui présentent l'état de l'art et une synthèse bibliographique des principaux axes de recherche dans cette thèse : (i) le concept de la gestion raisonnée en agriculture, (ii) les impacts de la pollution diffuse et la gestion des risques liés aux pratiques phytosanitaires et (iii) l'utilité des outils d'aide à l'évaluation et la gestion des risques d'utilisation des pesticides dans le but de prendre des décisions pertinentes.

Dans cette partie nous abordons tout d'abord la problématique générale. Ensuite dans le **premier chapitre** nous situons le concept de la gestion raisonnée en agriculture dans une histoire longue des pratiques et des techniques agricoles. Sachant que notre région d'étude fait partie intégrante des pays du croissant fertile, qui furent le berceau – au cours de la période néolithique - de l'agriculture, et le lieu où seront formulées les premières règles techniques de l'agriculture méditerranéenne, nous revisiterons l'histoire des révolutions techniques agricoles, afin de mieux comprendre les principes fondateurs de l'agriculture raisonnée. Le **deuxième chapitre** est consacré à la pollution diffuse et à la gestion des risques liés à l'utilisation des produits phytosanitaires. Ce chapitre montre les enjeux de la pollution diffuse liée aux pratiques phytosanitaires et les différentes méthodes et outils de gestion de cette pollution. Ce chapitre va nous permettre de déduire les différentes mesures de réduction des risques liés aux pratiques phytosanitaires et les indicateurs agro-environnementaux afin d'améliorer l'évaluation et la gestion de ces types de risque.

Le **troisième et dernier chapitre** de cette partie aborde la modélisation qui est un instrument d'évaluation de la pollution diffuse d'origine agricole par les produits phytosanitaires au niveau d'un territoire délimité. Ce chapitre traite l'évolution de la modélisation et décrit les différents types de modèles utilisés, les approches de modélisation relatives à l'espace, les nouveaux instruments utilisés en fonction des caractéristiques physico-chimiques afin d'évaluer la pollution diffuse d'origine agricole. Cette partie sur l'état de l'art et l'analyse bibliographique, nous servira à mettre en place une démarche méthodologique qui va être construite dans la deuxième partie.

La **deuxième partie** de notre recherche «*Développement d'une stratégie d'évaluation de risques de devenir des produits phytosanitaires dans la région du caza de Zahlé*» expose dans un premier chapitre (quatrième chapitre) les caractéristiques du territoire du caza de Zahlé et la caractérisation de son système agricole en justifiant notre choix de la zone d'étude en liaison avec les enjeux socio-économiques, environnementaux et sanitaire. Le **cinquième**

chapitre traite la démarche méthodologique adoptée dans ce travail. Dans ce chapitre sera exposée la démarche d'acquisition des données de terrain, d'élaboration de la base de données liée aux pratiques phytosanitaires au niveau du territoire d'étude et de la typologie spatialisée des systèmes de production. Nous développons ensuite, la démarche de choix des cultures les plus consommatrices des produits phytosanitaires et les produits les plus utilisés en appliquant l'indicateur de fréquence de traitement (IFT). Le **sixième chapitre** sera consacré à l'élaboration d'une description du modèle de devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement « PEARL ».

La **troisième partie** porte sur « *L'évaluation de risque de transfert des pesticides pour faire émerger des stratégies de gestion et d'aménagement du territoire : utilisation du modèle PEARL* ». Elle est consacrée à la présentation des résultats de la démarche méthodologique adoptée dans cette thèse. Cette partie est divisée en deux chapitres: le **septième chapitre** présentera les résultats de la typologie spatialisée qui a été décrite pour identifier les systèmes de production existant en tenant compte du facteur espace au niveau du territoire de recherche. Afin de situer et bien cerner notre recherche, une description de la situation socio-économique des agriculteurs, des pratiques agricoles et de la perception de ces agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires a été présentée aussi dans ce chapitre. De plus nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des impacts des itinéraires techniques (ITK) de traitement appliqués au niveau des exploitations enquêtées qui sont analysés à l'aide d'indicateur de pression phytosanitaire IFT. Le **huitième chapitre** montre ainsi les résultats retenus du modèle PEARL et le risque de chaque matière active la plus utilisée au niveau du territoire, sur la qualité du sol et des eaux souterraines, en fonction des cultures les plus consommatrices des PP, des types de sol existant afin d'identifier les zones vulnérables aux risques de la pollution diffuse par les PP.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale et une présentation des perspectives de la recherche.

PREMIERE PARTIE

**GESTION RAISONNEE D'EVALUATION DU RISQUE DE LA
POLLUTION DIFFUSE DUE AU PRODUITS
PHYTOSANITAIRES ET OUTIL D'AIDE A LA DECISION**

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE

Comme cela a été développé dans l'introduction générale, la question centrale de notre recherche concerne l'évaluation des risques des produits phytosanitaires et leur impact sur l'environnement afin de pouvoir aider les décideurs politiques à mettre en œuvre les outils et les méthodes capables de résoudre cette problématique émergente dans tous les pays et en particulier au Liban.

Cette question centrale nécessitait que nous nous forgions une problématique adaptée à son contenu, qui puisse rendre compte notamment de la forte articulation entre les éléments techniques, économiques, sociaux et environnementaux des transformations opérées dans l'agriculture de notre région d'étude et en particulier l'usage des produits phytosanitaires. La méthode d'observation et d'analyse des faits découle directement de cette problématique.

Mais cette analyse suppose aussi des outils de lecture qui soient adaptés. Nous avons donc développé dans les chapitres 1 et 2 les approches conceptuelles sur lesquelles nous nous sommes appuyés en termes de gestion raisonnée en agriculture et ensuite de la pollution diffuse.

Enfin, ces phénomènes apparus au cours du temps avec leur impact environnemental, sanitaire et humain nécessitent la mise en place d'un modèle qui prend en compte toutes les variables qui en découlent et par la suite appellent à se demander comment évaluer la pollution diffuse d'origine agricole.

PROBLEMATIQUE

En général, pour de nombreux pays, la sécurité alimentaire est le défi majeur que l'agriculture doit relever, tout en assurant la durabilité environnementale. L'intensification durable de la production et la prévention des pertes de récoltes sont des éléments clés pour augmenter les productions et garantir leur régularité, l'utilisation massive d'intrants (engrais, pesticides) est le plus souvent la solution la plus facile et la plus sûre à court terme.

Ces pratiques d'intensification entraînant des consommations parfois excessives d'engrais et de produits phytosanitaires ont un impact négatif sur l'environnement et la santé, ce qui pose aujourd'hui le problème de la durabilité de ces modes de production. Assurer la sécurité alimentaire par des processus d'intensification et la durabilité environnementale semblent être alors en opposition.

Les conséquences sur l'environnement et la santé humaine de l'intensification des pratiques agricoles avec l'utilisation croissante de produits chimiques ont amené la société civile et les pouvoirs publics à s'interroger sur la pérennité de ce système de développement et à interroger le monde scientifique pour proposer d'autres modes de production permettant un développement durable. Comment mettre en place des systèmes de production agricole durables dans les territoires, tout en répondant aux objectifs d'accroissement de la production pour assurer un niveau acceptable de sécurité alimentaire. Cette question aujourd'hui, s'inscrivant dans un contexte de changement climatique, est devenue centrale pour les responsables politiques. L'agriculture est associée à la notion de territoire, la durabilité

environnementale à une problématique collective, ce qui modifie les paramètres de formulation des actions de politiques publiques.

Aujourd'hui, nous sommes dans un contexte où la population est en constante augmentation : il y a 150 millions de naissance par an (FAO⁴, 2013) et le taux de natalité est d'autant plus élevé, surtout dans les pays pauvres où la sécurité alimentaire est absente. Aujourd'hui, nous sommes 7.5 milliards d'habitants au 1^{er} janvier 2018 sur la Terre. Selon les démographes de la FAO, nous serons 9 milliards en 2050.

Si nous comparons cette augmentation de population mondiale avec l'évolution des terres cultivables, nous constatons que les terres cultivables ont diminué parce que l'urbanisation s'étend de plus en plus. Selon la FAO, la croissance démographique mondiale entre 1995 et 2030 devrait mobiliser à elle seule 100 millions d'hectares supplémentaires de terre à des fins non agricoles. Si 1 hectare en 1960 pouvait nourrir 2 personnes, avec l'évolution démographique le même champ (1 hectare) va nourrir 4 personnes en 2006 et 6 personnes en 2050.

En partant de ce contexte, les problèmes liés à l'accroissement de la population, à son urbanisation, à l'absence de ressources pour prévenir les pertes avant et après récolte et les problèmes d'hygiène de l'environnement et de l'alimentation signifient que les systèmes alimentaires des pays en développement sont soumis à des tensions qui nuisent à la qualité et à la sécurité sanitaire des approvisionnements alimentaires. Les populations sont donc exposées à un large éventail de risques en matière de qualité et de la sécurité sanitaire des aliments.

Pour cela les consommateurs sont devenus plus exigeants en matière d'alimentation et veulent être protégés des risques liés aux aliments de qualité inférieure ou potentiellement dangereux. Les consommateurs attendent à ce que les aliments répondent à des normes en matière de qualité et d'innocuité et à certaines exigences en matière d'hygiène, d'étiquetage, de certification, d'additifs alimentaires et de résidus de pesticides. Mais les pays en sous-développement utilisent plus de 20% des pesticides à l'échelle mondiale et cette utilisation est en augmentation (OMS⁵ et PNUD⁶, 1990).

Depuis qu'ils pratiquent l'agriculture, les humains ont tenté de protéger leurs récoltes des ravageurs nuisibles qui assaillent depuis toujours leurs denrées. « De manière générale, un ravageur est n'importe quel organisme causant des dégâts économiques aux cultures et aux animaux domestiques, ou qui est nuisible à la santé humaine » (Dempster, 1975). De ce fait, les mauvaises herbes, les insectes, les nématodes, les champignons, les bactéries, les virus, etc., sont des ravageurs lorsqu'ils nuisent au rendement dans les champs ou lorsqu'ils altèrent la qualité des récoltes pendant leur entreposage (Bourgeault, 2009).

Selon la FAO, les ravageurs coûtent des milliards de dollars en production agricole perdue chaque année. De plus, et surtout pendant l'entreposage, au moins 10% des récoltes mondiales sont détruites, principalement par les rongeurs et les insectes. Dès les années 70, les maladies ont détruit la plupart des récoltes des pays du monde. Pendant cette même

⁴ Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

⁵ Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

⁶ Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD)

période, un sixième de la récolte de maïs a été détruite aux Etats-Unis. Plus tard durant cette même décennie, Java a perdu 70% de sa récolte de riz à cause des cicadelles brunes tandis qu'au Texas, une attaque de lucilies bouchères a coûté 375 millions de dollars. De même, les producteurs de pomme de terre du monde ont dépensé environ 1,6 milliard de dollars par an pour combattre le champignon qui avait causé la famine en Irlande vers 1840.

L'utilisation des produits phytosanitaires ou des pesticides vient comme un secours pour les producteurs qui ont comme rôle de prévenir, détruire, attirer, repousser tout élément nuisible : plante, champignon, insecte, mammifère... durant la production, l'entreposage, le transport, la distribution et la transformation de denrées alimentaires, de produits agricoles ou d'aliments pour animaux (codex alimentaire FAO/OMS, 1994 et Organisation Mondiale de la Santé).

L'utilisation des produits phytosanitaires a été multipliée par 32 entre les années 1950 et 1986 dans tous les pays, et il est à noter que les pays en développement utilisent plus de 20% de tous les pesticides consommés dans le monde (FAO).

Par contre, cette augmentation de l'usage de pesticides et leur utilisation excessive et mal gérée va aboutir à des conséquences très graves au niveau agronomique, sanitaire, environnemental et économique.

De plus, la présence de faibles quantités de résidus dans les aliments peut entraîner des risques pour la santé à long terme. Ces nuisibles peuvent endommager la récolte en causant des dommages physiques et esthétiques, en étant vecteur de pathogènes, en plus de créer des externalités environnementales liées à leur destruction par une lutte chimique c'est-à-dire des effets non désirés tels que la pollution diffuse et/ou directe de l'environnement (Norris *et al.* 2003).

Au fil du temps, plusieurs pratiques agricoles ont été développées dans le monde afin de contrer ou de diminuer les dommages telles que la rotation des cultures, la mise en jachère de la terre, la collecte d'insectes ravageurs, l'arrachage des mauvaises herbes, la destruction des plantes contaminées, la mise en place d'épouvantail, l'application d'extrait de plantes et de pesticides, le développement des variétés résistantes (Bourgeault, 2009).

Depuis des décennies, l'agriculture libanaise a vécu des périodes excessives d'utilisation des produits phytosanitaires et d'engrais chimiques. Le Liban s'est retrouvé ainsi au premier rang des consommateurs des pesticides dans les pays arabes avec 5.5 kg/ha (Rifai, 2013). Quant au niveau des pays du pourtour méditerranéen, ramené à l'hectare en production, le Liban est également un très gros consommateur d'engrais chimiques. Enfin au niveau international, le Liban est classé parmi les pays du monde qui consomme plus de deux fois la quantité moyenne d'engrais (FAO, 2013).

En se basant sur ces quelques chiffres, il apparaît impératif que la question de la pollution diffuse d'origine agricole des ressources en eau et en sol soit traitée de manière approfondie. En effet, plusieurs études au Liban ont traité la question de la pollution diffuse excluant l'origine agricole et plus particulièrement l'impact de l'utilisation des produits phytosanitaires. Cependant les études autour de la question de la pollution diffuse d'origine agricole restent très rares.

En 2004, une étude, réalisée par Jean-Claude Mantigaud pour l'Union Européenne et la FAO⁷ portant sur le risque des pesticides sur la santé humaine, avait évalué qu'environ 40% des fruits et des légumes au Liban contiennent des résidus de pesticides au-delà des normes autorisées.

En 2009, une étude a été faite par l'Université libanaise révélant la présence de résidus de pesticides parfois 25 fois plus élevée que la norme internationale dans certains fruits et légumes (Rozelier, 2011).

En 2012, une étude réalisée par Youssef *et al.* a porté sur une analyse de détection des pesticides dans différents échantillons des eaux de surfaces et des eaux souterraines dans le sud du Litani. Ce travail a montré l'existence des pesticides interdits et principalement les organochlorés, tels que l'aldrine, l'heptachlore époxyde et DDT qui persistent dans l'environnement aquatique du Sud du Litani. Les pesticides DDE et HCB étaient les plus fréquemment détectés dans les eaux surfaces (93,3%) et dans les eaux souterraines (100%). La concentration de DDE a dépassé 100 ng/l dans les eaux de surface et souterraines en octobre 2012. En conséquence, un suivi régulier des pesticides devrait être effectué sur une longue période de temps et avec une fréquence élevée pour tenir compte de toutes les variations saisonnières afin d'établir des règlements pour réduire l'utilisation des pesticides afin de diminuer les impacts sur l'environnement et la santé humaine.

En 2016, une étude réalisée par Chbib *et al.* a porté sur l'évaluation de la contamination des eaux souterraines par les pesticides organochlorés sur la zone de Akkar au Nord du Liban. Les résultats de cette étude ont montré une contamination très importante de l'eau par les pesticides organochlorés notamment le DDT et les HCH qui sont interdits au niveau international depuis des décennies.

D'après tout ce qui précède et dans ce contexte, l'évaluation des risques des produits phytosanitaires et leur impact sur l'environnement apparaît comme une nécessité pour évaluer la durabilité de l'agriculture libanaise. D'où la question qui se pose « Quels outils et méthodes doivent mettre en place les décideurs dans les territoires pour résoudre ces problèmes? ».

Il faut donc aujourd'hui construire des démarches de gestion intégrée et collective de l'agriculture dans ses territoires, en prenant en compte les acteurs locaux et les potentialités et les spécificités de l'environnement physique. Pour construire un projet collectif, il est donc nécessaire de comprendre les représentations que les usagers et parties prenantes dans la gestion et l'utilisation de l'écosystème se font de sa dynamique et des interactions entre règles d'usages et comportements des acteurs locaux.

Le cadre de travail se situe à l'interface de différents champs scientifiques: agronomie, géographie et économie. Une modélisation du fonctionnement du territoire comme instrument de support au dialogue semble être appropriée pour une telle démarche. Il doit permettre de simuler différentes alternatives et d'envisager des regards croisés. L'objectif est de pouvoir construire une méthode d'élaboration de plans stratégiques agricoles permettant de poser les fondements d'une politique publique territorialisée.

⁷ Jean-Claude Mantigaud, 2004, « Les filières fruits et légumes frais au Liban : structures, fonctionnement et perspectives ».

CHAPITRE I

CONCEPT DE LA GESTION RAISONNEE EN AGRICULTURE

L'agriculture raisonnée, qui a pour objectif d'adapter les apports en éléments fertilisants aux besoins réels des cultures en tenant compte des éléments présents dans le sol et du rendement potentiel de la plante, s'inscrit dans une histoire longue de l'agronomie.

De l'invention de l'agriculture au cours de la période néolithique aux révolutions agricoles survenues entre le XVIII^{ème} et le XX^{ème} siècle de notre ère, les agriculteurs et les agronomes ont recherché les moyens techniques autorisant l'amélioration de la production agricole en tirant le meilleur parti de la fertilité des sols. Si les travaux des sols leur sont apparus comme un des moyens efficaces pour atteindre cet objectif, historiquement, les systèmes de culture avec jachère, ceux sans jachère et ensuite ceux ayant recours aux fertilisants chimiques et produits de traitements phytosanitaires *ont été retenus comme les principales techniques adaptées d'enrichissement de la fertilité des sols et de conservation des plantes.*

Les découvertes scientifiques sur la nature de l'air, de l'eau et du sol vont aboutir au XIX^{ème} siècle à des orientations techniques nouvelles⁸. Elles se fondent sur une analyse du système sol-plante et des substances (minérales) susceptibles d'en accroître la fertilité. La théorie de la nutrition minérale qui a prévalu à partir de 1840 (Julius Liebig) a conduit à un emploi systématique d'engrais minéraux. C'est cette théorie qui est à la base du développement de la chimie agricole au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle et qui a servi à faire émerger de nouveaux paradigmes scientifiques à la base de l'agronomie, dont les principes et connaissances validées feront l'objet d'un enseignement scientifique dans le premier institut européen d'agronomie qui se crée dès le début du XIX^{ème} siècle (1806). Ces découvertes mettent fin aux disettes et famines dont l'Europe avait été le théâtre. Les progrès réalisés dans l'usage des engrais et pesticides au XX^{ème} avaient réussi à nourrir les hommes mais au prix de menaces portant sur les sols, l'eau et la qualité des aliments produits. Ce sont ces pratiques non contrôlées portant à la fois atteintes à l'environnement et à la santé des populations qui conduiront à la formulation de politiques nouvelles et à la promotion d'une agriculture raisonnée.

Nous nous proposons dans ce chapitre de revisiter l'histoire de ces pratiques agronomiques. Nous rappellerons les premiers progrès réalisés par l'humanité, notamment en Méditerranée, dans l'invention de l'agriculture (section 1) en mettant l'accent sur les étapes relatives aux techniques de la fertilité des sols et de conservation des plantes, les principes arrêtés par les agronomes gréco-latins et arabes recommandant des techniques de culture avec jachère (section 2), les révolutions agricoles et leurs conséquences (sections 3 et 4), leurs limites et les moyens mis en œuvre pour les surmonter par des politiques agro-environnementales pour enfin asseoir les principes fondateurs de l'agriculture raisonnée (section 5).

Ce rappel historique permettra de mieux situer à la fois les enjeux mais aussi les défis posés au développement de l'agriculture raisonnée.

⁸ Question de l'humus traitée par Nicolas-Théodore de Saussure en 1804 dans son ouvrage intitulé *Recherches chimiques sur la végétation*. Les controverses scientifiques aboutiront à fonder la chimie agricole dont le père fondateur est l'allemand Julius Liebig (« *Traité de chimie organique* », 1840). Cette discipline va jouer un grand rôle dans le développement des productions agricoles. Voir à ce sujet Robin, P, Aeschlimann, JP, Feller, Ch (Editeurs scientifiques) (2007). Histoire et agronomie : entre rupture et durée. IRD, Collections

Toutes les sociétés humaines ont été historiquement confronté dès leur apparition à un défi majeur qui était celui de leur alimentation afin d'assurer leur reproduction. Au cours de la période néolithique émerge, ce que Marcel Mazoyer (1997) appelle *la première révolution apparue dans l'histoire de l'humanité et qui correspond à l'invention de l'agriculture*⁹.

1. La révolution du néolithique : l'invention de l'agriculture en Méditerranée

Dans les régions de la Méditerranée, au cours de la période néolithique (10 000 ans avant J-C), l'homme parvient à engager la transition d'une économie faite de chasse et de cueillette à une économie où il domestique quelques plantes et des animaux destinés à son alimentation. Il inaugure un processus d'invention de l'agriculture qui se traduit par la dissémination d'espèces vivrières annuelles et de légumineuses qui modifient les paysages naturels initiaux de Méditerranée. Nous assistons ainsi à l'introduction de plantes pérennes (arbres fruitiers et vignes) dans l'est méditerranéen et au Moyen-Orient, au développement de la polyculture dans de nombreuses régions ce qui a pour conséquence la création de prairies encloses, de champs cultivés et de terrains de parcours gagnés sur la végétation naturelle. L'agriculture et l'élevage occupent une part importante des meilleures terres de plaines et de collines, prises sur les forêts et ses formes de dégradation (garrigue et maquis). Trois étages de la végétation spontanée méditerranéenne sont concernés¹⁰ (Albertini, 2009):

- l'étage thermoméditerranée¹¹ avec la présence de l'olivier, du caroubier, du palmier-dattier, des agrumes, du maraîchage, de la canne à sucre, et cotonnier avec l'irrigation;
- l'étage mésoméditerranée¹² dominé par les céréales, les légumineuses, les vignes, oliviers, arbres fruitiers dont le noyer et le cédrat, et plus tardivement les agrumes, riz, kiwi...);
- et l'étage supraméditerranée¹³, espace des arbres fruitiers, des vignes, du maraîchage, des céréales, du châtaignier, de l'élevage bovin et ovin.

La transition vers l'agriculture va être amorcé avec le néolithique.

⁹ Mazoyer, M, Roudart, L . (1997). *Histoire des agricultures du monde : du néolithique à la crise contemporaine*. Editions du Seuil. Paris

¹⁰ Albertini, L (2009). « *Agricultures méditerranéennes* ». Editions Actes Sud

¹¹ Tous les étages de la végétation sont décrits dans l'ouvrage d'Albertini, opus cité. Ainsi, l'étage thermoméditerranéen, connaît une température moyenne annuelle située entre 17 et 19° C et une moyenne des températures minimales du mois le plus froid située entre 4 et 10°C. Ligne Barcelone, Naples, Izmir. 600 à 1200m d'altitude. Zone du caroubier, du lentisque, palmier nain ou doum, chêne vert, arbusier, cyprès, pin d'Alep

¹² Cet étage mésoméditerranéen est défini par une température de 13 à 17°C et une moyenne minimale comprise pour le mois le plus froid entre -1 et 4°C. La végétation de cet étage est présente au Nord, du bord de mer à 400-800m d'altitude selon les conditions climatiques et les expositions et au Sud, elle succède en altitude au thermoméditerranéen, atteignant 1000 à 1200 m au Maghreb, en Crète ou à Chypre, le midi de la France. Zone du chêne vert, olivier, vigne, chêne liège...

¹³ Cet étage supraméditerranéen est situé au Nord avec une température annuelle moyenne de 8 à 13°C et une moyenne de température minimale du mois le plus froid située entre -4 et -1°C, la végétation fait transition entre la végétation mésoméditerranéenne et les végétations atlantique et médio-européenne. Occupe les zones collinéennes et de basse montagne au-dessus de l'étage mésoméditerranéen, (chêne pubescent, chêne zen, châtaigner, pin sylvestre, pin noir...

1.1. Les débuts de l'agriculture méditerranéenne

Au Moyen-Orient, la phase de mise en culture a commencé vers 9000 à 8500 avant notre ère à partir de plantes vivrières spontanées dont on a exploité les qualités nutritives et la facilité de récolte. Des améliorations techniques sont apportées dans l'art de la culture, de la récolte et de la conservation des graines dans la lutte contre les prédateurs.

Des vestiges archéologiques témoignent de restes de végétaux et de traces de meules qui signent les premières activités de populations sédentaires cultivant des plantes spontanées et les transformant pour se nourrir. Les chasseurs-cueilleurs exploitent des plantes sauvages (ancêtres du maïs et des blés ou orge) qu'ils vont progressivement domestiquer et 9000-8500 avant notre ère et fabriquer des outils (faux à lame de silex fixée sur du bois ou un os, panier, pilon, meule, silos à grains). Les sites de Jéricho dans la vallée du Jourdain et de Pétra (actuellement située en Jordanie) révèlent des traces d'une domestication des animaux et de la naissance de l'élevage vers 7000-6500 avant JC. C'est dans cette région que les principes agronomiques sont compilés dans ce qui deviendra le livre de l'agriculture nabatéenne, qui connaîtra une fortune, car il inspirera de grands auteurs et sera repris par les agronomes arabes et andalous.

Dans l'est méditerranéen et au Moyen-Orient, la domestication de plusieurs légumineuses vivrières annuelles (lentilles, fèves, pois, vesces) est presque aussi ancienne que l'orge. La culture de la lentille est notée en Syrie (-8500), en Turquie (-6500), en Iran, en Grèce et en Egypte (-4500). La fève améliorée est avec la lentille une nourriture de première nécessité. On la retrouve au Moyen-Orient, en Egypte, dans les Balkans et en Afrique du Nord entre -8000 et -4000. Hérodote l'évoque dans son œuvre et Homère la signale dans l'Illiade (900 av. JC). Le pois chiche (-6500) est domestiqué en Turquie avant de se diffuser sur le pourtour méditerranéen vers -5500. Certains sites de l'Hérault la signalent vers -6800. Les légumineuses fourragères sont signalées dès la première révolution agricole (-7500).

Céréales, légumineuses, plantes maraîchères suivies de l'élevage des moutons, des chèvres, du porc et des bœufs en provenance du Taurus oriental font l'objet d'une domestication de mieux en mieux maîtrisée. La luzerne est introduite en Grèce 5000 ans avant notre ère, et les arbres fruitiers seront entretenus via des techniques plus sophistiquées par des néo-agriculteurs sédentarisés regroupés collectivement dans des villages.

Autour de 2000 à 2500 avant JC, l'on a aussi exhumé des traces écrites de domaines agricoles constitués avec des plantations d'arbres fruitiers. Les auteurs grecs (Homère, Virgile, Xénophon) et romains (Columelle, Plin l'Ancien, Varon, Caton...) nous informent dans leurs œuvres sur les cultures, les innovations techniques, l'introduction de nouvelles cultures, le stockage... Comme le note Louis Albertini « *nulle part, excepté en Chine, on ne dispose d'une telle qualité d'informations pour rendre compte de l'agronomie antique* ».

Les cultures emblématiques méditerranéennes sont durablement installées dès cette époque de l'histoire : céréales, légumineuses, olivier et vigne.

Au néolithique, en trois millénaires, le Proche et Moyen-Orient proposent au bassin méditerranéen et à l'Europe en cours de repeuplement, les techniques céréalières et de légumineuses ainsi que les méthodes de culture et d'élevage des grands animaux. L'on estime

que, dans le Sud de l'Europe, la densité de population serait passée de 1 à 50 habitants pour dix kilomètres carré. Notons que la diffusion des langues indo-européennes s'est faite parallèlement, à celle de l'agriculture, à partir des foyers de naissance de l'agriculture et de l'élevage. D'autre part, Jéricho, dans le Croissant fertile, serait le foyer des langues anciennes égyptienne et maghrébine qui se sont vraisemblablement établies lors de la diffusion de l'agriculture au Sud de la Méditerranée (Albertini, 2009).

Des principes de l'agriculture nabatéenne (III^{ème} siècle av JC) et arabe (IX^{ème} au XIV^{ème} siècle)

Du III^{ème} au I^{er} siècle avant JC (domination romaine en 106 après JC), les nabatéens sont pendant plus de 4 siècles les maîtres d'une vaste région comprenant le Sud de la Syrie et de la Jordanie actuelle, les confins sud-ouest de la Mésopotamie, le Néguev, le Sinaï et le Hidjaz au Nord-ouest de la péninsule arabique qui est aussi le lieu d'une activité commerciale caravanière. En Méditerranée orientale, le développement de l'agriculture se fait sous l'impulsion des Egyptiens, des Mésopotamiens puis des Nabatéens.

Ces derniers inventent les premiers principes de l'agriculture méditerranéenne qui serviront de référence à leurs successeurs grecs (en particulier Aristote, Théophraste), latins (Columelle, Pline l'Ancien, Virgile...) et arabes (Ibn Wahschiyya et Ibn El Awwam)¹⁴.

Dans une région déficitaire en eau, les Nabatéens réalisent, avec intelligence et imagination, une grande diversité d'installations pour abreuver le bétail et arroser les jardins et vergers.

Les connaissances agronomiques sont compilées par l'agronome babylonien *Quthâma* aux III^{ème}-IV^{ème} siècle de notre ère et traduite du syriaque à l'arabe par *Ibn Wahschiyya* en 902. Cette agriculture nabatéenne (*kitab el fillaha nabatiyya*) rassemble les savoirs agronomiques et économiques de la Mésopotamie et de l'Orient préislamique (Malassis, 2004).

L'agriculture nabatéenne sert de source primordiale et de référence permanente à l'école agronomique arabe d'Al Andalus (du XI^{ème} au XIV^{ème} siècle) (Bolens, 1981) : *Ibn Wafid*, *Ibn Hajjaj El-Ichbili*, *Abû Kheir*, *Ibn Bassal*, *Al Tighnarî* et durant la deuxième moitié du XIII^{ème} siècle *Ibn Awwâm*. Ces traités étudient dans le détail le climat, les sols, l'eau, le génie hydraulique et l'irrigation, les techniques agricoles, la fumure, le choix des terrains en fonction des cultures, la gestion des exploitations agricoles, la culture et la prophylaxie des plantes pérennes et annuelles. Sont traités les plantes florales, les arbustes à essence et d'ornement, les arbres fruitiers, les arbres non fruitiers, les céréales, légumineuses, les plantes à fibres, les légumes ; des éléments de botaniques y figurent aussi.

L'on observe la diffusion de plantes sur tout le pourtour méditerranéen : blé et orge du Moyen-orient, sorgho venu d'Afrique, riz originaire de Chine (Fayoum en Egypte, sud du Maroc mais surtout en Andalousie)- et diffusé en Camargue dès le XVII^{ème} siècle par Sully, le figuier (originaire de Syrie, d'Iran, de Mésopotamie et de Phénicie), les agrumes venus de l'Inde.

¹⁴ *L'Économie* d'Aristote, Théophraste, *Les Géorgiques* de Virgile, *Res Rustica* de Columelle, « *Histoire naturelle* » de Pline l'Ancien.

1.2. Les principes des systèmes sans jachère : une tradition agronomique ancienne

Bien avant le déclenchement de la première révolution technique agricole consistant à limiter la place des jachères et la mise en culture sur les surfaces libérées de plantes sarclées ou de prairies artificielles favorables au développement de l'élevage et à la production de fumier, les bienfaits des rotations alternant céréales et cultures fourragères étaient connus depuis la haute Antiquité.

L'héritage agronomique gréco-latin

Comme le note Marcel Mazoyer dans son *Histoire des agricultures du monde*, « en Egypte, où l'on manquait de pâturages naturels, on cultivait le trèfle une année sur deux, en alternance avec le blé ou l'orge ». Cette culture améliorait, d'une part, la fertilité du sol, et permettait, d'autre part, de nourrir le bétail et de fournir du fumier, que l'on affectait principalement aux cultures irriguées. Cette tradition qui s'est maintenue et développée en Egypte aux époques grecque, romaine, byzantine et arabe, a été transmise en Europe : les anciens grecs ne l'ignoraient pas (Théophraste). *L'Économique* d'Aristote note par exemple, quelques préceptes-clés sur le choix des terres (XVI) : « *Ce n'est point en plantant selon nos besoins que nous obtiendrons de meilleures récoltes ; c'est en examinant ce que la nature aime produire, à nourrir en son sein... même en friche, elle indique encore sa nature. Si sa végétation naturelle est belle, elle vous donnera, bien cultivée de belles récoltes* », sur leur entretien (XX), « *quels soins demande un terrain trop humide... c'est par des tranchées qu'on facilite l'écoulement des eaux ; que l'on corrige un terrain imprégné de trop de sels, en y mêlant des substances non salines, humides ou sèches* », sur le labour (XVI) : « *Je suis convaincu qu'il n'est pas de meilleur moyen que de labourer au fort de l'été et au milieu du jour* », et sur les mauvaises herbes (XVI) : « *Les mauvaises herbes, coupées par la charrue et recouvertes ensuite, servent d'engrais sans répandre de graines qui les reproduisent* ». Les agronomes latins (Columelle) préconisaient de faire alterner sur les meilleures terres une culture de céréales et une culture de légumineuse et les agronomes andalous arabes en vantaient aussi les mérites.

Tous ces préceptes et notamment ceux relatifs aux techniques d'enrichissement et de conservation de la fertilité des sols seront repris, commentés et développés par les agronomes arabes et andalous.

Que nous enseigne l'agronomie arabe ? Le système des jachères

Les agronomes arabes vont compiler les œuvres grecques et prendre un soin particulier à exhumer et diffuser les connaissances agronomiques consignées dans les *principes de l'agriculture nabatéenne*¹⁵. Des traités d'agricultures arabes qui nous sont parvenus contiennent à la fois les vieux principes, mais témoignent aussi des progrès enregistrés dans l'acclimatation de nouvelles plantes, l'amélioration des techniques de culture et d'élevage, des méthodes d'irrigation et de développement des cultures intensives¹⁶. Ces traités nous

¹⁵ Le nom de nabatéens serait celui des habitants primitifs de la Chaldée, population arabe qui occupait une partie de l'actuelle Jordanie et dont Pétra fut la capitale.

¹⁶ Le "livre de l'agriculture" ou « Kitab-el-filaha » d'Ibn-El-Awam composé au XII^e siècle de l'ère chrétienne. Il est connu et largement cité par Ibn-Khaldoun (qui fut d'origine andalouse). Principes de l'agriculture nabatéenne sont repris par Ibn

renseignent, non seulement sur l'état des sciences agronomiques, mais ils décrivent aussi les outils de travail, les méthodes de culture et recensent les espèces animales et végétales des régions méditerranéennes. Ils sont incontournables pour faire l'inventaire des progrès réalisés pour accroître l'efficacité agricole¹⁷.

Il faut bien admettre que nous sommes bien loin d'avoir recensé tous les fragments de connaissances que les traités d'agronomie fournissent pour décrire l'univers technique, matériel et culturel des paysanneries arabes. L'une des principales références de cette école d'agronomie arabes est *Ibn Wahshiyya* (IX^{ème} siècle), dont l'oeuvre est lue et complétée par *Ibn El Awwam* (XII^{ème} siècle) dans son livre de l'agriculture (*Kitab El Filaha*). Ces oeuvres sont comme le souligne Lucie Bolens (*agronome andalous du Moyen-âge*) « *un extraordinaire réceptacle des pratiques d'agriculture, justement admiré par les agronomes andalous des XI^{ème} et XIII^{ème} siècles* » (p.192).

Ces livres consignent le rôle de la jachère, les travaux culturaux (de labours en particulier) et les soins apportés à la fertilisation : utilisation des fumures, destruction des mauvaises herbes. Ils notent les méthodes utilisées afin de refertiliser le sol en transformant les champs en luzerne ou en introduisant le trèfle d'Alexandrie. L'agriculture continue connaît la possibilité de survie par rotation lente des champs vers les zones en friche.

L'on signale dans ces ouvrages le rôle de la jachère travaillée afin de briser la croûte superficielle et d'empêcher les mauvaises herbes : « *l'on pense ... que les labours ont pour but d'aérer le sol, qui d'une part, s'enrichit en azote atmosphérique, et d'autre part, forme une couche isolante entre le sous-sol frais et l'atmosphère estivale surchauffée. Quoi qu'il en soit, les rendements s'en trouvent accrus* » (Ibn Awwam 1,1, p 28).

L'on évoque aussi la place des légumineuses dans la rotation des cultures et leur rôle agronomique. Les légumineuses sont employées pour faire l'économie d'un temps de jachère et d'une fumure. Jachère travaillée, elle est cultivée en vue d'accroître la récolte principale de blé, qui succédera. Les travaux des agronomes andalous s'appuient sur les avancées de la botanique dont les représentants sont les botanistes et pharmacologues *Ibn Baytar*, *Abu Al Abbas al Nabati*, *Ibn Al Rumiyya* (Bolens, 1981). Les recommandations relatives au rôle de la jachère sont ainsi fondées sur une connaissance botanique des plantes et sur une observation fine des résultats... Les savants arabes concluent, en effet, que certaines cultures de graines et de légumes procurent du repos au sol, surtout nécessaire après l'orge et le blé qui l'épuisent. « *Non seulement ces deux céréales devraient être alternées mais encore on les fera précéder et suivre de culture qui restituent au sol sa «force nutritive»*. Les légumineuses sont utilisées à des fins agronomiques tout en restant une production alimentaire fondamentale pour les communautés humaines (Bolens, 1981).

Le rapport agronomique repos/légumineuses/céréales est très clairement exprimé dans les manuels d'agronomie arabes qui puisent dans les expériences des pays d'Orient.

Wahshiyya et Ibn-El-Awwam. Ils résument à l'époque où ils écrivaient les principales connaissances agronomiques accumulées en Méditerranée. Voir l'oeuvre d'Ibn El Awwam dans la réédition assurée par Bouslama, Tunis, 1977.

¹⁷ Ibn-El-Awwam, Kitab-el-filaha, voir en particulier les chapitres XXIX et XXX.

La supériorité agronomique des andalous médiévaux par rapport aux romains (Columelle, Pline l'Ancien...) est donc due essentiellement au développement de la botanique entre le II^{ème} et le IX^{ème} siècle après J-C.

A travers la variété des successions de cultures possibles, une constante se dégage ; légumineuses et légumes, fourrages et plantes alimentaires pour l'homme, les cultures de printemps qui peuvent réduire et même supprimer la jachère doivent, par leurs racines courtes, assurer la refertilisation du sol pour le froment et protéger le champ de leurs feuilles contre l'aridité estivale.

L'utilisation des cultures dérobées s'inscrit dans la même préoccupation agronomique. Les légumes, en culture de plein champs comblent les intervalles et peuvent être cultivés n'importe quand, mais particulièrement en été à titre de cultures dérobées. Dans ce rythme biennal dominant, la jachère travaillée joue un rôle positif.

L'empirisme paysan, ignorant les causes scientifiques, sait constater les résultats. On sait aujourd'hui que la pluie fournit au sol l'azote ammoniacal apte à être nitrifié et le labour donné à la jachère facilite la nitrification.

L'eau d'irrigation est considérée comme un complément indispensable à la fumure. Elle permet l'enrichissement des sols irrigués par les matières limoneuses en suspension. Il est impossible de fumer les sols pour certaines cultures. Les agronomes arabes notent l'importance de l'irrigation pour les semis et les transplantations car tout ce qui se sème a besoin d'irrigation et de beaucoup de soins. L'irrigation est une condition nécessaire de l'acclimatation des espèces montagneuses : cela suppose une connaissance du cycle de la croissance et de la fructification de la plante.

« L'Orient et les travaux des contemporains servent de référence livres que tandis que l'adaptation aux conditions locales, aux sols, aux espèces, met en valeur les spécificités de cette irrigation hispano-mauresque, minutieuse, intensive, où les besoins de chaque espèce en eau et le moment où il faut le prodiguer ne sont pas de simples corollaires : une fois de plus et plus que jamais, ce sont les connaissances scientifiques accrues des agronomes arabes médiévaux qui permettent d'établir en quoi réside le progrès par rapport au passé romain et préromain » (Bolens, 1981).

La pratique régulière de la fumure permet de donner à l'irrigation toute son efficacité. L'on fait un usage des cendres pour les légumes (afin de combattre les parasites). Il est généralement mélangé avec un fumier humide *« pour neutraliser l'effet nuisible de la sécheresse »*.

Le principe de base qui est retenue est que « la plante nourrit la plante » : la cendre est une plante calcinée ; l'on fait aussi un usage agronomique des pailles (considérées comme engrais simples) et l'on recommande l'enfouissement des chaumes pour la fertilisation. Toutes les tiges, feuilles, souches, racines et fruits pulvérisés peuvent être utilisés seuls comme engrais simples

En Orient on fait engrais de tout végétal, et la fumure parfaite est le mélange de l'élément végétal et animal, et l'engrais par excellence est celui où entre la matière animale (fiente de pigeon, crottin). Dans la lutte contre les parasites et les bêtes nuisibles, tels que les vers, les

fourmis, les chenilles, pucerons, rats taupes, oiseaux, l'on a recours aux fumigations, aux utilisations de marc d'huile d'olive et aux plantes amères.

Les progrès sont réalisés dans la petite hydraulique et la connaissance des sols, les travaux aratoires et l'engraisement des champs. *L'on relève en dernière instance le surprenant résultat d'une agriculture fondée sur la rotation biennale qui ne se concevait pas sans l'amorce d'une succession plus riche, où l'orge de printemps, les légumineuses binées et les raves en cultures dérobées, puisant à des couches successives les substances nécessaires à leur développement, donnent en fait un système de culture complexe fondé sur des connaissances botaniques de haut niveau.*

Ces principes d'agronomie arabe se diffuseront dans les pays du Maghreb, et Ibn Khaldun témoignera dans sa *Muqqadima* des progrès qui en sont issues dans les riches plaines du *fahç* (plaines qui environnent les cités urbaines) des trois pays du Maghreb où s'installeront les familles andalouses expulsées d'Espagne entre le XI^{ème} et le XIV^{ème} siècle.

L'usage des jachères et les travaux culturaux qui les accompagnent sont mis en œuvre dans l'Europe médiévale. Les limites de ces jachères qui sont observés conduiront à des changements de paradigme technique dans l'agriculture.

La première révolution technique agricole qui s'annonce assez tôt dans certaines régions d'Europe, se généralisera entre le XVII^{ème} et le XIX^{ème} siècle. La croissance démographique, l'essor commercial et industriel conjugués à des réformes juridiques et économiques portant sur les modes de propriété et de circulation des biens favoriseront sa diffusion et sa pénétration dans les campagnes françaises (Regnault *et al*, 2012).

2. La révolution fourragère, première révolution technique agricole

Avant que l'agriculture n'utilise massivement du fumier ou de l'engrais, la jachère était un élément central pour maintenir la fertilité du sol. Cette dernière, qui occupait encore une très large place dans les anciens systèmes à rotations triennales (alternance sur trois ans : blé—orge ou avoine ou légumineuse—jachère courte) et biennales (céréale—jachère), permettait aux paysans d'exercer en Europe leurs droits de faire paître librement leurs animaux (droit de « vaine pâture »). Par ailleurs, le fumier apporté par les animaux reconstituait progressivement la fertilité des sols, la préparant pour la culture suivante.

2.1. Les innovations techniques de la première révolution agricole

La première révolution agricole, dite « *révolution fourragère* » est marquée par l'abandon de la jachère et la mise en œuvre d'assolements faisant se succéder cultures céréalières et cultures fourragères et légumineuses. Elle se caractérise également par l'amélioration des semences et des animaux, la mise au point et l'utilisation d'outillages plus perfectionnés (charrues, semoirs, faux, etc...), et enfin, une intégration de l'élevage à l'agriculture. La plupart des historiens qualifient cette première révolution agricole à celle liée aux bouleversements de ce secteur qui débutèrent en Angleterre vers 1680/1700 et qui s'étendirent à d'autres pays développés à partir de 1770/1810. Les prémices ainsi que les méthodes d'agriculture intensive sont observées en Italie et aux Pays-Bas dès le XVI^{ème}. Elles se

généralisent en Angleterre au XVIII^{ème} siècle, à travers la mise en œuvre ce qui est appelé l'assolement dit du « Norfolk¹⁸ » (blé, navet fourrager, orge, luzerne ou trèfle), mais aussi de la vallée du Rhin en Allemagne, de l'Ile-de-France, de l'Ebre en Espagne à l'ensemble de l'Europe du Nord-Ouest. Sur l'ensemble de ces pays et régions, la culture de légumineuses fourragères se développe, de sorte que vers le milieu du XVIII^{ème} siècle, l'agriculture européenne offre un paysage agraire très diversifié et des aires de spécialisation exprimant de nouvelles formes de modernité agricoles.

Il faut rappeler que cette première révolution agricole est fondamentalement caractérisée par la disparition de la jachère et son remplacement par des cultures fourragères et des prairies artificielles. Les méthodes nouvelles inventées consistent en une modification de la rotation des cultures, au sein de laquelle des cultures qui fertilisent le sol (luzerne, trèfle) en *accélérant la fixation de l'azote*, se substituent à la jachère. Dans les nouvelles rotations, les fourrages alternent presque en continu avec les céréales, permettant ainsi le développement de l'élevage ; cette augmentation des troupeaux apporte à son tour une quantité importante de fumier disponible pour épandre sur les cultures. De nouvelles plantes alimentaires (pomme de terre, maïs...) et industrielles (lin, chanvre...) font leur apparition au cours de cette période. C'est le début de la sélection de variétés végétales et de races animales plus productives, mais aussi moins rustiques et plus exigeantes (Mazoyer-Roudart, 1997).

La première révolution fourragère donnera naissance aux systèmes dits « *sans jachère* », qui sont issus des systèmes à jachère de la période précédente. Dans les nouvelles rotations, les fourrages produisent désormais autant de fourrages que les pâturages et les près de fauche réunis. Le développement de ces rotations va donc de pair avec celui des élevages qui fournissent alors davantage de produits animaux, de force de traction et de fumier. Cet accroissement de la fumure animale entraînera à son tour une forte progression des rendements de céréales et permettra même d'introduire dans les rotations d'autres cultures exigeantes en matière de fertilité des sols. « *Occupation du sol redoublée, drainage et lessivage réduits, biomasse produite et recyclée plus importante, teneur du sol en humus accrue et, finalement, disponibilités minérales exportables des récoltes en forte augmentation, telles sont, au fond, les raisons pour lesquelles le mode de renouvellement de la fertilité des nouveaux systèmes est plus efficace que l'ancien* », tel sont les principes de cette innovation technique introduite dans les agricultures européennes (Mazoyer-Roudart, 1997).

Cette révolution fourragère aura des dimensions multidimensionnelles (juridiques, sociales et économiques) comme le notera Henri Regnault dans « *Les révolutions agricoles en perspective* » (Regnault et al, 2012).

Impacts de cette révolution agricole sur les structures foncières, sociales et économiques

La généralisation de cette innovation agronomique des cultures sans jachère est indissociable de transformations du cadre idéologique (reconnaissance des libertés individuelles), politique (Etat libéral) et juridique hérité du système féodal (disparition des communaux). Du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle, nous assistons à une révolution foncière, caractérisée par l'émergence de

¹⁸ Le principe de la rotation dite du Norfolk, apparue au milieu du XVII^e siècle, est celui dans laquelle la petite jachère de fin d'été (après la moisson) est remplacée par une culture dérobée de navet, colza ou chou fourrager, et la grande jachère par une culture fourragère de légumineuse (trèfle, sainfoin, luzerne). Cette rotation à quatre cultures est décrite dans *l'Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert

formes privées d'appropriation des « *communs* ». Cette disparition du système des enclosures ou de ce que l'on appelle « les communs » conduira à un véritable bouleversement social des campagnes européennes. Elle aboutit à l'éviction des plus pauvres parmi les paysans (processus d'expropriation des producteurs finement décrit par Marx dans le *Capital*), et à l'augmentation de la surface moyenne des exploitations devenues plus intensives. Comme le signale aussi Marx dans son chapitre relatif à *l'accumulation primitive* du capital (livre 1 du *Capital*), c'est en Angleterre que le mouvement de modernisation de l'agriculture initié par le système de culture sans jachère semble le plus profond (Chevet, 1996).

En un peu plus de trois siècles, du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle, la révolution agricole a doublé la productivité agricole dans les pays tempérés et accompagné dans son essor la première révolution industrielle, car il faut le rappeler, cette révolution agricole a été très étroitement liée à la première révolution industrielle (Bairoch, 1989). De la fin du XIX^{ème} siècle au début du XX^{ème} siècle, l'industrie a produit de nouveaux moyens de transport et de nouveaux matériels mécaniques à traction (charrues métalliques, brabant, semoirs, faucheuses, moissonneuses-lieuses) qui autorisent l'extension des terres de culture libérées par les jachères. Cette augmentation a été la clé du développement, et en particulier du développement industriel de l'Europe. Comme le note également Paul Bairoch (1978) *"l'agriculture a non seulement libéré les ressources alimentaires et les ouvriers nécessaires à cette vaste aventure que fut la révolution industrielle, a non seulement permis ou même probablement amené la révolution démographique et suscité la naissance des industries textiles et sidérurgiques modernes, mais a également fourni dans les premières phases une fraction dominante des capitaux et des entrepreneurs qui ont animé les secteurs moteurs de cette révolution"*.

Sur cette période qui va de la fin du XIX^{ème} siècle au début du XX^{ème} siècle, sous l'effet de la suppression de jachères, nous assistons à une extension des terres en cultures et à une augmentation du rendement des cultures : le rendement du blé serait passé de 8,5 quintaux à l'hectare en 1800 à 10,5 quintaux à l'hectare en 1850, soit une croissance d'un quart environ en cinquante ans (Mazoyer-Roudart, 1997). Il est constaté une réelle croissance de la productivité du travail (liée au recours aux machines), l'introduction de nouvelles cultures (comme la pomme de terre), la spécialisation de la production et l'intensification des échanges. Par ailleurs, l'agriculture est plus productive et davantage orientée vers l'échange qui se développe, échange tirée en particulier par la croissance des marchés urbains.

L'agriculture est également réorganisée, la modernisation qui s'opère permettant d'élever un bétail mieux nourri et plus nombreux, ce qui apporte à son tour une fumure contribuant aussi à l'augmentation du rendement céréalier à l'hectare. Marcel Mazoyer et Laurence Roudart (1997) estiment, pour leur part, que la rotation sans jachère de type trèfle-blé-navet fourrager ou orge aura permis de doubler *"aussi bien les productions végétales que les productions animales"*. La même estimation est faite par Paul Bairoch qui affirme que la première révolution agricole a globalement entraîné un doublement de la production et de la productivité du travail agricole, ce qui aura conduit à une augmentation très significative des disponibilités alimentaires et du surplus agricole commercialisable : *« Entre 1800 et 1850, on passe d'environ 8 à 8,8 quintaux à l'hectare, soit une progression de 10% (ou 0,2%/an). De 1850 à 1910, se place une période de croissance rapide des rendements. Toujours pour*

l'Europe continentale sans la Russie, on passe de 8,8 à 12,3 quintaux, soit un taux annuel de croissance de 0,6% » (Bairoch, 1989).

Les gains de production ont autorisé un essor démographique ainsi qu'un développement industriel et urbain sans précédent. Il faut en effet rappeler qu'entre le XIII^{ème} et le XVI^{ème} siècle, conjugué aux épidémies de peste et aux guerres, les famines et les disettes avaient entraîné la perte de près de la moitié de la population européenne (Mazoyer-Roudart, 1999). Au XVI^{ème} siècle, la restauration de l'économie et la reconstitution de la population, disettes et famines ont de nouveau fait leur apparition et elles ont sévi de manière chronique tout au long des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. La révolution fourragère aura permis d'éradiquer la faim, les disettes et les famines en Europe¹⁹. Elle a favorisé un essor démographique sans précédent. Selon J-N Biraben, spécialiste en histoire quantitative (*Essai sur l'évolution du nombre d'hommes de 1700 à 1900*), la population de l'Europe centrale et de l'ouest est passé d'environ de 110 millions à 300 millions de personnes. Entre 1800 et 1900, la population française est passée de 27 à 39 millions d'habitants et la production des céréales de 80 à 170 millions de quintaux (Biraben, 2006).

Mais le développement de ces systèmes sans jachère et la multiplication des cultures, et des troupeaux qui en découle ont exigé beaucoup plus de temps de travail supplémentaire. La productivité brute du travail agricole a doublé, et c'est ce doublement de la productivité du travail qui aura permis à la population non agricole française de passer de 10 millions à plus de 20 millions de personnes (Bairoch, 1989 ; Mazoyer-Roudart, 1997).

Si la deuxième révolution agricole, amorcée vers 1850/70, est caractérisée par les premières phases de la mécanisation du travail agricole (notamment et surtout les moissons), elle se caractérise surtout par la mise au point et l'utilisation d'engrais artificiels.

2.2. La deuxième révolution technique : contribution de la chimie agricole

C'est en 1804 qu'émerge les soubassements d'une controverse scientifique de l'humus qui va aboutir à des orientations techniques dont les divergences sont comme nous l'examinerons infra au cœur même de l'actualité du débat agro-environnemental contemporain (Robin *et al*, 2007).

Aux origines de la deuxième révolution agricole et l'émergence de la chimie agricole

Les questions initiales posées aux scientifiques et aux agronomes étaient de savoir *comment obtenir une production optimum des végétaux que l'homme a choisi de cultiver et comment obtenir une production optimum des variétés retenues par l'agriculteur ? Comment assurer une bonne nutrition des plantes cultivées ?*

La réponse à ces questions impliquait de savoir comment assurer une bonne alimentation des plantes au cours de la culture et d'atteindre une protection maximale contre les attaques des parasites, à la fois pendant le cycle cultural et après la récolte.

Comme le note Georges Pédro (2007), historiquement deux écoles se sont affrontées.

¹⁹ Toutefois, à la fin de cette période (1845-1847), eut encore lieu la dernière disette qu'ait connue la France

La première école mettait l'accent sur la préparation de la terre mise en culture, notamment grâce aux travaux aratoires, ceux-ci améliorant l'alimentation en favorisant l'aération de la terre cultivée, ainsi que les contacts entre le sol et la plante par l'intermédiaire des racines. Cette préoccupation avait, comme nous l'avons exposé plus haut, été abordée par les agronomes de l'Antiquité et les agronomes arabes. Cette question de la préparation des terres est de nouveau examinée par l'anglais Jethro Tull (1733) ou Duhamel du Manceau (1750-1756) en France qui aura laissé cette célèbre formule « *qu'un bon labour vaut mieux qu'un apport de fumier* » (Robin *et al*, 2002).

La seconde école mettait l'accent sur la nécessité de procéder à une restitution de nutriments au sol, notamment par un apport extérieur et en particulier du fumier de ferme dont les effets bénéfiques étaient connus depuis l'Antiquité, ce qui était traduit par la formule condensée que « *le fumier est le seul engrais valable* ».

Comme le signale G. Pédro dans son article *Sol, humus et nutrition des plantes* (2007) : « *On peut dire que la première école ne prend en charge que le court terme et ne se préoccupait pas du niveau des stocks d'éléments nutritifs présents dans la terre en culture, s'intéressant davantage sur la meilleure manière de libérer ceux-ci afin de les mettre à la disposition de la graine, puis de la plante. La seconde en revanche prend en considération le court et le long terme. Elle repose sur une conception de l'alimentation des plantes faisant intervenir à la fois les stocks et les flux d'éléments nutritifs, donc en mettant en avant une approche essentiellement chimique* ».

Les réponses formulées par la seconde école se fondaient sur les acquis scientifiques de la chimie moderne. Par les découvertes des constituants de l'air (Lavoisier), de l'eau et du sol (par l'allemand Julius Liebig), l'on pouvait enfin comprendre le développement des plantes et végétaux et cerner la nature des éléments nutritifs qui assuraient leur croissance. Cette avancée scientifique n'interviendra que vers le milieu du XIX^{ème} siècle, après que le chimiste Julius Liebig et les microbiologistes découvrirent le mode de fonctionnement du système sol-plante et quelles étaient les substances minérales qui étaient à la base même de la fertilité. La théorie de la nutrition minérale basée sur le fait qu'en dehors du carbone, les végétaux ne peuvent absorber que des éléments dissous dans l'eau, et qui a prévalu à partir de 1840 (Liebig), conduira à proposer de compenser les exportations des cultures par un emploi systématique d'engrais minéraux ayant une certaine solubilité. Cette théorie sera à la base du développement de la chimie agricole au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, discipline faut-il le souligner, qui consolidera les bases de l'agronomie moderne.

La chimie agricole aura joué un grand rôle dans le développement des productions agricoles. C'est cette discipline qui apportera une explication sur les voies et moyens de fertilisation des sols, fertilisation qui sera à l'origine d'une hausse des rendements agricoles sans précédent dans l'histoire.

Des amendements (chaux et marnes notamment) commencent à être incorporés dans les sols pour les bonifier, ainsi que des engrais naturels tels que le *guano* du Chili utilisé dès 1850 ou les *phosphates* du Quercy. Le chimiste allemand Liebig, qui recommande un traitement à base d'acide sulfurique, rend les phosphates solubles et donc directement assimilables par les plantes. La première usine d'engrais phosphaté s'implante en France en 1871, et les

« superphosphates » seront les premiers engrais chimiques largement utilisés en Europe, rejoints par l'azote et le potassium entre les deux guerres mondiales.

Pendant la seconde moitié du XIX^{ème} siècle les premières luttes contre les agents dévastateurs des cultures sont développées. L'oïdium de la vigne apparu en 1851 fut traité par sulfatage à partir de 1856, grâce aux travaux d'Henri Marès. L'agent responsable du mildiou de la pomme de terre qui s'était propagé en France à partir de 1845 et pouvait faire chuter de 90 % le rendement des récoltes a été identifié en 1863 ; des agronomes et pharmaciens préconisèrent, en plus de mesures de prophylaxie, les premiers traitements phytosanitaires à base de sulfate de cuivre et de bouillies cupriques. De son côté, Pasteur met au point un vaccin contre le charbon du mouton (1881) et préconise des traitements ou procédés pour détruire les parasites de la fermentation du vin (1866), de la bière (1877) ou mettre fin à l'épizootie du ver à soie (1870). Est ainsi lancé un vaste mouvement de recherche sur la protection des productions agricoles et alimentaires qui débouchera à la fin de cette période sur les premières molécules organiques de synthèse. Le fameux insecticide *DDT* fut mis au point en 1933, de même que l'herbicide sélectif *2-4-D* qui fut utilisé dès 1940. Les découvertes de molécules pour protéger les cultures se multiplient au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle dans les trois grandes familles de pesticides : insecticides, fongicides et herbicides.

La deuxième révolution agricole, inaugurée au milieu XIX^{ème} siècle, et qui sera prolongée comme nous l'avons signalé au XX^{ème} siècle par le recours aux pesticides chimiques, bouleversera profondément les systèmes agricoles. Elle sera à l'origine du progrès scientifique et des ressources techniques mobilisées par les sciences agronomiques, sciences qui seront mises au service du modèle productiviste agricole installé dans les années 1960 en Europe dans le cadre de la politique agricole commune (PAC).

3. Les consommations d'engrais et pesticides : instrument majeur de la modernisation agricole

La deuxième révolution technique agricole a permis d'écarter définitivement le spectre de la famine et des disettes alimentaires. Les hommes pouvaient enfin produire plus sur un même espace et mieux se nourrir. Depuis que l'agriculture existe, cette révolution est à l'origine de performances inédites dans l'histoire : en 150 ans, les rendements en grande culture seront multipliés par un facteur de l'ordre de 10, ce qui était encore impensables au court du XIX^{ème} siècle.

Pour l'exemple, sur une période de 100 ans (entre 1850 et 1950), la surface consacrée à l'agriculture en France est restée relativement stable (autour de 33 à 34 millions d'hectares), mais sa composition a profondément changé avec le développement de l'élevage. En effet, les surfaces consacrées à l'alimentation animale (prairies cultivées et naturelles, cultures fourragères) sont passées de 8 millions d'hectares en 1852 (24 % de la surface agricole utile-SAU) à 18 millions en 1950 (57 % de la SAU), soit plus d'un doublement, avec évidemment une diminution corrélative des surfaces en production végétale à destination de l'alimentation humaine. Les jachères vont également régulièrement diminuer sur cette même période, passant de 5.7 millions d'hectares en 1852 à 1.4 en 1950. Mais elles occupaient encore presque 3 millions d'hectares en 1929.

Entre les deux guerres mondiale, même si au début le rythme de transformation est lent et ne concerne que marginalement les agricultures familiales, l'on enregistre des consommations accrues d'engrais et de pesticides. L'encadrement technique et financier notamment des agriculteurs et des professionnels de l'agriculture, qui se renforcera fortement pendant cette période conduira les agriculteurs à accepter ces méthodes nouvelles de traitement des sols et des cultures. Le délai observé aux époques précédentes entre l'apparition d'une innovation et son application dans les campagnes sera largement réduit (Regnault et al, 2012). L'agriculture européenne s'engagera dans un processus d'insertion à l'économie globale et deviendra ainsi assez rapidement une industrie lourde de transformation d'une matière vivante, végétale et animale. Les agriculteurs achètent désormais des matières premières (engrais, semences sélectionnées, aliments du bétail...) et, avec l'aide d'équipements motorisés, ils utilisent le milieu naturel comme support de leurs productions en cherchant à maîtriser au mieux ses réactions et à éliminer ce qui peut limiter les fruits de leur travail par traitement phytosanitaire ou vétérinaire.

Conjugué au développement de la mécanisation, le recours aux engrais et pesticides accroissent les dépenses des agriculteurs, qui vont dépendre de plus en plus des secteurs de l'agrofourriture comme le montre très clairement le tableau relatif aux dépenses consenties par les agriculteurs français (tableau 1).

Tableau 1: Dépenses consenties par l'agriculture française (1950-2015) (Source : *Histoire de la France rurale*, tome IV (1950-1971) et Commission des comptes de l'agriculture (1987-2015).

| Année | 1950 | 1971 | 1987 | 2007 | 2015 |
|--|------|------|------|------|------|
| Dépenses consenties par l'agriculture pour la production de l'année, rapportées à la valeur des produits finaux | 19 % | 33 % | 52 % | 71 % | 75 % |

Dès le XIX^{ème} siècle, les engrais minéraux (ou chimiques) ont commencé à être utilisés en Europe. Au début du XX^{ème} siècle, leur usage a progressé dans les pays industrialisés, mais il n'a véritablement explosé qu'après la seconde guerre mondiale ; alors qu'en 1900 la consommation mondiale des trois principaux minéraux fertilisants, l'azote, l'acide phosphorique et la potasse n'atteignait que 4 millions de tonnes d'unités fertilisantes, elle dépassait en 1950 de peu 17 millions de tonnes, et atteignait 130 millions de tonnes à la fin des années 1980 (Mazoyer-Roudart, 1997).

En ce qui concerne les engrais artificiels, bien que l'essentiel de la croissance de la consommation se place dans le deuxième tiers du XX^{ème} siècle, les quantités utilisées ont été très importantes déjà avant la première guerre mondiale (en Belgique, en Allemagne et dans une moindre mesure en France). Vers 1913, la France consommait annuellement 470 000 tonnes de contenus fertilisants pour l'ensemble des trois principaux types d'engrais (engrais azotés, acide phosphorique et engrais potassiques), ce qui représentait en moyenne 18kg/ha (Bairoch, 1989).

Tableau 2: Consommation d'engrais (NPK) entre les années 1913 et 1985 (Unité: kg/ha) (Source: Bairoch, 1987)

| Pays | 1913 | 1936 | 1985 |
|-------------|------|------|------|
| Allemagne | 47 | 64 | 427 |
| Belgique | 65 | 172 | 522 |
| Espagne | 4 | 6 | 82 |
| France | 18 | 35 | 301 |
| Italie | 10 | 26 | 172 |
| Pays-Bas | 146 | 320 | 784 |
| Royaume-Uni | 26 | 44 | 356 |
| Etats-Unis | 6 | 8 | 94 |

La consommation des engrais connaît quant à elle une hausse explosive dès les années 1950 en France : cette consommation est multipliée par 5 en moins de 25 ans. Mais à partir des chocs pétroliers (1973, 1979) et de l'augmentation de leur coût, un usage plus raisonné en est fait : l'azote continue à progresser, mais sur un rythme beaucoup plus faible, quand le potassium et surtout le phosphore régressent (tableau 3).

Tableau 3: Consommation de N, P, K en France, unités 1000 tonnes entre les années 1950 et 2000 (Source: Poulain, 2004)

| | 1950 | 1973 | 2000 |
|------------------|------|-------|-------|
| Phosphore | 480 | 2 200 | 800 |
| Potassium | 370 | 1 800 | 1 000 |
| Azote | 250 | 1 800 | 2 300 |

Tout se passe comme si la productivité agricole s'acquerrait désormais à l'extérieur de l'agriculture elle-même, celle-ci devenant un débouché important pour ses fournisseurs industriels.

Les niveaux de consommation d'intrants (fertilisants et pesticides) distinguent les pays méditerranéens, puisque ceux des pays du Nord demeurent de l'ordre de 10 fois supérieur à ceux des pays du Sud et de l'Est, à l'exception de l'Egypte et de la Turquie (Méditerranée, 2009). Même dans ces pays, l'utilisation des engrais et pesticides a augmenté considérablement. Ainsi pour les engrais artificiels l'on passe de 0,5 million de tonnes annuellement vers 1938 à 1,4 million en 1953/54 et à 28,6 million en 1985 (Bairoch, 1987).

Parmi les pays du sud et de l'est de la Méditerranée (PSEM), la Turquie et l'Egypte sont comme nous l'évoquions plus haut, les deux plus gros consommateurs d'engrais, avec des niveaux qui dépassent ceux de l'Espagne et de l'Italie, derrière la France. En Egypte, la quantité d'engrais utilisée est passée de 131,2 kg/ha en 1970/71 à 404,3 kg /ha en 1989/90.

Globalement, l'augmentation des quantités d'engrais utilisées n'a pas ralenti et ce pour les trois types d'engrais utilisés dans l'agriculture égyptienne. De 1988 à 2004, on note une augmentation de 45.8% des engrais azotés (de 657 000 tonnes à 958 000 tonnes), de 108% des engrais potassés (de 34 000 tonnes à 71 000 tonnes) et de 92,6% pour les engrais phosphatés (de 286 000 tonnes à 551 000 tonnes) (Méditerranée, 2009). Entre 2000 et 2005, l'utilisation de pesticides a progressé en Turquie passant de 33 543 à 44 337 tonnes (Méditerranée, 2009).

Au Liban, les statistiques montrent que la surface agricole utile a diminué de 4.5% entre 1999 et 2009, alors que la production a augmenté de 7% (RGA, Ministère de l'Agriculture Libanaise, 2010). Ces chiffres indiquent clairement que l'intensification de l'agriculture libanaise n'est pas liée à la superficie utilisée (Tableau 4), mais plutôt à un système de production agricole caractérisé par un usage plus intensif d'intrants permettant l'augmentation de la production.

Tableau 4: Evolution de la SAU et de la production entre 1999 et 2010 (Source : Recensement agricole 1999 et 2010, Ministère de l'Agriculture)

| | 1999 | 2009 | 2010 | Evolution entre 1999 et 2009 | Evolution entre 2009 et 2010 |
|---------------------------------------|--------|--------|-------|------------------------------|------------------------------|
| SAU (*10³ ha) | 263,6 | 251,7 | 230,9 | -4,5% | -8,2% |
| Production (*10³ T) | 2859,4 | 3052,6 | - | 6,7% | - |

Cette intensification s'est développée au début des années 90 avec le début de la stabilité politique, où le secteur agricole a connu une demande alimentaire croissante et des problèmes d'efficacité et de productivité. Cette situation a obligé les agriculteurs à changer leurs pratiques agricoles en augmentant les intrants et surtout l'utilisation des produits phytosanitaires pour une meilleure maîtrise de la production. Ainsi, le Liban s'est retrouvé au premier rang des consommateurs de pesticides dans les pays arabes entre les années 1993 et 2002, avec une consommation moyenne de 5,5 kg/hectare (Rifai, 2013), (figure 1).

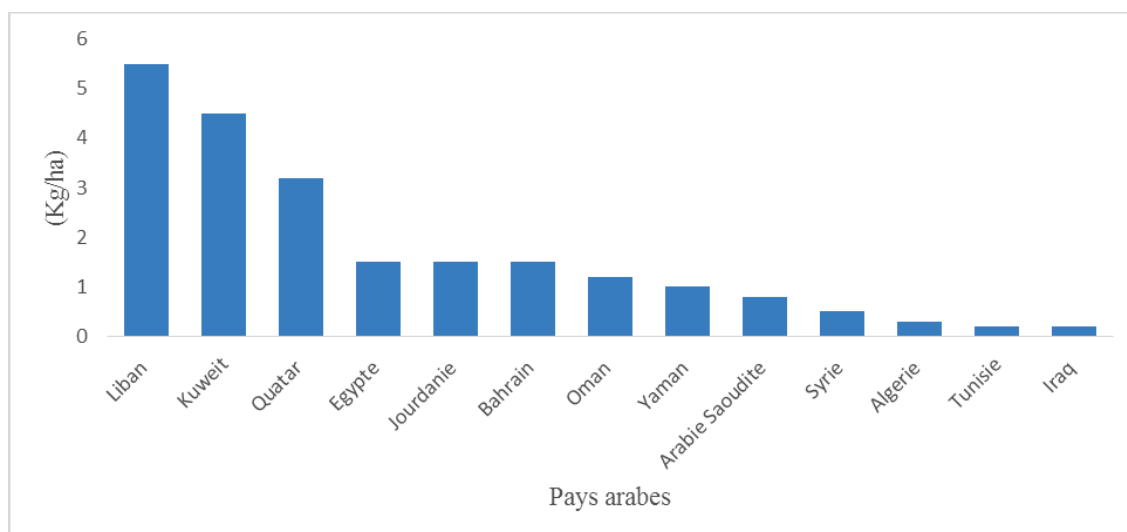


Figure 1: Quantité de pesticides utilisés dans les pays arabes en kg/ha entre les années 1993 et 2002 (source : Rifai, 2013).

Il est à noter que nous ne disposons pas pour le Liban d'études et de statistiques indiquant les volumes de consommations d'engrais et de pesticides avant les années 2000. En revanche des données sont disponibles, en nous appuyons sur les enquêtes annuelles réalisées dans les années 2000 par le ministère de l'agriculture et la FAO.

L'exploitation de ces études, montrent une relative stabilité des consommations et des disponibilités d'engrais à l'hectare au cours de la période 2007 (figure 1) et 2011 et de la consommation des pesticides sur la période 2007, 2016 (figure 2).

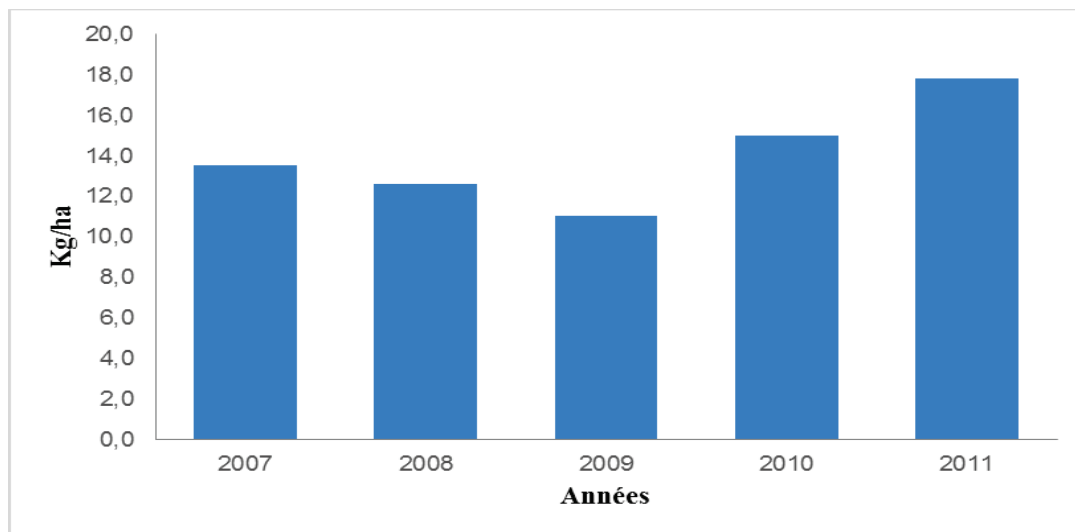


Figure 2: Variation des quantités des engrais chimiques disponibles (kg/ha) (source: enquêtes annuelles réalisées dans les années 2000 par le MOA et la FAO).

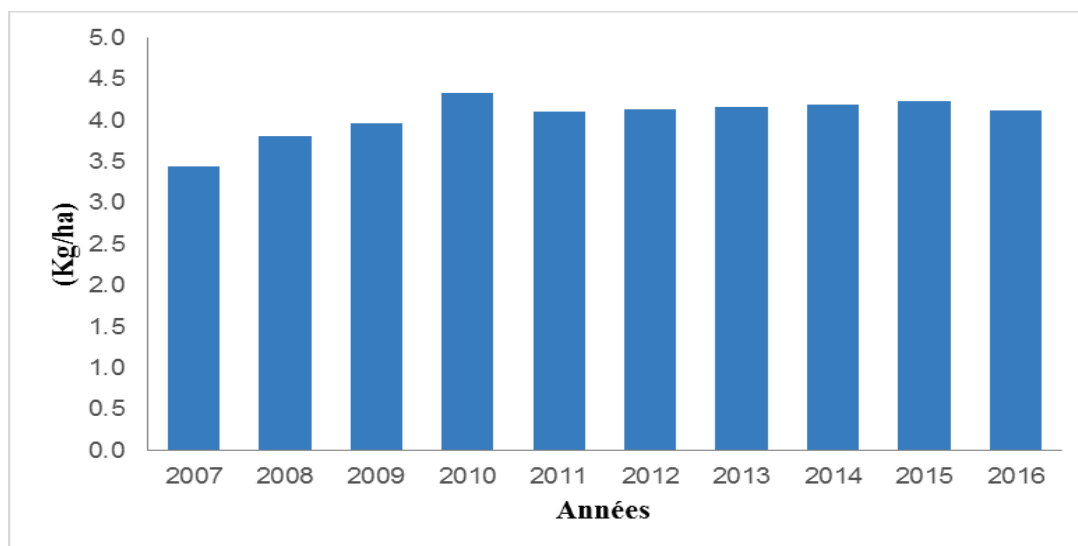


Figure 3: Variation des quantités des pesticides disponibles (kg/ha) (source: enquêtes annuelles réalisées dans les années 2000 par le MOA et la FAO).

Une analyse plus fine des consommations démontre que cette stabilité n'est pas significative. En effet, l'examen des structures agraires existante au Liban (RGA, 2010) révèle qu'un peu plus de milliers des exploitations possèdent plus de 2 ha irrigué concentre 20% de la superficie.

Une grande majorité de cette exploitation développées systèmes de cultures intensives dans secteurs de maraichage et des cultures fruitières, systèmes de cultures consommateur ou fortement consommateurs des pesticides et des engrais, ce qui signifie en définitivement que les consommations par hectare d'engrais et de pesticides indiqué dans les tableaux précédents n'exprime qu'une tendance générale.

Des études (réalisé par Mantigaud JC, 2004 ; Youssef *et al.*, 2012 et Chbib *et al.*, 2016) issues de la recherche ou des ministères indique la présence des résidus des produits phytosanitaires et de pollution diffuse affectant l'environnement et le produit.

Comme nous pouvons le constater, même les pays du sud de la Méditerranée sont aujourd'hui fortement consommateurs d'engrais et de pesticides, en particulier dans les zones avec des périmètres irriguées où sont localisées les cultures maraîchères et fruitières (du Maroc à l'Algérie, en passant par la Tunisie, le Liban ou la Jordanie).

3.1. De quelques effets résultants de consommations d'engrais et pesticides

Même si naturellement, les progrès amorcés dans la première révolution agricole se poursuivent et s'intensifient, l'usage des engrais artificiels, conjugué à d'autres innovations techniques entraînent, surtout en Europe, un doublement du rythme de croissance des rendements. Dès 1910, on atteint dans les pays les plus avancés des niveaux de rendements très élevés (Bairoch, 1987)

Si l'on examine l'ensemble de la deuxième révolution agricole, à savoir par exemple la période 1858/62 à 1934/38, on peut considérer qu'en Europe, les rendements de tous les produits agricoles ont presque doublé en moyenne ; alors que durant les sept décennies et demi qui ont précédé, la croissance n'a été que de l'ordre de 10 à 15%. Traduit en termes de taux annuel, et si l'on prend les productions agricoles de l'ensemble des pays développés occidentaux, il s'agit d'un progrès des rendements de l'ordre de 0,2% durant la première révolution agricole et de 0,6% durant la deuxième (Bairoch, 1987).

L'accroissement considérable du rendement à l'hectare des cultures au cours des dernières décennies résulte principalement de l'usage des engrais, même si l'amélioration des traitements et des travaux mécaniques de préparation et d'entretien des cultures ont leur part. Pour les céréales, partant de rendements en grains d'une dizaine de quintaux par hectare, que l'on obtenait avec du fumier mais sans engrais minéraux dans les systèmes sans jachère du début siècle, on est passé en 1950 à un rendement moyen d'une trentaine de quintaux à l'hectare avec des doses d'engrais comptant une centaine de kilogrammes d'azote (N) par hectare, plus de l'acide phosphorique et de la potasse. Aujourd'hui, les rendements se rapprochent de 100 quintaux à l'hectare pour des doses d'engrais qui peuvent dépasser 200 kilogrammes d'azote à l'hectare ; des doses qui compensent non seulement de fortes exportations par les récoltes mais aussi les pertes par drainage dans la nappe, des pertes qui peuvent représenter plusieurs dizaines de kilogrammes d'azote par hectare (Mazoyer-Roudart, 1997).

En termes d'intensité, cette révolution technique agricole est de loin la plus importante : on assiste en effet, à un véritable bouleversement dans les domaines des rendements. Ainsi en

quatre décennies, les rendements de céréales sont multipliés par 3, comparé à une multiplication par 1,5 durant les quinze décennies précédant 1946 (Bairoch, 1987).

Durant cette révolution agricole, même si la progression des rendements a été certes plus modérée que celle de la productivité (résultant surtout de la mécanisation), les niveaux atteints sont élevés. Les rendements de l'ensemble des productions agricoles ont progressé entre 1948/52 et 1983/87 de 2,2% par an dans les pays développés occidentaux, contre 0,6% durant la période 1850-1950 (Bairoch, 1987).

L'évolution historique des rendements de blé dur montrent très clairement les progrès enregistrés entre 1800 et 1985 (tableau 5 ci-dessus).

D'autres impacts dans les utilisations massives peuvent être évoqués. L'usage des engrais chimiques a permis d'augmenter la production de pailles, de fanes, de racines et d'autres résidus de cultures. Et à partir d'un certain niveau d'utilisation des engrais, les sous-produits des cultures sont devenus assez abondants pour fournir au sol des restitutions organiques permettant de maintenir une teneur du sol en humus acceptable (Robin *et al*, 2007). Ainsi les exploitations se sont trouvées libérées de l'obligation de produire du fumier. Enfin, l'usage des produits de traitement a affranchi les exploitations des anciennes règles de rotation et d'assolement qu'elles devaient respecter pour éviter le foisonnement des mauvaises herbes. Dès lors les exploitations ont pu se spécialiser assez fortement et l'on observe un processus de regroupement dans l'espace des grandes cultures, des herbages et des élevages, de la viticulture, des cultures légumières et fruitières (Mazoyer-Roudart, 1997).

Tableau 5: Evolution historique des rendements de blé (qtx/ hectare) (Source: Bairoch, 1987)

| Années | Evolution Europe continentale sans la Russie | | Evolution pays développés* | |
|--------|--|--------------------|----------------------------|----------------------|
| | Données | Variation annuelle | Données | Variations annuelles |
| 1800** | 8,0 | - | 6,9 | - |
| 1850 | 8,8 | 0,17 | 7,3 | 0,11 |
| 1860 | 9,2 | 0,48 | 7,7 | 0,45 |
| 1870 | 9,8 | 0,60 | 7,8 | 0,13 |
| 1880 | 10,0 | 0,22 | 7,7 | -0,05 |
| 1890 | 10,5 | 0,55 | 7,8 | 0,14 |
| 1900 | 11,6 | 0,96 | 8,6 | 0,92 |
| 1910 | 12,3 | 0,63 | 9,4 | 0,89 |
| 1936 | 13,9 | 0,45 | 10,3 | 0,35 |
| 1950 | 14,3 | 0,38 | 11,2 | 0,60 |
| 1960 | 17,5 | 2,00 | 13,7 | 2,05 |
| 1970 | 26,4 | 4,22 | 18,0 | 2,78 |
| 1980 | 36,0 | 3,15 | 21,3 | 1,65 |
| 1985 | 41,9 | 3,33 | 24,0 | 2,42 |

*Japon et Afrique du Sud non compris. ** approximatifs

Pour le cas libanais, les données disponibles ne permettent pas d'évaluer avec exactitude les effets des impacts des engrais chimiques et des pesticides sur les rendements des principales

cultures. Tout au plus, pouvons-nous indiquer sur la base des dernières statistiques observées les tendances d'évolution des rendements pour la pomme de terre et le blé (figure 4 et 5).

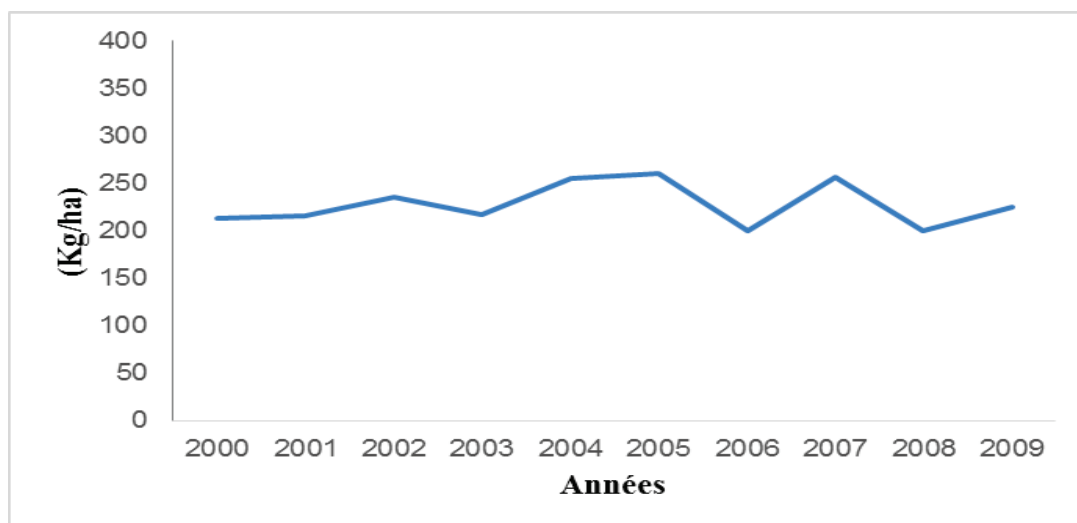


Figure 4: Variation des rendements de la pomme de terre entre 2000 et 2009 (source: enquêtes réalisées par le MAO et la FAO).

Les figures ci-dessus montre une relative stagnation des rendements sur la période 2000 – 2009 liée vraisemblablement à une modeste consommation d'inputs d'origine chimiques comme indiqué dans les tableaux de consommation des pesticides et des engrais (figure 5).

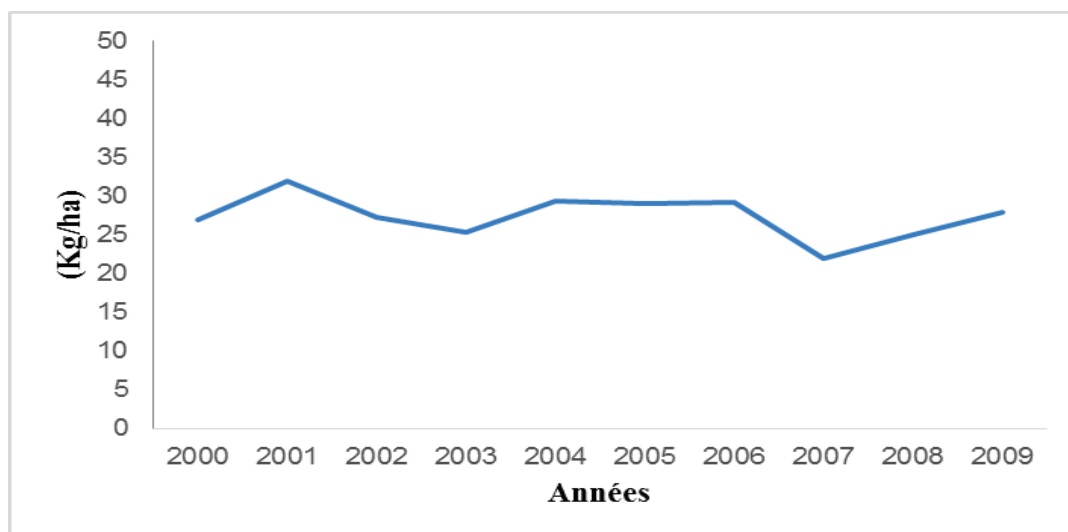


Figure 5: Variation des rendements du blé entre 2000 et 2009 (source: enquêtes réalisées par le MAO et la FAO).

Là également nous pouvons observer une relative stabilité des rendements du blé liée sans doute d'une part à l'aléa climatique et d'autre part, aux consommations stables d'engrais chimiques.

En ce qui concerne les pays industrialisés, les structures foncières ont évolué pour permettre la mise en œuvre d'un système productiviste de plus en plus consommateur de produits intermédiaires. Remembrements fonciers et dynamiques des marchés fonciers ont conduit à favoriser des processus de concentrations des exploitations et une augmentation du nombre d'hectare par exploitation ou par actif agricole.

Sous l'effet du système productiviste dont les fondements sont à rechercher dans les consommations de biens-capitaux et d'intrants représentés essentiellement par les engrais et produits phytosanitaires, c'est au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle que les campagnes européennes et de la Méditerranée du Nord, vont être marquées par des transformations sociales et économiques radicales. Le changement le plus spectaculaire et le plus lourd de conséquences sur le plan social fut sans aucun doute l'exode massif et silencieux de la paysannerie vers les villes. L'ouvrage « *La fin des paysans* » du sociologue Henri Mendras paru en 1970 analysera ce processus d'éviction et d'effacement des paysans français résultant des révolutions techniques agricoles et de la modernisation de l'agriculture française (Mendras, 1970). Ce même processus a pu être observé pour l'ensemble des paysanneries européennes (mais aussi américaines) au cours de ces deux derniers siècles comme le montre le tableau 6.

De nos jours, dans les pays industrialisés, une population agricole active réduite à moins de 5% de la population active totale suffit pour nourrir, mieux que jamais, toute la population.

Tableau 6: Evolution des actifs agricoles masculins dans la population active (en %) (Source: Bairoch, 1987)

| Pays | 1800 | 1860 | 1910 | 1950 | 1985 |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Allemagne | 67 | 50 | 27 | 18 | 5 |
| Belgique | 63 | 47 | 24 | 13 | 3 |
| Espagne | 76 | 75 | 67 | 55 | 15 |
| France | 65 | 52 | 41 | 30 | 8 |
| Italie | 74 | 70 | 58 | 42 | 9 |
| Etats-Unis | 73 | 61 | 33 | 16 | 4 |

Ce constat, relatif à la désertification des campagnes et au déclin des territoires ruraux évoqués par les ruralistes nous conduit tout naturellement à évoquer, ce que les économistes, spécialistes de la nutrition humaine et écologistes appellent les externalités négatives résultant des consommations excessives d'engrais et de pesticides.

Le Liban présenté une situation paradoxal par rapport aux pays du sud de la méditerranée c'est en fait un pays ou le pourcentage de la population active agricole n'a pas cessé de diminuer depuis les années 1970. En effet, cette population active agricole qui était majoritaire dans le secteur économique libanais et qui représenté 42% de la population active total en 1970 ne représente plus que 4% en 2017 comme le montre la figure 6:

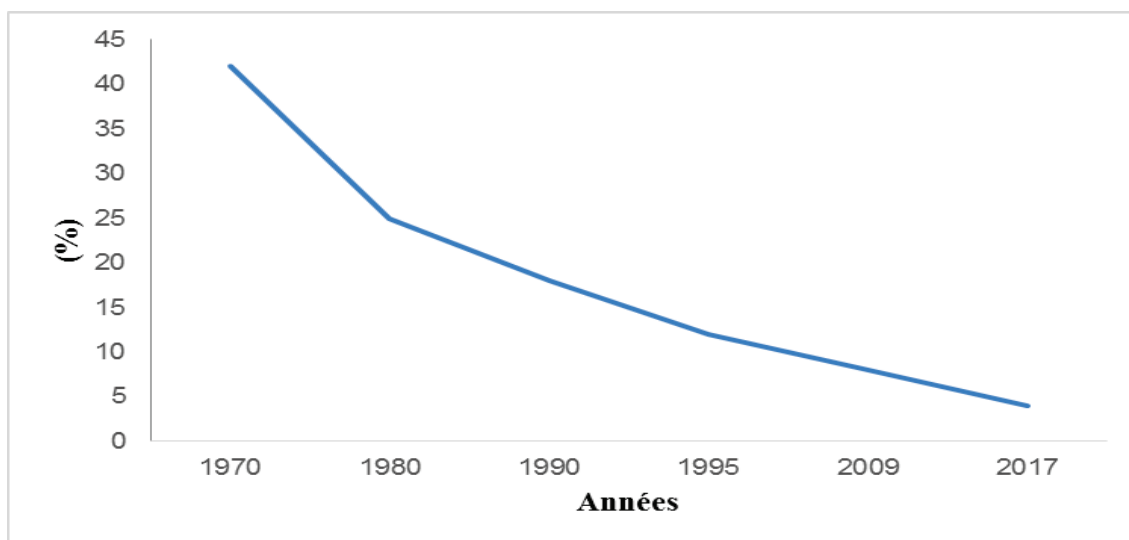


Figure 6: Evolution du pourcentage de la population active agricole par rapport à la population active totale (source : Banque mondiale, 2017).

Cette situation s’explique d’une part par le conflit politique et militaire (guerre civile de 1975 – 1990 et agression israélienne sur le territoire libanais), et d’autre part par une tendance à l’exode massif des actifs vers d’autre secteur économique (en raison d’une meilleure éducation scolaire et vers l’étranger)

Ainsi l’évolution historique affectant les actifs agricoles ne résultent pas dans les cas de la figure d’une intensification massive de l’agriculture ou d’un processus de modernisation des structures agraires; elle résulte d’une transformation issue des facteurs exogènes (conflits) et d’une baisse d’attractivité de l’agriculture.

3.2. Les externalités négatives : impact des consommations sur l’environnement et les aliments

Au niveau technique, les progrès ont aussi leur revers notamment la pollution des sols et des nappes phréatiques. Il y a émergence progressive d’une problématique liée à de sécurité sanitaire des aliments. Sur la consommation des aliments, la sensibilisation à la santé a été renforcée car se nourrir, n’était plus simplement appréhendé par les consommateurs européens notamment comme le simple fait de s’alimenter, mais de “ *faire du bien au corps* ”. Les enquêtes de consommation des aliments ont révélé la présence de résidus issus de l’emploi des engrais et de produits phytosanitaires qui s’accumulent dans la chaîne alimentaire sur une très longue durée de vie, et se concentrent en bout de chaîne à des doses toxiques voire létales²⁰. Les études scientifiques et les enquêtes techniques ont mis également en évidence les conséquences environnementales (pollution des sols, de l’eau et de l’air), ainsi que les limites de l’agriculture dite conventionnelle résultant de cette deuxième révolution

²⁰ La persistance des résidus de pesticides dans la chaîne alimentaire humaine et l’environnement peut aller de quelques semaines à une trentaine d’années. Les risques varient considérablement d’un pesticide à l’autre, selon les caractéristiques spécifiques (toxicité, persistance...) de leurs matières actives et selon l’exposition (qui dépend de leur mode d’utilisation).

agricole qui entraînaient des consommations croissantes de pesticides et d'engrais chimiques²¹.

De nos jours, et partout dans le monde, les excès des pratiques agricoles intensives sont largement mis en cause dans la pollution des eaux, l'atteinte de la faune et de la flore naturelles ou encore l'érosion des sols. En d'autres termes, la dégradation quantitative et qualitative des ressources en eau, l'altération de la fertilité des sols ou l'obligation de surveiller la qualité de la production alimentaire sont aujourd'hui interprétés comme des conséquences de l'intensification de l'agriculture – via les consommations d'engrais et de pesticides.

Dans les pays méditerranéens, au Nord comme au Sud, on perçoit de problèmes environnementaux qui vont se poser à des régions et des terres côtières fortement intensifiées et irriguées (céréales, vignes, maraîchage...), et soumises à des utilisations d'engrais et de pesticides excessives au cours de ces cinq dernières décennies. L'excès de phosphore libéré dans les sols par les engrais organiques et minéraux est à l'origine de l'altération de l'équilibre structurel et organique du sol. Sur les terres intensifiées les risques identifiés concernent la pollution des nappes phréatiques : l'on peut évoquer les nappes de la plaine du Pô en Italie, celles des régions de Séville, de Valence ou de Barcelone en Espagne, les plaines du Languedoc-Roussillon en France et celle de Thessalie (Méditerranée, 2009). Les régions du Nord de l'Italie, lieu de forte intensification, sont les plus touchées par les problèmes de qualité de l'eau, avec des concentrations moyennes d'azote de 40,06 kg/ha dès les années 2000 (22,04 kg/ha dans le sud du pays). La pollution par les nitrates est également l'une des principales causes de la détérioration de la qualité des eaux dans tous les pays membres de l'Union Européenne. A titre d'exemple, la proportion de «*zones sensibles aux nitrates*» est de 12,6% en Espagne, taux qui est inférieur à celui de la moyenne de l'Union Européenne (UE-27), qui lui se situait en 2008 à 44,1% (Méditerranée 2009). L'usage des produits chimiques, même lorsqu'elle n'a pas d'effet négatif sur l'homme, tend, d'une part, à favoriser le développement de résistance des parasites ou des « mauvaises » herbes, et d'autre part, à faire disparaître des populations non parasitaires, mais auxiliaires, comme les abeilles par exemple.

A la fin du XX^{ème} siècle, moderniser l'agriculture et maintenir des modes de croissance des productions agricoles, sans ruiner la nature et porter atteinte à la santé des consommateurs, sont devenues des questions centrales posées aux politiques agricoles.

4. Les politiques agro-environnementales à l'origine de l'agriculture raisonnée

La prise en compte de la soutenabilité et plus généralement l'internationalisation des préoccupations environnementales constituent une préoccupation majeure des pays méditerranéens, en particulier ceux du Nord. La question d'une meilleure gestion des ressources naturelles émerge dès les années 1980 et va influencer les modèles de développement et les politiques agricoles qui les accompagnent.

²¹ Toutes les sources d'azote- dont l'azote des engrais- sont des sources potentielles de nitrate. Dans l'eau, ces substances peuvent provenir de la décomposition de matières végétales ou animales, mais aussi des engrais utilisés en agriculture. Normalement, la concentration de nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface est faible, mais elle peut atteindre des niveaux élevés à cause du lessivage des terres cultivées. Des concentrations élevées d'azote dans l'eau, combinées à la présence de phosphore peuvent occasionner une prolifération de plantes et d'algues, qui réduisent la teneur en oxygène, parfois jusqu'à une teneur létale.

4.1. La préservation de l'environnement et de la qualité des produits : nouvel axe des politiques agricoles

Les effets nuisibles de pesticides qui se manifestent conduisent à l'interdiction de certains d'entre eux dès les années 1970. Le DDT par exemple, utilisé à grande échelle à partir de 1940, est considéré comme toxique pour l'homme, du fait qu'il a une très longue durée de vie, et s'accumule dans la chaîne alimentaire et se concentre en bout de chaîne à des doses toxiques. Il a été interdit en France en 1971, et les molécules de sa famille ont été remplacées par des organophosphorés qui, s'ils sont tout aussi toxiques, sont moins rémanents.

Les limites de l'agriculture productiviste ou conventionnelle issue de la deuxième révolution agricole seront progressivement de mieux en mieux perçues, avec la mise en évidence de conséquences environnementales négatives, en termes de pollution des sols, de l'eau et de l'air résultant aussi bien des pesticides que des engrais. Aussi, depuis plus d'un quart de siècle, une réflexion est menée, accompagnée de mesures visant à mieux utiliser ces intrants chimiques de l'agriculture afin de minimiser leurs risques sanitaires et environnementaux.

Dans les années 1980 et 1990, les premières mesures européennes ont pour objectif la préservation de l'environnement et la qualité des produits. La Réforme de la PAC de 1992, dite «*réforme Mac Sharry*» visera ainsi pour la première fois à rompre explicitement avec la logique productiviste et à protéger l'environnement. Le rapport Brundtland appelant à un développement durable commençait à produire des effets sur les décideurs institutionnels. La question centrale devenait celle du meilleur choix en termes de combinaison productivité/soutenabilité avec pour corollaire la préservation des écosystèmes, la protection des sols et une moindre consommation d'énergie fossile.

Les politiques publiques adoptées en Europe ces dernières décennies ont octroyé des aides conditionnées au respect de directives respectueuses de l'environnement. L'enjeu est désormais la lutte contre les pollutions diffuses plus complexe car mobilisant à la fois des choix individuels et des choix collectifs. Les mesures européennes des années 1990 initient les premières mesures agro-environnementales, et incitent les agriculteurs européens à adopter des pratiques techniques plus écologiques. Dans le cadre de la Directive européenne 91/676/CEE du 12 décembre 1991 (relative à la protection des eaux face à la pollution provoquée par les nitrates utilisés en agriculture), l'Espagne a par exemple identifié – par l'intermédiaire des Communautés Autonomes des zones sensibles, pour lesquelles des codes de bonne pratique, des programmes d'action, des programmes de contrôle ont été conçus et mis en place, afin d'évaluer l'efficacité des actions en question.

En France, de nombreuses actions sont conduites pour la prévention et la gestion des risques sanitaires et phytosanitaires inhérents à la production végétale. Des systèmes de cultures économes en produits phytosanitaires, appliquant les principes de la protection intégrée (en jouant sur les rotations, l'itinéraire technique de chaque culture et le raisonnement des traitements...) se développent. Des incitations financières sont proposées assujetties à un cahier des charges fixant une exigence de résultat, en termes de réduction du recours aux produits phytosanitaires. En 1992, la réforme Mac Sharry (PAC) a introduit une obligation de gel des terres – moyennant des aides – pour les exploitants dont la production théorique est supérieure à 92 tonnes. La pratique agricole consistant à maintenir inutilisée pendant une

certaines périodes une surface agricole vise pour l'essentiel la reconstitution des réserves en eau et des capacités de production des exploitations agricoles. Alors qu'un des éléments essentiels des deux premières révolutions agricoles évoquées plus haut a été la suppression de la jachère, l'on assiste au paradoxe de sa préconisation et sa réintroduction dans le cadre des politiques publiques agricoles.

Dans le cadre de la PAC, la philosophie de l'Agenda 2000 retiendra la conditionnalité des aides rendant obligatoire le respect des bonnes pratiques environnementales, mais aussi des normes réglementaires quant à la santé des populations. Les programmes régionaux et locaux, et les plans de développement durable destinés aux exploitations individuelles apportent aux agriculteurs volontaires des aides monétaires qui compensent les manques à gagner résultant de pratiques agricoles moins polluantes. Il n'existe toutefois ni réglementation contraignante limitant en dessous de leur seuil de nuisance les doses d'engrais, de pesticides, ni de taxation des intrants potentiellement nuisibles visant à diminuer le niveau de leur usage. Si au cours de la période 2000-2006, les priorités dans les pays méditerranéens (Espagne, Grèce et Italie) étaient polarisées sur l'amélioration de la compétitivité de l'agriculture, au cours de la période 2007-2013, la stratégie qui prévaut désormais combine les deux axes « *environnement* » et « *compétitivité agricole* » avec plus d'équilibre dans les programmes.

Pour l'UE-15, la figure 7 ci-dessous montre que l'axe 2 environnement et « régions les moins développées » de la stratégie de la PAC (2007-2013) continue de figurer parmi les principales priorités dans la plupart des pays européens (ces deux objectifs concentrent 53% des ressources publiques). Elle illustre la répartition des ressources publiques (co-financement UE, national et régional) par catégorie dans la période 2007-2013

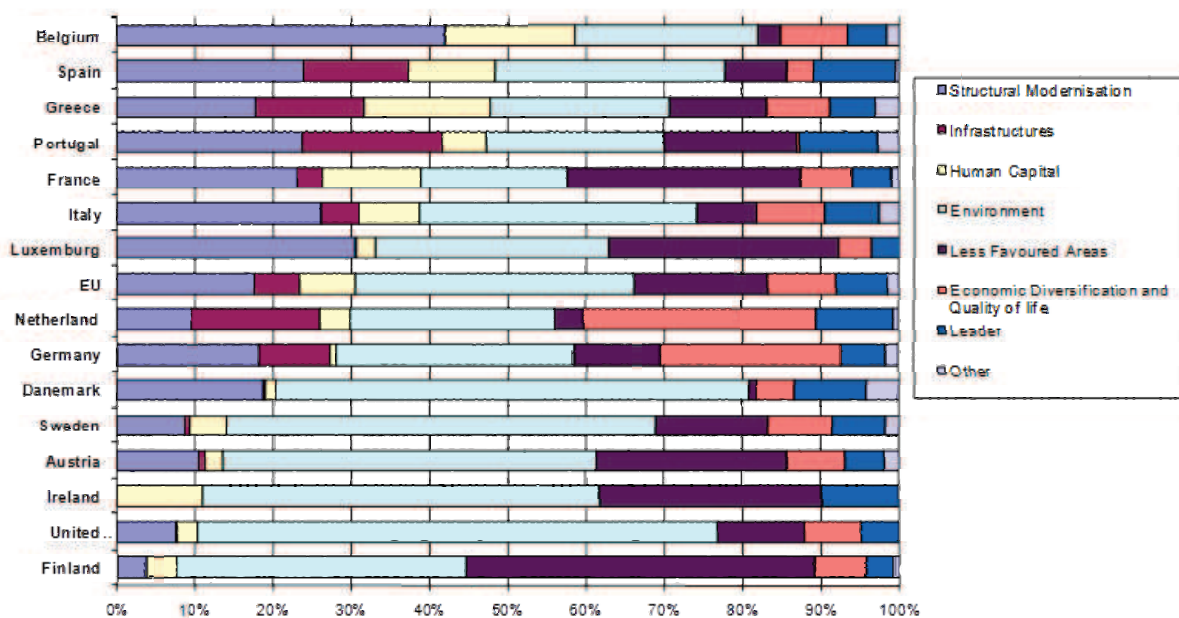


Figure 7: Pourcentage des dépenses publiques par type d'interventions dans l'UE-15- Plans de développement rural 2007-2013 ((Source : Agricultural and rural development : national study of Italy (Mantino, F; 2008).

Au plan des résultats, l'on a certes enregistré les infléchissements dans la consommation d'engrais des pays du Nord, mais la légère diminution des quantités d'intrants rapportées au PIBA ne doivent pas masquer les efforts qui restent à faire partout (Méditerranée, 2009).

Du fait du caractère peu contraignant des mesures et de leur grande souplesse d'interprétation, le verdissement attendu de la PAC actuelle n'a suscité de changements dans les pratiques agricoles que sur quelque 5 % des surfaces selon un rapport de la Cour des Comptes Européenne (2017). Les changements constatés sur le plan écologique sont considérés comme mineurs. Il en va ainsi de l'introduction d'une (modeste) diversification sur les exploitations, alors qu'une mesure vraiment efficace pour réduire l'usage des pesticides aurait été d'imposer une rotation des cultures sur les mêmes parcelles. Le rapport Cour des Comptes Européenne montre qu'en définitive, faute de fixer des objectifs (en termes de baisse des polluants ou d'amélioration du taux de matière organique dans les sols, par exemple) « *le paiement vert reste fondamentalement une aide au revenu* ».

Malgré ces insuffisances, la tendance est à la promotion d'une agriculture écologique raisonnée et à une alimentation de qualité, répondant aux aspirations du plus grand nombre de consommateurs.

4.2. Au Liban : les législations, règlements et mesures

Les pesticides à usage agricole au niveau du territoire libanais sont régis par le décret n° 11766 du 9 janvier 1963 portant sur l'interdiction de vente des produits phytosanitaires toxiques et des insecticides hors des points de ventes spécialisés et certifiés, suivi d'une Loi n° 68/6 du 8 janvier 1968 portant sur l'organisation de la commercialisation des produits phytosanitaires à usage agricole et des engrais chimiques, et un troisième décret n° 5039 du 26 mars 1982 qui détaille le commerce des substances, la préparation des produits phytosanitaires, la mise en vente, la distribution, le contrôle, l'importation et la liste des matières actives interdites.

Cette base juridique, qui paraît ancienne, est insuffisante surtout dans le domaine de protection de l'environnement, de la santé humaine et animale. De ce fait, des lois et des décisions ont été promulguées plus récemment. Le décret no 5246 du 20 juin 1994 relatif à l'organisation du Ministère de l'Agriculture et l'identification de leurs activités et en particulier la loi n° 43 qui signale l'établissement d'un département spécifique de protection végétale et pharmaceutique. Un Arrêté n° 280/1 du 15 septembre 2004 relatif à l'homologation des pesticides à usage agricole et un Arrêté n° 456/1 du 30 janvier 2004 relatif à la formation d'un comité de pesticide ont été publiés.

Résumé des principaux textes législatifs et réglementaires des pesticides au Liban²²

- Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 92/1 du 20 mai 1998 portant sur les spécifications du label des produits phytosanitaires.
- Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 94/1 du 20 mai 1998 relatif à l'interdiction d'importations de quelques produits phytosanitaires au Liban complétant l'Arrêté n° 108/1 daté du 27 juillet 1992 et l'Arrêté n° 120/1 daté du 2 septembre 1992.
- Arrêté n° 59/1 du 26 février 2005 relatif à l'organisation d'importations, d'enregistrement et d'utilisation des produits phytosanitaires au Liban.

²² Toutes ces informations sont collectées du département de protection végétale au Ministère de l'agriculture et du site officielle du Ministère.

-
- Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 554/1 du 19 décembre 2008 portant sur le règlement intérieur du comité des pesticides à usage agricole.
 - Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 69/1 du 5 février 2009 relatif à la ratification des documents d'enregistrement des pesticides à usage agricole au Liban.
 - Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 307/1 du 24 juin 2010 portant sur l'enregistrement des produits phytosanitaires biologiques.
 - Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 310/1 du 24 juin 2010 portant sur l'organisation d'enregistrement des produits importés, préparés et utilisés au Liban.
 - Arrêté du Ministère de l'Agriculture n° 311/1 du 24 octobre 2010 relatif à l'organisation des importations des produits phytosanitaires.

Produits phytosanitaires interdits au niveau du territoire libanais et leur évolution

En se basant sur les arrêtés du Ministère de l'Agriculture d'une part et sur les rapports des réunions du comité des pesticides d'autre part, le nombre des produits phytosanitaires interdits par catégories et en fonction des années est présenté comme suit:

- En 1983, 23 matières actives ont été interdites ;
- En 1998, 109 matières actives ont été interdites et sont réparties comme suit: 68 insecticides, 12 fongicides, 8 herbicides, 7 nématicides, 6 fumigants, 6 rodenticides, 1 acaricide et 1 régulateur (Arrêté 94/1, 20 mai 1998) ;
- En 2001, 3 insecticides ont été interdits (Arrêté 261/1, 29 septembre 2001);
- En 2008, 3 insecticides et 2 fongicides (Arrêté 57/1, 24 décembre 2008);
- En 2009, après la déclaration du ministre de l'environnement à l'époque sur le scandale des fruits et des légumes dits cancérigènes qui contiennent des résidus des produits phytosanitaires, le ministre de l'agriculture soumet des analyses sur les pesticides au niveau de leur toxicité et leur dangerosité sur les cultures, l'environnement et la santé humaine. Par conséquent, en 2010, 4 Arrêtés ont été promulgués, les deux Arrêtés 71/1 du 13/2/2010 et l'Arrêté 868/1 du 14/12/2010 relatif à la possibilité d'utilisation avec les quantités restantes mais non importés réparties comme suit : 7 insecticides, 3 herbicides et 1 fongicide ont été interdits, le troisième Arrêté 309/1 du 24/6/2010 relatif à l'interdiction de l'utilisation et d'importation de 3 insecticides et 2 herbicides et le quatrième Arrêté 674/1 du 29/10/2010 relatif à l'interdiction d'un insecticide qui est l'Abamectine (dark color);
- En 2011, 5 régulateurs de croissance ont été interdits (Arrêt 294/1, 19 mars 2011);
- En 2012, deux Arrêtés ont été promulgués, le premier Arrêté 403/1 du 8 mai 2012 relatif à l'interdiction d'un acaricide et le deuxième Arrêté 850/1 du 12 septembre 2012 relatif à l'interdiction d'un fongicide;
- En 2016, un autre scandale a été déclaré par les deux ministres de la santé et de l'agriculture, 45 pesticides cancérigènes sont utilisés au Liban. Par conséquent, le ministère de l'Agriculture a pris la décision de réévaluer la liste des pesticides autorisés au Liban et il a déclaré aussi qu'un comité conjoint pour la surveillance de la production agricole locale a été formé afin de s'assurer que les résidus dans les légumes et fruits ne soient pas supérieurs aux normes autorisées mondialement.

Les acteurs de la filière pesticides au niveau du territoire libanais

Au niveau du territoire libanais, l'utilisation des pesticides se caractérise par l'utilisation de ces produits dans plusieurs domaines:

- Utilisation dans le domaine de protection des plantes - Ministère de l'Agriculture - Service de protection des plantes – Département de phytopharmacie;
- Utilisation dans le domaine de la santé des animaux - Ministère de l'Agriculture - Direction des ressources animales - Bureau des médicaments vétérinaires et des vaccins;
- Utilisation de la santé publique - Ministère de la Santé - Service de génie sanitaire.

Les acteurs principaux sur le marché des produits phytosanitaires libanais sont illustrés dans le tableau ci-dessous en fonction de chaque étape du schéma représentatif de l'utilisation des produits phytosanitaires sur le marché libanais.

Tableau 7: Les différents acteurs sur le marché des produits phytosanitaires libanais. (Source: Elaboration personnelle, 2014)

| | Acteurs |
|---|---|
| Enregistrement | - Ministère de l'Agriculture – Service de protection des plantes – Département de phytopharmacie - Comité de pesticides: ministère de santé, secteur privé (6 membres) |
| Importation | Licence pour les importateurs du Ministère de l'Agriculture |
| Contrôle douanier | Service de quarantaine des plantes |
| Contrôle de qualité | Laboratoire de Kfarchima |
| Formulation | Licence des formulateurs du Ministère de l'Agriculture |
| Distribution | Menée par des importateurs |
| Reconditionnement et étiquetage | Licence de conditionnement et de reconditionnement du Ministère de l'Agriculture |
| Revendeur | Licence de revendeur du Ministère de l'Agriculture |
| Utilisateur | No data available |
| Elimination des récipients vides | Informel |

5. La mise en place d'une agriculture raisonnée

Dès 1994, le concept d'agriculture raisonnée émerge avec des règlements européens dont l'objectif clairement défini est d'arriver à limiter les consommations d'engrais et la pollution des nappes. Dès le début des années 2000, impulsée par les politiques publiques agricoles, les principes d'une agriculture intégrée - dite raisonnée - se mettent en place.

L'agriculture raisonnée est, selon la définition généralement retenue, une agriculture dont l'objectif est d'optimiser le résultat économique des exploitations agricoles en maîtrisant les quantités d'intrants, et notamment les substances chimiques utilisées (pesticides, engrais) dans le but de limiter leur impact sur l'environnement. Elle a aussi pour objectif d'adapter les apports en éléments fertilisants aux besoins réels des cultures en tenant compte des éléments présents dans le sol et du rendement potentiel de la plante. Les caractéristiques du milieu tels que le sol, le climat, la proximité d'eau de surface ou de zones de captage sont pris en compte dans le dosage des fertilisants. Cette agriculture vise à assurer une qualité sanitaire aux produits agricoles afin de regagner la confiance des consommateurs. Entre les pratiques suscitées par l'agriculture intensive et les limites de l'agriculture biologique, l'agriculture raisonnée tente de combiner impératifs de compétitivité et ceux liés à la durabilité. Des pratiques de fertilisation et de protection des plantes contrôlées constituent l'une des composantes de base de l'agriculture raisonnée.

Les dispositifs réglementaires arrêtés dans les pays imposent aux exploitations éligibles au label « *agriculture raisonnée* » un cahier des charges définissant les normes en matières d'utilisation de fertilisants, et ceci afin de réduire les risques de pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole²³. Les agriculteurs, par la mise en œuvre de pratiques agricoles volontaires respectueuses de l'environnement, s'engagent ainsi à préserver la ressource en eau ou en sol. Pour ne citer que quelques exemples, l'agriculteur doit équilibrer l'utilisation des fertilisants, mettre en œuvre des pratiques culturales préservant les sols et limitant les risques de pollution, ou contribuer à la protection des paysages et de la diversité biologique²⁴.

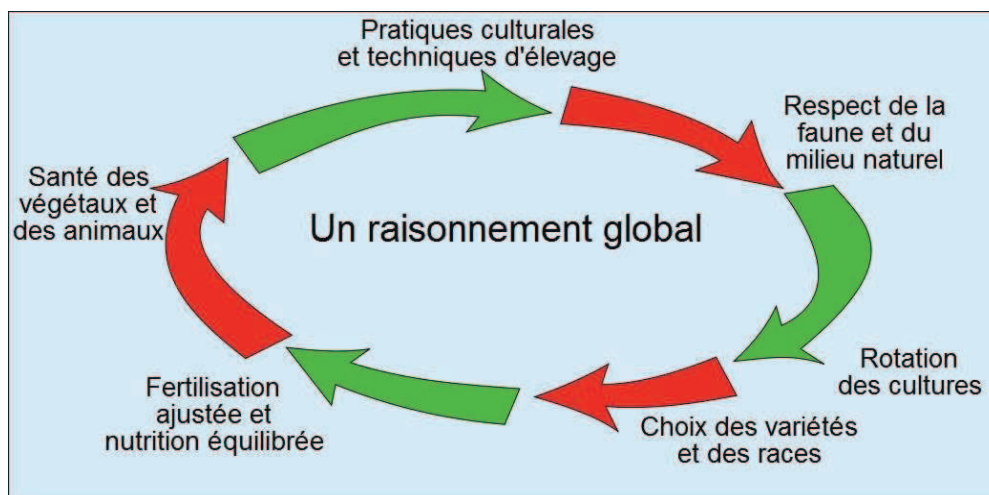


Figure 8: Représentation schématique du raisonnement que doivent suivre les agriculteurs souhaitant pratiquer une agriculture raisonnée (Source : © *historicaire*, CC by-sa 3.0)

²³ En France, une certification est délivrée par le ministère de l'Agriculture et de l'écologie aux agriculteurs respectant ces principes. Le document n'est obtenu que si 103 exigences sont remplies. La promotion de cette pratique agricole est assurée par le réseau Farre (Forum de l'agriculture raisonnée respectueuse de l'environnement).

²⁴ En France, les principales références réglementaires relatives à l'agriculture raisonnée sont les suivantes : l'arrêté du 21 juillet 2004 portant agrément d'organismes certificateurs (JO du 1er août 2004), l'arrêté du 10 mai 2004 portant agrément d'organismes certificateurs (JO du 13 mai 2004), le décret sur les conditions d'utilisation du qualificatif agriculture raisonnée (JO du 28 mars 2004), l'a- Arrêtés du 18 mars 2004 sur l'habilitation des premiers organismes certificateurs pour les audits de qualification agriculture raisonnée par le COFRAC : : ACVLAVE, OCACIA, ULASE ((JO du 28 mars 2004), le décret N° 2002-631 du 25 avril 2002 relatif à la qualification des exploitations agricoles au titre de l'agriculture raisonnée (JO du 28 avril 2002)

L'agriculture raisonnée se veut un compromis entre l'agriculture intensive et l'agriculture biologique. Le surcoût généré en France par le recours aux produits d'agriculture raisonnée serait de seulement 3 à 4 %, contre 30 % pour les produits bio. Une subvention de l'Etat est souvent accordée par les Etats pour inciter les exploitations à s'engager dans le dispositif de l'agriculture raisonnée. Cette aide financière permet de prendre en charge une partie des surcoûts liés à l'obtention de cette qualification.

Certaines réserves sont exprimées sur la pratique de l'agriculture raisonnée. Les agriculteurs bio, notamment, la jugent trop peu contraignante, et estiment que *"la moitié des exigences [de son] cahier des charges relève en fait du simple respect de la réglementation"* (Jardonnat, 2002). D'autres pensent tout simplement que compte tenu de l'absence de seuils clairement définis l'agriculture raisonnée n'est qu'une forme d'agriculture conventionnelle chimiquement intensive mais... qui respecte la loi (celle portant sur le stockage des pesticides dans un local fermé par exemple). Les règlements existants ne fixent pas d'objectif précis de réduction des pesticides. Pour l'alimentation, il existe des Limites Maximales de Résidus (LMR) qui fixent les seuils réglementaires de concentration de résidus de produits pesticides, biocides ou de médicaments vétérinaires, au-delà duquel la commercialisation d'un produit alimentaire n'est plus autorisée, qu'il s'agisse de denrées destinées à l'alimentation humaine ou à l'alimentation animale. Cependant, ces LMR sont loin d'être suffisantes pour protéger la santé et ce pour différentes raisons. Les arguments avancés sont que si ces LMR sont établies après une évaluation des risques, pour les pesticides, il est important de savoir que l'évaluation s'intéresse d'abord aux pratiques culturales puis ensuite à la question du risque sanitaire. Ainsi, une LMR est fixée par « couple » : un pesticide et un aliment. Ce qui signifie que lorsqu'un pesticide est couramment utilisé sur un fruit, un légume ou une céréale, la LMR de ce pesticide aura tendance à être élevée pour limiter les risques de dépassement. Enfin, il n'existe pas de LMR pour un mélange de résidus de pesticides, alors que nous sommes le plus souvent exposés non pas à une seule molécule mais bien à un cocktail de différents pesticides.

Pour les pays du Sud de la Méditerranée, l'on constate, d'une part, que les populations agricoles qui exercent une forte pression sur des ressources naturelles limitées et fragiles surexploitent les ressources disponibles, et que, d'autre part, les politiques publiques inscrivent partout l'intensification des modes d'exploitation des ressources naturelles et l'augmentation de la productivité dans leur agenda. Le constat qui est établi montre que les périmètres irrigués mobilisent les techniques les plus intensives, et que les consommations d'engrais et de pesticides ne sont pas négligeables. Les terres fertiles, généralement localisées en plaine, sont sujettes à des dégradations environnementales importantes (salinisation des sols en zones d'irrigation et des nappes phréatiques), suite aux usages peu maîtrisés de pesticides et de fertilisants. Dans aucun des pays l'écart est grand entre les objectifs de protection des ressources naturelles affichés par les politiques publiques agricoles et les réalisations. Les mesures écologiques sont insuffisantes sinon totalement absentes (Bessaoud-Requier-Desjardins, 2011).

Conclusion du chapitre 1

Bien que les trajectoires historiques des agricultures des pays du Nord et du Sud de la Méditerranée soient divergentes, toutes les agricultures sont confrontées à des contraintes environnementales et sanitaires résultant de systèmes productivistes. Les pratiques agricoles intensives – avec un recours excessif aux engrais et pesticides - développées par les grandes exploitations agricoles ont fait l'objet de mesures définies par les politiques publiques en Europe. Dans ces derniers pays, à côté de l'agriculture productiviste, émerge des exploitations à orientation biologique et une agriculture raisonnée dont les règles se perfectionnent progressivement. Si les progrès enregistrés sont réels, les ressources budgétaires se concentrent encore dans l'agriculture intensive : si les aides à la promotion d'une agriculture raisonnée existent bien, les règles édictées dans l'usage des engrais et pesticides ne sont pas suffisamment contraignantes pour assurer un essor significatif et durable.

Faute de moyens budgétaires et de cadre législatif approprié, les pays du sud sont en déficit de politiques écologiques fortes et de mesures de protection efficace de leurs consommateurs.

Dans les pays méditerranéens, il apparaît assez clairement que les usages des engrais et pesticides ne sont pas socialement contrôlés et que les risques sur l'environnement et pour la consommation humaine persistent. Le Liban a bien enregistré, au cours de la période de stabilité politique qui suit la guerre civile (1975 – 1990), une relance de son agriculture et de ses consommations des produits intermédiaires (engrais et pesticides) affectées aux cultures horticoles et arboricoles. Les consommations, au cours de cette période, ont connu une évolution positive, et comme dans de nombreux pays les questions de qualité sanitaire qui se sont posées ont conduit à une réglementation concernant ces usages. Les normes imposées par les marchés se sont traduites par des restrictions et des interdictions limitant leurs usages. Ces pays sont en attente de seuils et de limites dans l'usage des engrais et pesticides, voire de mesures d'interdiction d'un certain nombre de produits dont les effets sur l'environnement, la santé des agriculteurs et des consommateurs sont connus et validés scientifiquement.

CHAPITRE II

POLLUTION DIFFUSE ET GESTION DES RISQUES LIÉS À L'UTILISATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES

Les évolutions historiques dont on a retracé à grands traits dans le premier chapitre les principales tendances ainsi que les faits relatifs aux risques environnementaux liés aux usages excessifs d'engrais et de pesticides ont fait l'objet au cours de ce XX^{ème} siècle de développements théoriques par une littérature multidisciplinaire (géographie, économie, agronomie, biologie, sciences de l'environnement). De nouveaux paradigmes scientifiques accompagnés de concepts fondateurs et de méthode d'investigation ont ainsi été formulés par la science au cours de ce XX^{ème} siècle. L'on sait que dès 1940, Albert Howard critique Liebig et la chimie agricole et revisite la théorie de l'humus (Howard, 2007)²⁵. Il exprime ses réserves sur le recours à des produits chimiques, dénonce ce qu'il appellera la « mentalité NPK », et énonce les premiers principes de ce que l'on nomme l'agriculture biologique (Robin *et al.*, 2007). Nous assisterons plus tardivement à un foisonnement d'études et de recherches portant sur les excès des consommations d'engrais chimiques, de pesticides et sur les pollutions concernant la qualité des sols et des nappes phréatiques.

Notre recherche portant sur la pollution diffuse et la gestion des risques liés à l'utilisation de produits phytosanitaires se propose ainsi de recourir aux résultats validés scientifiquement, et de ce qui constitue les « fondamentaux » de cette littérature spécialisée.

Il s'agit de situer notre champ de recherche dans une littérature théorique, apte à répondre aux questions de notre problématique de recherche. Nous proposons dans ce chapitre de restituer dans un premier temps un état de l'art portant sur les questions portant sur la pollution diffuse et la gestion des risques liés à l'utilisation des produits phytosanitaires (section 1), ensuite de rappeler les concepts-clés autorisant une lecture de la réalité que nous nous proposons d'étudier et permettant de fonder un modèle explicatif des faits.

Quel est l'état de l'art portant sur les questions de pollution diffuse ?

1. Pollution diffuse : Définition et impacts environnementaux

Les problèmes environnementaux d'origine anthropique sont nombreux et concernent toutes les ressources naturelles (Calvet *et al.*, 2005). De la dégradation des sols et des eaux liés à une surexploitation, aux atteintes à la biodiversité, à la faune ou à la flore, les modes d'altération de la qualité et des fonctions des ressources naturelles par l'activité humaine sont devenus de grandes questions de société. Comment produire et perfectionner les techniques sans ruiner la nature, telle est la question qui sera posée vers la fin du XX^{ème} siècle. Comment contrôler les pratiques agricoles afin de conserver les ressources naturelles et réduire l'impact de l'activité humaine sur l'environnement ? Telles sont les questions qui émergeront progressivement et seront les nouveaux champs de recherche ouverts à la science.

²⁵ Howard, A (2007). *The soil and health: a study of organic agriculture*. University Press of Kentucky

La définition des notions de base sera dès lors une étape importante dans la compréhension des problèmes et des réponses scientifiques qui seront formulées.

L'impact sur l'environnement sera défini comme l'effet d'une activité humaine, pendant un temps donné, sur un espace défini et sur une composante de l'environnement englobant les aspects biophysiques et humains (Andrée *et al.*, 1999).

Ils ont trait aux *risques environnementaux* sont les risques liés à l'environnement physique, chimique et biologique de l'homme et de tous les organismes vivants.

Avant de détailler la notion de risques environnementaux, il est nécessaire de définir le concept de risque.

Dans la littérature, *le concept de risque* est lié à celui de «danger». Par définition, les concepts de risque et de danger sont à la base du management du risque quel que soit leur nature. Ils ont fait l'objet d'exposés et de discussions détaillées (OCDE, 1996 ; Van Leewer et Hermens, 1996).

Un danger est toute substance chimique et tout micro-organisme de fait de leurs propriétés, et tout phénomène et toute action de fait de leurs caractéristiques, susceptibles de causer un effet nocif sur l'homme et/ou l'environnement (Calvet *et al.*, 2005).

Un risque est la probabilité d'occurrence d'un effet nocif résultant de l'exposition d'une entité (homme, population, écosystème...) à un danger. A côté de cette caractéristique quantitative, un risque possède deux caractéristiques qualitatives : sa nature et son aptitude (sa gravité) (Calvet *et al.*, 2005)

Ainsi, un risque s'exprime par un nombre compris entre 0 et 1. Son estimation est très difficile et parfois impossible car le risque est une variable semi-quantitative ou la plupart des fois est qualitative. La nature du risque dépend de la nature d'entité concernée (ex : homme, milieu naturel, exploitation agricole ...).

Il est à noter qu'il n'existe un risque pour une entité donnée que si elle est exposée à un danger. Nous pouvons signaler que l'existence d'un risque dépend non seulement de l'existence du danger mais l'exposition à ce danger.

Dans notre recherche, nous nous sommes limités aux risques environnementaux. Ces derniers sont les risques liés à l'environnement physique, chimique et biologique de l'homme et de tous les organismes vivants. Dans la littérature, il existe différents types de risques environnementaux ainsi que plusieurs catégories de risques définies en fonction du type de dangers et des entités concernés (tableau 8).

Au cours de cette dernière décennie, plusieurs organisations internationales telles que l'OCDE, la FAO et l'OMS ont confirmé qu'il y a eu un développement significatif des études relatives aux risques environnementaux ainsi que des méthodes de leur gestion.

Tableau 8: Exemples des dangers et des risques (Source : Calvet *et al.*, 2005).

| Danger (agent ou action) | Entité concernée | Nature du risque |
|---|---|--------------------------|
| Substances chimiques, micro-organismes, variations de l'environnement physique et sociologique... | Homme | Risques pour la santé |
| Substances chimiques, micro-organismes, agents climatiques, aménagements défectueux... | Homme, milieux naturels dans leurs composantes physiques et biologiques | Risques environnementaux |
| Système de production inapproprié, pratiques culturelles inadaptées ou mal conduites... | Exploitation agricole | Risques agricoles |
| Procédés industriels mal maîtrisés, bâtiments défectueux... | Entreprise industrielle | Risques industriels |
| Mauvaises stratégies financières, modes de gestion financière inefficients... | Entreprises, collectivités | Risques financiers |
| Lois, actions sociales inadaptées... | Groupes d'individus, collectivités territoriales... | Risques sociologiques |

Tableau 9: Exemples des dangers et des risques environnementaux (Source : Calvet *et al.*, 2005).

| Danger (agent ou action) | Entité concernée | Nature de risque |
|--|---|---------------------------------------|
| Substances chimiques | Homme | Risques toxicologiques |
| | Organismes vivants | Risques éco-toxicologiques |
| | Air, sols, eaux | Risques de pollution chimique |
| Micro-organismes | Air, sols, eaux | Risques de pollution microbiologiques |
| | Homme | Risques pathologiques |
| Agents climatiques, mauvaise utilisation du sol... | Sols | Risques de dégradation des milieux |
| Mauvaise utilisation de véhicules, de machines... | Habitation, lieux de travail et de loisirs, homme | Risques pathologiques |
| Mauvaise utilisation de l'espace | Paysages | Risques esthétiques |
| Introduction d'un organisme vivant dans un milieu | Milieu concerné par l'action | Risques biologiques |

1.1. Les risques environnementaux liés aux pesticides - Pollution des milieux naturels

Le terme *pollution*, tel qu'il est défini par la directive européenne, désigne: «*l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substance ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres. Cette atteinte porte sur la détérioration des biens matériels, de l'agrément de l'environnement ou d'autres utilisations légitimes de ce dernier. La contamination par des polluants atteint un niveau seuil induisant*

ainsi des dommages, des déséquilibres, des effets nocifs et interfère avec le bien-être des organismes vivants» (Directives Européenne 2000/60/CE du 23 Octobre 2000).

Selon la définition du terme pollution, la présence de substances est considérée comme polluante dès lors qu'elle atteint un seuil pour lequel des dommages sont susceptibles de se produire.

L'évocation de la notion de pollution est à relier à la notion de contamination. D'après le BRGM²⁶ (2000), le terme de contamination désigne *«la présence anormale de substances, des microorganismes, d'objet et des êtres vivants. Historiquement cette notion s'applique aux microorganismes puis aux substances radioactives»*.

L'utilisation des pesticides est source de dangers qui présentent des risques sur l'environnement, surtout lorsque la grande quantité de pesticides appliquée n'atteint pas la cible directement et se disperse dans divers compartiments de l'environnement.

Lors du traitement direct des produits phytosanitaires, les milieux naturels captent les pesticides par trois voies de transfert qui seront détaillées dans la partie 2.2 (transfert à partir de l'air, du sol et par voie hydrique).

Selon plusieurs auteurs (IFEN, 2004 ; Bedos *et al.*, 2002 ; Briand, 2003 ; Rousseau *et al.*, 2004), les programmes de surveillance de l'air et des eaux signalent que la pollution qui en résulte est souvent due à l'utilisation de nombreux pesticides, et dans la majorité de cas avec des concentrations très élevées. Ce type de pollution est appelé «pollution diffuse d'origine agricole». D'après CORPEN²⁷ (1996), la pollution diffuse est l'entraînement de produits épandus sur les parcelles cultivées vers les eaux superficielles ou souterraines, sans qu'il y ait à proprement parler faute de l'utilisateur. Selon le dictionnaire de l'environnement, *la pollution diffuse est une pollution des eaux due non pas à des rejets ponctuels et identifiables, mais à des rejets issus de toute la surface d'un territoire et transmis aux milieux aquatiques de façon indirecte, par ou à travers le sol, sous l'influence de la force d'entraînement des eaux en provenance des précipitations ou des irrigations* (<http://www.dictionnaire-environnement.com>). Et selon Domange (2011) et du point de vue de la réglementation, la notion de «pollution diffuse» d'une nappe souterraine renvoie à une pollution dont l'origine ne peut être localisée en un point précis mais en une multitude de points non dénombrables et répartis sur une grande surface.

L'activité agricole est l'une des activités principales à l'origine de ce type de pollution. Une grande part des substances actives apportées aux végétaux n'atteignent pas la cible et ne jouent pas un rôle agronomique. Elles seront alors susceptibles d'atteindre le système sol et d'être transférées vers les eaux de surface au terme d'un certain nombre de processus (qui seront détaillé dans la partie 2.2 de ce chapitre II). En 1996, Barriuso *et al.* ont constaté que les produits phytosanitaires apportés aux végétaux engendrent globalement des pertes sous différentes formes : volatile, ruisselante et entraînement en profondeur.

²⁶ Bureau de Recherche Géologique et Minières

²⁷ Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement

Dans la section de ce chapitre qui suit, nous allons recenser les différents processus mis en jeu ainsi que leur rôle dans le transfert des pesticides vers les eaux et leur comportement dans les sols.

2. Devenir des pesticides dans les compartiments de l'environnement

Les pesticides, dès leur application dans l'environnement, subissent de nombreux processus qui vont contribuer à leur dissipation (Wilfried, 2014). L'utilisation de pesticides au cours des 100 dernières années a pour effet l'ajout d'une quantité importante de molécules dans l'environnement. Tôt ou tard, ces molécules circulent dans l'environnement naturel et contaminent les milieux abiotiques, soit l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Ce résultat est dû à plusieurs facteurs: l'usage excessif de pesticides, la persistance de ceux-ci, les événements accidentels, la négligence de la part des applicateurs, la portion de l'application qui n'atteint pas sa cible et la dispersion atmosphérique et hydrologique (Regnault-Roger, 2005). La figure 9 illustre bien comment les pesticides se dispersent dans l'environnement, les pertes lors de l'application et les processus conduisant à la contamination de l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.

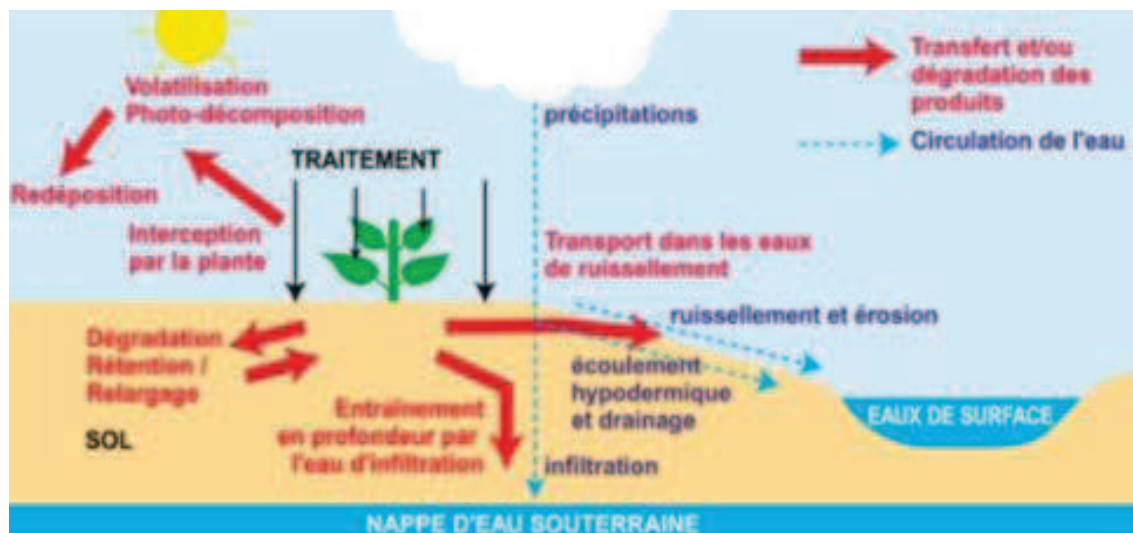


Figure 9: Les différentes voies de transfert de la pollution diffuse (CORPEN, 1996).

Lors de leur traitement en plein champs, et suivant le stade de développement de la végétation, 10 à 70% des produits peuvent être perdus dans le sol (Jensen, 2003), alors que 30 à 50% des produits peuvent être perdus dans l'air sous forme de gouttelettes ou de gaz (Van Den Berg *et al.*, 1999).

La façon dont la matière active va se dissiper dans l'environnement est conditionnée par la modalité de leur utilisation lors de l'application des pesticides. La propagation des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement dépend de la manière dont les pesticides sont apportés (par incorporation dans le sol, pulvérisation ...). Il est à noter aussi que le comportement des pesticides est influencé par la formulation qui est utilisée (Dubey *et al.*, 2009, Shirley *et al.*, 2001, Chevillard *et al.*, 2012, Katagi, 2008, Blanco *et al.*, 2009).

Après l'application d'un pesticide, un ensemble de mécanismes est soumis et va conditionner la dissipation du pesticide dans les différents compartiments de l'environnement de la parcelle

jusqu'aux masses d'eau (Guimont, 2005). Les phénomènes de rétention et de transformation vont fortement affecter le devenir des pesticides dans les sols.

Pour une meilleure compréhension du mouvement des pesticides dans l'environnement, il est nécessaire de détailler les processus clés : les phénomènes de rétention (i.e sorption) et de transformation (i.e dégradation) des pesticides dans les sols. Ces phénomènes sont des réactions qui affectent fortement les mouvements des pesticides à travers la zone insaturée du sol vers les eaux souterraines et de surface.

2.1. Processus de rétention

Le terme « rétention » - selon Barruio et al. (2000) – englobe l'ensemble des phénomènes qui font passer les molécules des pesticides dans la phase solide. Selon Bovin (2003), la rétention est majoritairement caractérisée par la sorption. La sorption regroupe deux catégories de processus : l'adsorption et la désorption.

2.1.1. L'adsorption

L'adsorption peut être décrite de manière générique comme : « un processus d'attraction ou de répulsion entre une molécule en phase liquide ou gazeuse et la surface d'un solide. Selon Bailey et White (1964), *l'attraction ou la répulsion est le résultat d'interactions entre le champ de force de la surface de l'adsorbant et la molécule ou de l'ion adsorbé.*

Selon la littérature et de manière plus spécifique, les phénomènes d'adsorption dans les sols sont définis par : « *le passage d'un soluté de la phase liquide, à la surface d'un adsorbant solide. C'est un phénomène réversible qui aboutit à un équilibre entre les molécules adsorbées sur la phase liquide et les molécules libres dans la solution. La désorption est le phénomène inverse* » (Calvet, 1989).

Autrement dit, le phénomène d'adsorption est caractérisé par l'accumulation à la surface d'un solide (sol) de molécules (pesticides), ionisées ou non. Il y a donc à la surface de séparation (interface) deux phases (figure 10):

- (1) Une phase solide constituée par des particules d'argiles et de matières organiques (MO) dans le cas du sol ;
- (2) Et une phase liquide (la solution du sol) dans laquelle se trouvent des molécules des pesticides soit en solution soit en suspension (Jamet, 1979).

L'interface solide/fluide peut avoir lieu aussi bien à la surface externe de la particule du sol faisant face au fluide circulant qu'à la surface interne des pores en contact avec la solution du sol (Pignatello, 2000).

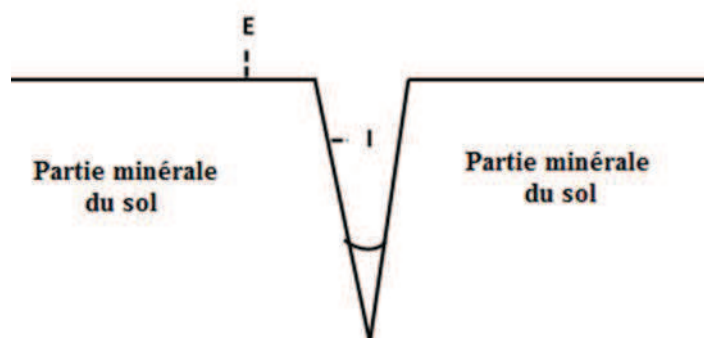


Figure 10: Les différents sites d'adsorption d'une molécule organique: sur la surface externe de la particule de sol (E) et/ou sur la surface interne des pores (I) (d'après Pignatello (2000))

Selon Barriuso *et al.*, (2000), l'adsorption sensu stricto est définie comme un phénomène interfacial rapide et réversible. Cependant, l'occurrence de cinétiques d'adsorption lente a été mise en évidence par plusieurs auteurs (Pignatello, 1989; Gaillardon, 1996; Pignatello et Xing, 1996). Elles entraîneraient une incomplète réversibilité, et seraient régulées par la diffusion moléculaire du pesticide dans la matrice de sol.

Toujours selon Barriuso *et al.*, (2000), l'adsorption détermine les quantités de pesticides retenues et l'énergie des interactions impliquées dans la rétention et la diffusion influencerait la cinétique de sorption. Donc et d'après la littérature, les deux phénomènes "adsorption" et "diffusion" sont confondus sous le terme de **sorption**.

2.1.2. Principaux mécanismes de l'adsorption

Différents types d'interactions interviennent dans l'adsorption d'un composé organique avec un sol, elles sont globalement de nature chimique (chimi-sorption) ou physique (physi-sorption). Adsorption et désorption sont donc des termes généraux : ils se rapportent simplement au phénomène de transfert de masse par lequel des molécules quittent la phase fluide pour s'associer avec une phase immobile et vice-versa. En aucun cas, ils ne font référence à la nature de l'interaction ou au transport des molécules adsorbées une fois dans les confins de la phase immobile (Pignatello, 2000).

- Les liaisons relatives à l'**adsorption physique** sont de nature électrostatique du type forces de Van der Waals. Leur énergie est faible et la surface adsorbante peut être recouverte de plusieurs couches moléculaires (additivité) ; les couches les plus éloignées étant adsorbées moins solidement que les couches proches de la surface adsorbante (Jamet, 1979). Les forces de Van der Waals sont fréquentes dans l'adsorption des pesticides non-ioniques et non-polaires sur les acides humiques (Senesi, 1992).
- L'**adsorption chimique** inversement, met en jeu des énergies de liaison importante. Les mécanismes chimiques d'adsorption les plus courants sont la protonation, l'échange de ligands et l'échange d'ions (via liaison ionique ou échange de cations). Selon les cas, ces mécanismes dépendent des propriétés des feuilletts d'argile (dissociation de l'eau, capacité d'échange) et/ou des matières organiques. Quand

plusieurs couches de molécules sont retenues sur une surface adsorbante, seule la première est liée chimiquement, les autres sont retenues par adsorption physique.

- La **liaison hydrogène (ou liaison H)** est un mécanisme à la fois physique (électrostatique) et chimique (transfert de charge). Il s'agit d'une liaison de faible énergie. La présence de nombreux groupements contenant un oxygène (–O) ou un hydroxyl (–OH) sur les substances humiques rend fortement probable la formation de liaisons H avec les pesticides possédant les groupements complémentaires. Cependant, une forte compétition des pesticides avec les molécules d'eau est à craindre pour de tels sites (Senesi, 1992). Les pesticides anioniques et acides (phénoxyacides et esters) peuvent être adsorbés par liaison H sur les substances humiques pour des valeurs de PH inférieures à leur pKa, dans leur forme non-ionisée grâce à leurs groupements –COOH et –COOR (Khan, 1973; Carringer *et al.*, 1975). De même, la liaison H est supposée jouer un rôle important dans l'adsorption sur les substances humiques de plusieurs pesticides non-ioniques telles que les urées substituées (type isoproturon).

D'après plusieurs auteurs (Senesi, 1992; Gevaio *et al.*, 2000; Ertli *et al.*, 2004), les différents mécanismes d'adsorption ne s'opèrent pas tous simultanément (deux au maximum). Cependant leur compétition détermine le devenir du pesticide dans les sols et dans les systèmes aquatiques.

Les facteurs influant sur l'adsorption

Il existe plusieurs facteurs influant sur les différentes interactions entre le sol et les pesticides appliqués. D'après Ertli *et al.* (2004), ces interactions sont contrôlées par les propriétés de la molécule d'une part et du milieu poreux (composition de la matière organique et chimique de la solution) d'autre part. Ainsi, et selon Yaron (1989), les conditions ambiantes (température et humidité) influencent aussi le phénomène d'adsorption.

- Caractéristiques physico-chimiques du sol

D'après Bailey et White (1970), les constituants du sol qui contrôlent l'adsorption sont majoritairement la matière organique (MO) naturelle du sol et les minéraux argileux.

La réactivité de la fraction organique du sol aux substances humiques a été attribuée par les groupements fonctionnels impliqués. Il s'agit généralement des groupements carboxyliques, aminés et hydroxylés. Les surfaces réactives attribuées à leurs groupements oxygénés et/ou hydroxylés, plus ou moins chargés dans le cas où la fraction minérale, sont constituées de minéraux argileux cristallins, d'oxydes et hydroxydes (de fer et d'aluminium principalement) cristallins et amorphes.

- La matière organique du sol

Plusieurs études suggèrent que les polluants organiques présentent une plus grande affinité pour les surfaces organiques que pour les surfaces minérales (Senesi, 1993). Le contenu et la nature de la MO du sol jouent par conséquent un rôle majeur dans le devenir des pesticides dans le sol. Pour les sols à **haute teneur en MO (> 5%)**, l'adsorption des pesticides est mise en relation avec le contenu en MO totale, **la nature de la MO ayant dans ce cas peu d'influence** (Bailey et White, 1970). La MO totale d'un sol inclut une fraction insoluble majoritaire (fraction solide) et une fraction soluble minoritaire. La présence de matières

organiques solubles influencerait l'adsorption des pesticides hydrophobes (Madhun *et al.*, 1986a).

Pour les sols de **faible teneur en MO (<5%)**, l'adsorption des pesticides est mise en relation avec la fraction minérale, prédominée par la fraction argileuse, et la nature de la MO. Une augmentation du **contenu en argile a pour effet d'abaisser la mobilité du pesticide**. La nature de l'argile et l'identité des cations majeurs de la solution du sol deviennent alors des facteurs importants (Spark et Swift, 2002).

- *Les minéraux argileux du sol*

Les minéraux argileux selon leur nature, leur charge électrique totale, la présence et la nature des cations échangeables à leur surface, revêtent une certaine importance dans le cas d'interactions, notamment avec des pesticides cationiques.

- *Effet du PH du sol*

Le PH de la solution du sol peut influencer directement ou indirectement les mécanismes de sorption. Un changement de PH peut ainsi altérer la charge nette des pesticides ionisables et/ou des composants du sol, modifiant directement les interactions de sorption. Frissel et Bolt (1962) ont montré que l'adsorption sur des argiles, des herbicides de structures moléculaires très différentes, augmentait quand le PH baissait. Des variations de PH peuvent également modifier l'adsorption en jouant sur le degré d'agrégation du sol. Ainsi, un PH élevé associé à la présence de cations monovalents (Na^+ , K^+) et une conductivité ionique faible entraînent une dispersion des argiles et des substances humiques (augmentation de MO dissoute) les rendant plus accessibles aux interactions avec les pesticides (de Jonge et de Jonge, 1999).

- *Caractère physico-chimique de la molécule*

Les propriétés moléculaires de l'adsorbat²⁸ revêtent une grande importance dans les réactions d'adsorption.

D'après Bailey et White (1970), les propriétés qui déterminent majoritairement le rôle de l'adsorbat dans les processus d'adsorption et de désorption des molécules organiques par les colloïdes de sol sont :

(1) La structure moléculaire du pesticide: Elle est déterminée par la nature des groupements fonctionnels et des groupes de substitution de la molécule, leurs positions respectives les uns par rapport aux autres dans la molécule, ainsi que la présence de double-liaisons. La structure du pesticide détermine indirectement son potentiel d'ionisation.

(2) Le pKa de la molécule: Il exprime le caractère acide ou basique du pesticide c'est-à-dire qu'il détermine son état d'ionisation à un PH donné. Le pKa donne également une indication de l'importance de l'adsorption de la molécule ainsi que sa facilité à être désorbée à partir des systèmes colloïdaux.

(3) La solubilité du composé dans l'eau: C'est une caractéristique dominante dans les interactions des sols avec certaines familles de composés. Ainsi, les s-triazines et les urées substituées présentent une relation directe entre solubilité dans l'eau et

²⁸ Ensemble des molécules adsorbées.

adsorbabilité sur les argiles. En général, les pesticides très solubles non-ioniques ont de faibles coefficients d'adsorption pour les sols, alors que le contraire est observé dans le cas des composants non-ioniques de faible solubilité (Yaron, 1989).

(4) La taille moléculaire de l'adsorbat: Elle a un effet sur l'amplitude de l'adsorption et sur le pouvoir des composés organiques à être adsorbés notamment sur les surfaces internes des minéraux argileux fortement chargés (type vermiculite). Ainsi, un ion "large" couvrant plus d'un site d'échange électrostatique entraînerait une baisse de la capacité d'adsorption du minéral.

- *Les facteurs de l'environnement*

L'environnement d'un sol est déterminé par des facteurs externes dont les plus influents sur le phénomène de sorption sont la teneur en eau et la température. La teneur en eau du sol affecte le processus d'adsorption en modifiant l'accessibilité des sites d'adsorption et les propriétés de surface de l'adsorbant. Ainsi, les molécules d'eau attirées par les surfaces argileuses (via les cations échangeables) fournissent des sites de sorption aux molécules pesticides. On assiste simultanément à une acidification des surfaces argileuses (Yaron, 1996).

L'hydratation de la MO du sol en relation avec l'adsorption de pesticide, bien qu'ayant été moins étudiée, influencerait également l'accessibilité des pesticides aux sites de sorption en modifiant la forme moléculaire des substances humiques. De ce fait, certains pesticides pourraient pénétrer dans les substances humiques gorgées d'eau et se retrouvent piégés, aboutissant ainsi à une rétention forte voire irréversible. Enfin, on constate des phénomènes de compétition pour les sites d'adsorption entre les pesticides non-ioniques et les molécules d'eau (Yaron, 1989).

Les processus d'adsorption sont exothermiques (dégagement de chaleur). Par conséquent, des changements dans la température du sol peuvent avoir un effet direct sur la distribution de phase des pesticides. En général, une augmentation de température conduit à une décroissance de l'adsorption. Cependant, des exceptions ont montré que les températures élevées pouvaient affecter la solubilité du produit et par suite entraîner des phénomènes d'adsorption (Bailey et White, 1970).

La relation adsorption/température reflète donc non seulement une contribution en énergie au processus d'adsorption mais aussi un changement de solubilité de l'adsorbat (Mills et Biggar, 1969; Yaron et Saltzman, 1978).

- *Les équations des calculs*

La rétention des pesticides par les sols se caractérise par l'établissement d'isothermes d'adsorption (et de désorption). Une isotherme d'adsorption est une représentation graphique des données à l'équilibre de la quantité de pesticide adsorbée sur le sol en fonction de la concentration à l'équilibre, à une température donnée. Les isothermes d'adsorption sont décrites par des fonctions mathématiques, parmi lesquelles l'équation (ou modèle) de Freundlich est la plus largement utilisée :

$$x/m = K_f.Ce^n$$

Avec :

x/m : est la quantité de pesticide adsorbée sur le sol (mg.kg^{-1}) ;

C_e : est la concentration du pesticide dans la solution, en équilibre avec la phase adsorbée (mg.l^{-1});

« K_f » et n sont des paramètres empiriques :

K_f représente la capacité d'adsorption ($\text{mg}^{1-nf} \cdot \text{l}^{nf} \cdot \text{kg}^{-1}$),

n est un indice d'affinité du pesticide pour le sol.

Dans de nombreux cas, les valeurs de l'indice d'affinité « n » sont voisines de l'unité ou légèrement inférieures, les isothermes sont alors proches de la linéarité. L'adsorption alors est décrite par le modèle linéaire de Freundlich :

$$K_d = (x/m) / C_e$$

Avec :

K_d est le coefficient de partage ou de distribution des molécules entre les phases solide et liquide.

Couramment, et du fait que la composante organique des sols est un facteur dominant de l'adsorption des pesticides sur les sols, le coefficient de partage (K_d) est rapporté à la teneur en carbone organique du sol (C.O %) :

$$K_{oc} = (K_d / \text{C.O } \%).100$$

Avec : K_{oc} le coefficient de partition organique.

2.2. Processus de transformation

Une fois qu'un pesticide a atteint le sol, il est sujet à des phénomènes de transformation d'origine principalement biologique et/ou chimique dont l'intensité est contrôlée par ses propriétés physico-chimiques, les caractéristiques du sol et les conditions ambiantes.

2.2.1. Définition des processus de transformation

Les processus majeurs de transformation des pesticides sont la dégradation biochimique (ou biologique) et la dégradation chimique (ou abiotique) qui peuvent agir simultanément.

Au niveau de la zone racinaire, la dégradation se produit majoritairement par processus microbiologique.

Inversement, sous la zone racinaire, la biodégradation est ralentie du fait d'une moindre activité biologique. La transformation se traduit par l'apparition d'autres molécules - des métabolites - de propriétés (polarité, solubilité dans l'eau), de réactivité, de comportement global et d'effet (toxicité par exemple) propres, différent de celles des molécules dites parents (Yaron, 1989).

Le stade ultime de la dégradation d'un pesticide est la minéralisation, que l'on définit comme la conversion complète d'une molécule organique stable en formes inorganiques stables (C, H, N, P, ...) (Schwarzenbach *et al.*, 2003).

- *Dégradation*

La dégradation est un processus clé dans le devenir des pesticides dans le sol. Elle est due à de nombreuses transformations abiotiques (physico-chimique) ou biotiques (biologique). D'après Calvet (2005), ces modifications peuvent être partielles, par élimination d'un groupe fonctionnel, ou complètes jusqu'à la production de molécules minérales. Lorsque la transformation est partielle, elle se traduit par l'apparition de nouvelles molécules : les métabolites, aux des propriétés différentes des molécules mères (Yaron, 1989).

La dégradation abiotique est essentiellement associée à des réactions d'hydrolyse (CAO *et al.*, 2013) qui peuvent être induites par la radiation solaire (photo-dégradation) (Zapata *et al.*, 2009) mais ce processus reste négligeable dans les sols au regard de la biodégradation.

- *La biodégradation*

Malgré la présence de processus abiotique, la dégradation est dominée par l'activité biologique qui joue un rôle important dans le devenir des matières actives (Alexander, 1987, Singh & Walker, 2006). Parmi des nombreux micro-organismes impliqués dans la dégradation des pesticides, les plus représentés sont les bactéries et les champignons (Singh & Walker, 2006, Rodriguez-Rodriguez *et al.*, 2013).

Selon leur matériel enzymatique, les microorganismes vont pouvoir dégrader partiellement ou totalement les pesticides présents dans le sol (Van Eerd *et al.*, 2003).

Parmi les différents mécanismes de transformation, on distingue la dégradation métabolique et la dégradation co-métabolique (Soulas, 1985, Van Eerd *et al.*, 2003, Lucas *et al.*, 2008).

La dégradation métabolique concerne les organismes qui ont le matériel enzymatique nécessaire pour utiliser la matière active comme source de carbone et/ou d'azote entraînant la dégradation totale du pesticide (Soulas, 1985).

Dans le cas de la dégradation co-métabolique, les microorganismes utilisent un autre substrat dans le milieu pour dégrader la molécule. Ce processus génère une dégradation partielle du pesticide et entraîne la formation de métabolites (Soulas, 1985).

Indépendamment des processus impliqués dans la transformation des pesticides, ils vont être influencés par différents facteurs associés aux propriétés de la molécule, aux populations de microorganismes et aux conditions du milieu (Arias-Estevez *et al.*, 2008, Navarro *et al.*, 2013).

2.2.2. Les facteurs influant la biodégradation

La biodégradation est affectée par la structure chimique du produit phytosanitaire, le type du sol, le PH, l'humidité et la température du sol.

- (1) La relation « structure chimique » du produit phytosanitaire** est utile pour déterminer la nature et la position des groupements chimiques qui fragilisent ou au contraire stabilisent la formule carbonée.

- (2) L'effet de la composition du sol sur la persistance d'un pesticide peut s'avérer contradictoire. D'une part, la **teneur en MO**, si elle est élevée dans un sol, tend à favoriser le maintien d'une microflore abondante et active en termes de dégradation des pesticides. En même temps, elle privilégie l'adsorption des pesticides, empêchant alors le processus de dégradation. La **texture** du sol influence également indirectement la biodégradation des pesticides, en modifiant la structure et donc la taille de la porosité. D'après Yadurajo (1994), selon la taille des pores, les micro-organismes auront un accès plus ou moins facilitateur au produit de même que le sol sera plus ou moins « aéré ».
- (3) Le **PH** du sol peut avoir des effets sur la biodisponibilité des pesticides à la dégradation en agissant à la fois sur la flore et sur la molécule. D'une part, il peut influencer la diversité et la quantité des populations microbiennes en présence. Le nombre de bactéries est souvent plus faible en conditions de sol acide qu'alcalin, et inversement pour les colonies de champignons. D'autre part, il influence le temps de demi-vie. Chez les herbicides de la famille des sulfonyles (acides faibles), par exemple, le temps de demi-vie peut être ainsi raccourci de centaines de fois en conditions de PH acide, par comparaison à des conditions de PH neutre ou basique. La biodégradation par hydrolyse du pont sulfonyle se ferait plus favorablement quand la molécule est sous forme neutre (pH acide) plutôt que sous forme anionique (pH > ou = 7) (Hultgren *et al.*, 2002).
- (4) Les **facteurs pédo-climatiques** tels que l'humidité et la température ne contrôlent pas spécifiquement la biodégradation mais plutôt l'activité métabolique microbienne. D'une part, la plupart des processus microbiens dans les sols sont dominés par des organismes mésophiles dont la température optimale de croissance est comprise entre 25 et 40°C. D'autre part, l'eau du sol est un élément essentiel d'échange des micro-organismes avec le milieu extérieur en même temps qu'elle influence le niveau d'oxygène dans le sol en concourant pour l'espace poreux (Yaron, 1989). Température et humidité ont des actions interdépendantes. Il suffit par conséquent que l'un de ces facteurs soit limitant pour que la dégradation s'arrête. C'est la raison pour laquelle sous nos latitudes, **la dégradation se produit essentiellement au printemps et à l'automne.**

2.2.3. Les équations des calculs

- *Modèle cinétique de 1er ordre*

Un grand nombre d'études ont établi que la biodégradation des pesticides dans un sol était décrite selon une cinétique de 1^{er} ordre dont la forme intégrée est:

$$C_t = C_0 \cdot \exp(-kt) \quad (1)$$

Avec:

C_t : la concentration en pesticide au temps t (mg.kg⁻¹ de sol) ;

C_0 la concentration initiale (mg.kg⁻¹ de sol) ;

k , la constante de dégradation (jours⁻¹) et t , le temps (jours).

Ce modèle décrit la disparition du pesticide au cours du temps. Après linéarisation de l'équation (1), on obtient l'équation suivante :

$$\ln C_t = \ln C_0 - kt \quad (2)$$

Le temps nécessaire pour faire disparaître la moitié de la dose apportée ($C_t = C_0/2$) est appelé **temps de demi-vie** ($t_{1/2}$ ou DT_{50}).

Il est déterminé par substitution dans l'équation (2):

$$t_{1/2} = \ln 2 / k \quad (3)$$

Le temps de demi-vie est l'une des constantes qui caractérisent un pesticide.

- *Modèle de Gompertz*

Le modèle de Gompertz est un modèle mathématique simple, initialement utilisé en écologie animale pour décrire des cinétiques de croissance. Il est, par ailleurs, utilisé pour décrire des cinétiques de minéralisation de pesticides dans le sol (Soulas, 1993; Rousseaux *et al.*, 2003; El-Sebaï, 2004). Ces auteurs modifient le modèle en y ajoutant un terme linéaire qui correspond au renouvellement de la biomasse et/ou à la minéralisation de la matière organique. Le pourcentage cumulé de minéralisation (ΣCO_2) est décrit selon la forme intégrée du modèle :

$$\Sigma CO_2 (\%) = p. \exp [- \exp (-k(t - t_i))] + ct \quad (4)$$

Avec :

P: représente le pourcentage maximal de minéralisation du pesticide,

Ti : l'abscisse au point d'inflexion (jours),

K : la constante de vitesse de minéralisation (% de $CO_2 \cdot \text{jour}^{-1}$),

C : le taux de renouvellement de la biomasse et/ou de minéralisation de la matière organique.

2.3. Le processus de volatilisation

La volatilisation correspond au processus physico-chimique par lequel un composé passe en phase gazeuse. La volatilisation peut être le résultat de l'évaporation de la phase liquide, la sublimation d'un solide et la désorption à partir de la matrice du sol (Bedos *et al.*, 2002). Elle peut avoir lieu lors du traitement et plusieurs semaines après le traitement. Elle se manifeste sur sol nu ou à partir du couvert d'une culture (Wolters *et al.*, 2003). La volatilisation dépend fortement des caractéristiques physico-chimiques des molécules et des conditions à la surface du sol (Yates, 2009).

Bien que les pertes par volatilisation de certaines molécules puissent atteindre 90% des applications (Bedos *et al.*, 2002), les transferts par volatilisation ne seront pas pris en considération dans le contexte actuel de notre recherche. En effet les molécules traitées au cours de la thèse sont peu sensibles à ce processus. Cependant la volatilisation peut être intégrée de manière indirecte dans la valeur de DT_{50} issue de mesures en plein champs.

2.4. Absorption par la plante

Après l'application du pesticide, une fraction peut être absorbée par la plante, par le feuillage ou par les racines (Cunningham S. D. *et al.*, 1997, Schroll & Kuehn, 2004, Juraske *et al.*,

2009). L'estimation de la quantité prélevée par les plantes est délicate et nécessite l'utilisation des molécules marquées (Lin *et al.*, 2003, Lin *et al.*, 2008, Grundmann *et al.*, 2011). Les quantités de matières actives ou métabolites prélevées par le système racinaire sont variables. Elles dépendent à la fois de la molécule et de l'espèce végétale considérée, à titre d'exemple moins de 4% pour l'atrazine, et pouvant aller jusqu'à 13% pour l'isoproturon (Lin *et al.*, 2003, Lin *et al.*, 2008, Grundmann *et al.*, 2011). Bien que non négligeable, ce processus ne sera pas traité dans la suite de la thèse, mais il sera pris en considération d'une manière indirecte comme pour la volatilisation.

2.5. Processus de transfert

Le déplacement des pesticides dans l'environnement est associé aussi au transfert hydrique. Le mouvement des pesticides peut se faire soit par ruissellement soit par lixiviation vers la zone non saturée (Corwin *et al.*, 1999).

Avant de détailler les deux notions de «ruissellement» et de «lixiviation», il est nécessaire d'aborder dans un premier temps les modalités du transport de l'eau dans le sol afin de procéder sur le mouvement des solutés et précisément sur le transport des pesticides.

- Structure du sol et circulation d'eau

Le sol est un compartiment de certaines structures que l'on définit comme un ensemble de volume, des minéraux et organiques (qui est connu par la phase solide du sol) et de vide de taille variable (qui est connu par l'espace poral du sol) (Baize et Jabiol, 1995).

- Structure de la phase solide du sol

L'agrégat ou micro-agrégat est l'unité fonctionnelle élémentaire de la structure du sol. Cette unité est définie comme un agglomérat de particules fines que l'on nomme colloïde et/ou des particules grossières.

Deux types de colloïdes sont engagés dans la formation des agrégats: les colloïdes organiques et les colloïdes minéraux :

- Les colloïdes organiques ou humiques, elles sont formés par les microorganismes du sol à la suite d'une décomposition par minéralisation et humification ;
- Les colloïdes minéraux constituent la fraction fine du sol (particules < 2 µm) autrement nommé «argiles».

La structure du sol est constitué de l'assemblage des macro-agrégats en mottes qui sont eux mêmes constitués des agrégats assemblés les uns aux autres. Il est à noter que la structure du sol varie à court terme (selon les saisons par exemple). Elle dépend directement de *la texture, de l'état des colloïdes, du taux d'humidité, du taux de MO et de l'activité de la faune* (Gobat *et al.*, 1998).

- Structure de l'espace poral

L'espace poral (les porosités totales) d'un sol est l'ensemble des vides présent entre les agrégats et à l'intérieur. Il est exprimé en pourcentage (%) du volume total de sol. La taille des pores, leur forme, leur orientation, leur degré de connexion et leur tortuosité sont les caractéristiques qui déterminent la porosité du sol (Gobat *et al.*, 1998). Les vides sont occupés par de l'eau ou bien par de l'air et cela selon le degré d'humectation.

D'après la littérature et récemment selon Calvet (2003a), l'espace poral est divisé en plusieurs parties. Cette division est basée soit en fonction de critères dimensionnels définis sur la base des propriétés de rétention et de transfert de l'eau (que nous détaillons ci-après), soit en fonction de l'origine des pores.

Ainsi, pour désigner les pores en fonction de leurs tailles, nous utilisons les appellations suivantes: micropores, mésopores et macropores.

On distingue trois catégories de pores et cela selon l'approche proposée par Corey (1977):

- (1) Les pores **submicroscopiques** où l'espace disponible ne permet pas la formation d'eau liquide. Les molécules d'eau s'y déplacent par diffusion moléculaire et sont retenues par des forces d'adsorption. On peut considérer que le diamètre maximum de ces pores est de l'ordre du nanomètre, d'où leur appellation de nanopores.
- (2) Les **pores capillaires** où l'eau existe sous forme liquide et où la forme de l'interface entre l'air et l'eau est déterminée par la géométrie des pores et les forces aux interfaces. On admet que l'écoulement de l'eau dans ces pores est laminaire et qu'il constitue l'essentiel des transferts d'eau dans le sol (transfert matriciel). Deux sous-catégories sont distinguées: les pores de transmission de diamètre compris entre 50 et 500 μm (mésopores), et les pores de stockage dont le diamètre est compris entre 0,5 et 50 μm (micropores).
- (3) **Les pores non capillaires, appelés macropores**, dont la limite maximale de rayon peut être de 15 mm. Dans ces pores, l'écoulement de l'eau se produit sous forme de films d'eau adhérents sur les parois en milieux non saturés en eau et sous forme d'écoulements turbulents en milieux saturés en eau.

- Propriétés du sol liées à leur structure

Le rôle de la réserve en eau d'un sol est assuré exclusivement par les pores capillaires de la méso-porosité et de la micro-porosité qui retiennent à la fois l'eau utile et l'eau inutilisable par les plantes. On apprécie la capacité totale de réserve d'un sol au terrain par sa capacité au champ. Elle se mesure quand le sol, une fois saturé en eau, se "ressuie" et tend vers un pallier d'humidité. Au laboratoire, on mesure une valeur équivalente, la capacité de rétention, qui correspond à la quantité maximale d'eau capillaire retenue par le sol, exprimée en % de sol sec (Duchaufour, 1970). L'état de réserve en eau du sol (ou état de saturation en eau de la porosité) à un instant donné est estimé par la teneur en eau volumétrique qui correspond au rapport entre le volume d'eau contenu et le volume total de sol.

Lorsqu'un sol est saturé en eau c'est-à-dire que la totalité de sa porosité est remplie d'eau, différentes forces interviennent entraînant des mouvements d'eau. L'eau qui remplit la porosité grossière (macroporosité) circule sous l'effet de la pesanteur: on assiste à des écoulements d'eau plus ou moins rapides par gravité vers le bas. En revanche, au sein de la porosité capillaire, les mouvements d'eau sont régis par:

- (1) Des phénomènes de succion²⁹;
- (2) Des gradients hydrauliques³⁰;

²⁹ C'est la pression négative par rapport à la pression atmosphérique, à laquelle est soumise l'eau retenue dans un milieu poreux non saturé sous l'effet des forces capillaires

A l'origine, la description mathématique du transport de l'eau pour les sols saturés en eau a été énoncée par Darcy (1856) avant d'être étendue aux sols non saturés énoncée par Buckingham (1907) et Richards (1931).

Les différentes équations décrivant le transport de l'eau contiennent une grandeur fondamentale pour la description du transport de l'eau et pour la conductivité hydraulique. Cette grandeur fondamentale est la perméabilité du sol. Il s'agit d'une grandeur qui caractérise l'aptitude du sol et plus généralement celle d'un milieu poreux à permettre le déplacement d'une phase liquide continue dans des pores non fermés. Dans un **sol saturé en eau**, le déplacement de l'eau a lieu dans tous les pores interconnectés. Dans un **sol non saturé en eau**, l'eau ne s'écoule que dans les pores remplis d'eau et interconnectés (Calvet, 2003a).

La conductivité hydraulique est une donnée composite qui traduit à la fois les flux de la porosité capillaire et de la macroporosité. Elle dépend de l'état initial de saturation du sol. Cette variable est une donnée qui permet de prévoir la circulation de l'eau dans un sol. Mais il est à noter que selon Calvet et Graffin (1974), elle est insuffisante pour prévoir la circulation de solutés.

- *Circulation de solutés et spécialement les pesticides dans le sol*

L'étude de la circulation des fluides dans le sol en agriculture paraît très importante : premièrement pour prédire le mouvement d'intrants tels que les pesticides et deuxièmement pour fournir des informations sur leur comportement dans le sol.

Transport des solutés dans le sol

Le transport des solutés dans le sol est un phénomène général. Ce phénomène se déroule partout dans le sol et à tout moment. S'agissant de substances dissoutes, le transport de l'eau est un déterminant du transport de solutés. La convection, la dispersion hydrodynamique et la diffusion moléculaire se sont les phénomènes élémentaires mis en jeu dans ce type de transport. Ils ne se manifestent pas nécessairement aux mêmes endroits et aux mêmes moments dans le sol (figure 11).

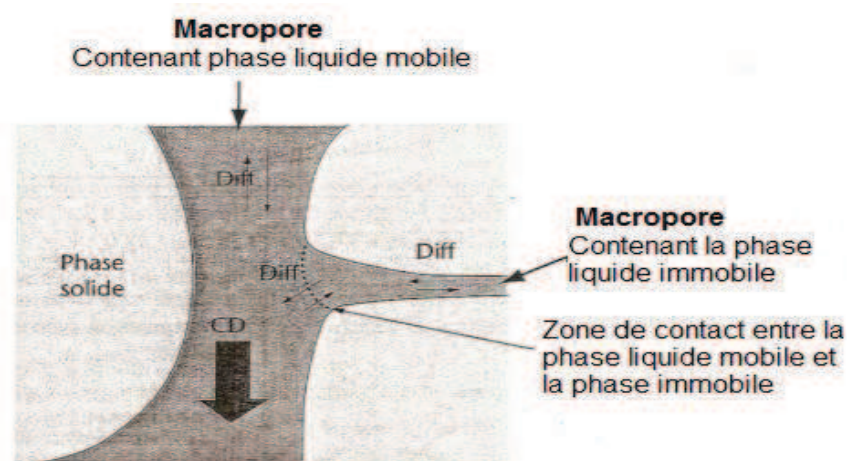


Figure 11: Localisation des phénomènes de transport dans l'espace poral (Calvet, 2003b); Diff: diffusion et CD: convection/dispersion

³⁰ C'est le quotient de la différence de charge hydraulique entre deux points d'un milieu poreux saturé, sur une même ligne de courant, par la distance les séparant sur cette ligne de courant.

Ainsi, l'espace macroporal est le lieu où la convection associée aux mouvements de la phase liquide s'est déroulée. En revanche, les pores de très petites dimensions sont le centre où la diffusion moléculaire aurait lieu. La vitesse d'écoulement de l'eau liquide durant cette étape est très petite (plus ou moins nulle).

Dans le sol, les phénomènes de transport des solutés sont toujours couplés à d'autres phénomènes qui modifient la composition chimique de la phase liquide. Ces phénomènes sont appelés des "phénomènes puits" quand les concentrations diminuent ou "phénomènes sources" dans le cas contraire. Il s'agit des phénomènes d'immobilisation et de mobilisation (précipitation/dissolution, adsorption/désorption) et des phénomènes de transformations chimiques, biologiques et abiotiques (cf. présenté dans la partie I, chapitre 2).

Pour bien comprendre ce phénomène nous détaillons le déplacement par convection et le déplacement par diffusion moléculaire.

Déplacement par convection

Le processus de convection, selon Biggar et Nielson (1962), se réfère au transport de masse d'une espèce chimique dissoute, au moyen du seul mouvement de la phase aqueuse hôte.

Le flux de convection (J_c) s'exprime par l'équation :

$$J_c = v \cdot C$$

Avec :

v : est la vitesse moyenne de la solution dans les pores ($m.s^{-1}$) : $v = v_0/\varepsilon$ avec ε la porosité totale et v_0 la vitesse linéaire de la solution.

C : représente la concentration moyenne du soluté dans la phase liquide ($mol.l^{-1}$).

Déplacement par diffusion moléculaire

L'agitation thermique est à l'origine des déplacements aléatoires des solutés. La vitesse de ces déplacements dépend des champs de force qui s'exercent sur le soluté.

Dans le sol, parmi les forces qui conduisent à l'existence d'un transport de masse, on distingue les gradients de concentrations qui peuvent s'établir dans l'espace poral (Calvet, 2003b). La diffusion moléculaire désigne le procédé par lequel un soluté se déplace d'une région de forte concentration vers une région de faible concentration en résultat d'un mélange moléculaire aléatoire (Nye, 1979). Pour un gradient de concentration unidirectionnel, la densité de flux par diffusion moléculaire (J_{diff}) est donnée par la loi de Fick :

$$J_{diff} = - D (\partial C / \partial x)$$

Avec:

D est le coefficient effectif de diffusion moléculaire du soluté dans le milieu poreux ($m^2.s^{-1}$): il dépend du coefficient de diffusion dans l'eau (D_0), de la tortuosité (τ) et de la porosité (ε) du milieu;

x exprime la distance (m).

La combinaison de la loi de Fick à la loi de conservation de la masse donne l'équation de diffusion ou seconde loi de Fick qui s'écrit :

$$\partial C / \partial t = D (\partial^2 C / \partial x^2)$$

Avec: t est le temps (s).

Le phénomène de diffusion dans un sol est plus faible et plus complexe que dans une solution libre, particulièrement en présence de particules argileuses adsorbantes. Selon Quigley (1989), plusieurs raisons sont responsables à cette tendance :

- (1) une surface de passage du flux réduite par la présence de matières solides,
- (2) des passages de flux tortueux entre les particules,
- (3) l'influence de champs électriques occasionnés par les constituants du sol (argiles...),
- (4) le retard de certaines espèces moléculaires par des processus d'adsorption (échanges d'ions, adsorption sur argiles et MO, précipitation...),
- (5) la biodégradation des molécules organiques diffusantes,
- (6) le déséquilibre électrique dû à l'exclusion anionique.

- *Influence de la structure du sol sur la circulation de solutés*

Il y a plus de 100 ans que la structure du sol a été identifiée comme un important facteur d'influence du transport de solutés dans les sols (Schumacher, 1864; Lawes *et al.*, 1882). Ainsi, la grande diversité rencontrée dans la taille des pores du sol aurait pour effet de générer un certain déséquilibre sur la circulation des solutés.

Généralement, les sols sont des milieux poreux structurés complexes qui se caractérisent par une grande diversité de taille de pores (allant du nm au dm). Cette diversité se traduit par une hétérogénéité dans la vitesse porale, qui influence directement le déplacement miscible des solutés. D'une part, il en ressort que le transport de contaminants solubles, tels que les pesticides, à travers le sol peut s'avérer plus rapide que ne le prédit le modèle mathématique de convection/dispersion (Rao *et al.*, 1974). L'explication serait que des pores grossiers du sol entraînent un transport convectif rapide des solutés par un phénomène dit de **flux préférentiel**. D'autre part, les solutés seraient transportés vers l'intérieur des agrégats par diffusion moléculaire (Brusseau et Rao, 1990), jouant par suite un rôle de puits/source. Une approche théorique, connue sous l'appellation de "non-équilibre physique", a été proposée pour modéliser cette situation de déséquilibre en se basant sur la prise en compte de deux domaines de porosité. Cette approche repose sur le partage de la phase liquide en deux parties : l'une est mobile et peut s'écouler sous l'effet d'un gradient potentiel hydrostatique, l'autre est immobile.

Dans le but de modéliser le transfert de masse de solutés dans les milieux poreux en tenant compte de l'influence de la structure du milieu poreux, Van Genuchten et Wierenga (1976) ont représenté le sol comme un milieu poreux, adsorbant et non saturé en eau, divisé en 5 différentes régions :

- Une région remplie d'air.
- Une région d'eau mobile, localisée à l'intérieur des pores larges, inter-agrégat (macropores). Le transport de soluté dans le milieu poreux est supposé se produire uniquement dans cette région, par convection et diffusion longitudinale.
- Une région d'eau immobile, localisée à l'intérieur des agrégats et/ou des particules (micropores). Elle n'est accessible aux solutés que par diffusion.
- Une région dynamique, localisée suffisamment proche de la région mobile pour permettre un équilibre entre le soluté en solution dans la phase mobile et le soluté adsorbé par la région dynamique.
- Une région stagnante où l'adsorption se fait exclusivement par le biais de la diffusion c'est-à-dire par phénomène d'adsorption lente. Cette partie du sol est localisée principalement à l'intérieur des micropores. La sorption se produit ici uniquement après que le soluté ait diffusé à travers la phase immobile liquide.

Dans cette approche, la macroporosité se remplit d'eau mobile qui assure la majorité du transport du soluté alors que l'eau contenue dans les micropores est relativement immobile. Le transfert entre ces deux régions se produit par diffusion. Dans ces conditions, les agrégats constituent une source ou un puit pour la solution qui se déplace dans les macropores.

2.5.1. Transfert des pesticides

A l'échelle du profil du sol, le mouvement des pesticides se fait selon Corwin *et al.* (1999), soit par ruissellement, soit par lixiviation vers la zone non saturée.

- *Transfert en surface : le ruissellement*

Pour Bailey (1974) et Louchart & Voltz (2006), les pesticides présents dans les premiers centimètres du sol peuvent être transférés par l'eau sous forme dissoute ou particulaire (associés aux particules de sol entraînées). Le transfert par ruissellement va dépendre à la fois de l'état hydrique du sol, des propriétés hydrauliques de celui-ci, de l'intensité de la pluie et des caractéristiques des matières actives (Gouy & Belamie, 1993, Gril *et al.*, 1999, Dur *et al.*, 1998).

- *Transfert en profondeur : lixiviation*

Lorsque l'eau s'infiltré, elle entraîne avec elle les matières actives dissoutes dans la solution du sol ou sous forme colloïdale (Calvet *et al.*, 2005). Ce transfert s'effectue sous l'action de trois processus majeurs : la diffusion moléculaire, la convection et la dispersion hydrodynamique (Calvet *et al.*, 2005).

Le sol est un milieu multiphasique caractérisé par une forte hétérogénéité. Le sol est caractérisé par son espace poral qui correspond à l'ensemble des vides présents entre les agrégats. L'espace poral est divisé en différentes porosités selon leur géométrie, leur capacité de rétention ou leur origine (Calvet, 2003, Jarvis, 2007, Köhne *et al.*, 2009a).

Une distinction est généralement réalisée entre une fraction de la porosité appelée microporosité et l'autre macroporosité. Selon Jarvis, 2007, les macropores correspondent à des pores dont le diamètre est supérieur à 0,3 ou 0,5 mm avec un potentiel matriciel de l'ordre de -10 à -6 cm de colonne d'eau. Dans la microporosité une partie de l'eau est immobile et ne participe pas à l'écoulement (Schoen *et al.*, 1999b).

Le transfert des matières actives va donc dépendre de la structure du sol et de son état hydrique. Le transfert dans la microporosité est généralement considéré comme convectif-dispersif alors que la macroporosité est le lieu de transfert préférentiel par phénomène de bypass (Jarvis, 2007, Köhne *et al.*, 2009a).

Le transfert préférentiel entraîne un déplacement plus rapide des matières actives de la surface du sol vers la zone non saturée (Tindall & Vencill, 1995, Lennartz, 1999, Schoen *et al.*, 1999a). Ce passage rapide vers la profondeur ne permet pas l'établissement d'un équilibre entre la solution et la phase solide du sol, ce qui tend à limiter l'impact des processus d'adsorption et de dégradation (Schoen *et al.*, 1999a, Borggaard & Gimsing, 2008).

Les pertes par lixiviation sont majoritairement contrôlées par les processus de rétention des pesticides le plus souvent dans la microporosité (Gevao *et al.*, 2000, Arias-Estevéz *et al.*, 2008). En effet, la rétention via les mécanismes d'adsorption entraîne un retard voire une atténuation dans leur transfert (Boesten & van der Linden, 1991, Van Beinum *et al.*, 2006).

La rétention des matières actives se renforce avec l'augmentation du temps de contact (Van Beinum *et al.*, 2006, Mamy & Barriuso, 2007, Walker *et al.*, 2005), la présence d'argile (Sakaliene *et al.*, 2007) et le contenu en matière organique (Benoit *et al.*, 2000, Madrigal Monarrez, 2004). Par ailleurs, les méthodes développées pour limiter le lessivage des matières actives reposent sur l'épandage de matière organique en surface ou incorporée dans le sol (Larsbo *et al.*, 2013, Marín-Benito *et al.*, 2013). Les transferts par lixiviation peuvent également donner lieu à des redirections latérales en lien avec un fort contraste de perméabilité dans le sol ou la présence d'un réseau de drainage.

2.5.2. Facteurs affectant la lixiviation de pesticides

Plusieurs facteurs peuvent affecter le transfert vertical des pesticides dans le sol. Ils relèvent à la fois du sol (préparation de surface, structure, teneur en eau), de la molécule (solubilité dans l'eau, formulation), et de facteurs externes (irrigation, temps d'application et événements pluvieux). Parmi ces facteurs, Flury (1996) en a dégagé trois dont l'influence serait déterminante: le travail superficiel du sol, la teneur en eau initiale et le moment de l'application du pesticide.

- *Travail du sol et structure*

La préparation de surface des sols, en modifiant la structure, peut influencer le transport de pesticides. Une étude en cases lysimétriques (Brown *et al.*, 2001) montre ainsi des pics de concentrations et des pertes par lessivage d'isoproturon inférieures de 35% quand les agrégats de surface d'un sol argileux sont "calibrés" finement par rapport à une structure de surface plus grossière. Novak *et al.* (2001) concluent également à l'influence positive de la préparation d'un sol argileux en agrégats fins sur le lessivage de pesticides modérément à fortement adsorbés. Le labour aurait par ailleurs pour effet d'homogénéiser la structure du sol en détruisant les macropores continues (type galeries de lombrics) et à abaisser ainsi le passage préférentiel de pesticides en profondeur (Malone *et al.*, 2003).

- *Teneur en eau initiale*

Plusieurs auteurs rendent compte de l'effet de l'humidité initiale sur le transport en profondeur de pesticides (White *et al.*, 1986; Edwards *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1995; Flury

et al., 1995; Guimont *et al.*, 2005). En règle générale, les pertes par lessivage seraient plus importantes et rapides lorsque le produit est appliqué sur un sol sec comparé à une application sur un sol humide. La circulation par flux préférentiel serait privilégiée dans un sol sec plutôt que dans un sol humide dans les sols argileux structurés (Brown *et al.*, 1995). D'autres auteurs (White *et al.*, 1986) ont montré qu'une application de pesticides de propriétés contrastées sur sol humide favorisait leur rétention dans l'horizon de surface, par rapport à une application sur sol sec. Guimont *et al.* (2005) ont récemment montré que la différence de lessivage entre une application sur sol sec et sur sol humide aurait pour origine une redistribution du pesticide à l'intérieur de la matrice de sol en conditions de sol humide, comme d'autres auteurs (Rao *et al.*, 1974; Shipitalo *et al.*, 1990; Renaud, 2004) en avaient fait l'hypothèse. Enfin, on note que les effets de l'humidité initiale sont à nuancer en fonction de la texture du sol concerné. En conditions de sol sec, les sols sableux ont tendance à montrer moins de lessivage. A l'inverse, les sols argileux et limoneux présentent plus de lessivage quand ils sont secs et exposés rapidement après application du pesticide à une forte pluie (Flury, 1996).

- *Temps de résidence*

Avec le temps, la disponibilité des pesticides au lessivage baisse par phénomène de vieillissement. Plusieurs raisons sont invoquées telles que la formation de résidus liés (Khan, 1982), le phénomène d'adsorption lente (Brusseau et Rao, 1989) ou encore la transformation des molécules qui tendent à baisser la concentration de produit en solution. La masse de pesticides lessivée serait ainsi inversement proportionnelle au temps écoulé entre l'application du pesticide et le premier événement pluvieux "filtrant". Il en résulte des départs par lessivage plus conséquents quand une pluie drainante intervient rapidement après application du produit. Ce phénomène a été mis en évidence pour de nombreux couples sol/molécules lors d'expérimentations au champ (Southwick *et al.*, 1990; Boesten et Van der Pas, 2000; Renaud, 2004).

3. Gestion des risques liés à l'utilisation des pesticides et réduction de la pollution diffuse

Comme nous l'avons déjà signalé, les produits phytosanitaires, par leur nature, présentent des risques pour la durabilité de l'environnement. Pour limiter et gérer les effets néfastes de leurs propriétés toxicologiques, il est nécessaire d'abord d'évaluer les variables de l'environnement à travers des méthodes diagnostics ou d'indicateurs. Une grande diversité de ces méthodes existe au niveau de toutes les échelles (parcelle, exploitation agricole, bassin versant, territoire...). Il est à noter que chaque chercheur utilise sa propre définition et cela en fonction des objectifs fixés. Plusieurs définitions ont été attribuées à l'indicateur. Pour Gallopin (OCDE, 1999), les indicateurs peuvent être définis comme variables, paramètres, mesures, mesures statistiques, valeurs, indices, informations, modèles... Gras *et al.* (1989) définissent l'indicateur au sens plus large : *«les indicateurs sont des variables (...) qui fournissent des renseignements sur d'autres variables plus difficiles d'accès (...). Les indicateurs servent aussi de repère pour prendre une décision»*.

Donc estimer l'impact des produits phytosanitaires revient à montrer les degrés d'influence de ces produits sur l'environnement (pollution, contamination) (Salah, 2012). Mais le problème le plus épineux est d'identifier cette pollution car *«elle cerne des espaces importants aux contours imprécis et sont générées par des pratiques variées qui interfèrent de façon*

complexes avec le sol et les aléas météorologiques » (Laurent, 1992). De plus la pollution diffuse ne peut être mesurée qu'en aval des lieux d'émission après un temps de transfert dans un milieu défini (Novotny *et al.*, 1999).

Ainsi, les acteurs des politiques publiques s'interrogent sur la manière de réduire le risque de pollution diffuse, d'identifier et d'évaluer les sources de pollution. Dans cette perspective, l'action publique doit prendre en considération que la gestion et la lutte contre la pollution diffuse passent par une réflexion sur l'aménagement du territoire.

3.1. Les territoires et ses échelles

L'aménagement du territoire en tant qu'espace analysé, géré et perçu par les acteurs permet une évaluation de la pollution diffuse d'origine agricole (Ayadi-Hajji, 2013). Partant de la vision que l'espace est une dimension matérielle d'un territoire, il ressort qu'il est un objet réel qui interagit avec des écosystèmes naturels et des systèmes d'activités agricoles (Deffontaines *et al.*, 1996). Cet espace présente des particularités (caractéristiques naturelles, climat, hydrographie, pédologie...) qui sont à la base des déterminants des pratiques agricoles et de la pollution diffuse. D'après Lévy et Lussault (2003), le territoire, qui considère son espace géographique comme une composante fondamentale, est une entité mesurable «*Espace à métrique topographique*» qui peut être découpé en unités spatiales (parcelle, bassin versant, etc.) dont les propriétés géométriques notamment les coordonnées géographiques (latitude et longitude), les formes varient selon les types de spatialisations (Ayadi-Hajji, 2013).

D'après ce qui précède, nous pouvons dire qu'un territoire est un espace structuré. C'est aussi un espace géré par les acteurs locaux. Selon Lévy (1999), les acteurs déterminent eux-mêmes leur territoire. C'est aussi selon Frémont (1984) un ensemble de relations tissées entre les acteurs et les éléments structurants d'un espace.

D'après Ayadi-Hajji (2013), le territoire correspond aux systèmes d'activités, aux méthodes de gestion et d'aménagement de l'espace géographique.

Dans le contexte actuel, la question d'évaluation du risque des produits phytosanitaires au niveau spatial est l'une des priorités pour la gestion de la pollution diffuse.

La gestion de la pollution diffuse d'origine agricole est une gestion qui nécessite un choix d'une ou des unité(s) spatiale(s). L'unité spatiale choisie doit contenir une relation entre la pression exercée par les produits phytosanitaires sur l'environnement et son état. Donc dans notre cas, les pratiques agricoles et la pollution des ressources naturelles (la pollution de l'eau incluse) sont les éléments qui forment l'unité spatiale choisie.

Toujours d'après Ayadi-Hajji (2013), trois types d'unités spatiales, les parcelles agricoles, les exploitations agricoles et le bassin versant hydrologique, gérables par les hommes, sont retenus pour cerner les problèmes de la pollution diffuse. Les deux premières unités spatiales représentent les activités agricoles et le territoire d'intervention et de décision de l'agriculteur. Ces deux unités sont à leur tour incluses dans une unité spatiale plus grande qui est le bassin versant, territoire d'aménagement et de gestion de la ressource en eau.

Depuis quelques années, les agronomes sont sollicités par les acteurs pour construire des méthodes et des outils afin de réduire la pollution diffuse au niveau de leurs territoires.

La connaissance de la diversité des exploitations agricoles est reconnue par les organismes de développement comme une condition de l'amélioration de l'efficacité de leur intervention auprès des agriculteurs (Colson, 1985). Cette diversité, partie intégrante du développement de l'agriculture, est considérée comme l'une de ses richesses.

Pour étudier la diversité des exploitations agricoles d'un territoire, il est indispensable d'analyser le fonctionnement de ces exploitations. L'analyse du fonctionnement est basée sur l'élaboration, à partir d'études de cas, de typologies d'exploitations qui prennent en considération la diversité des modes de fonctionnement et de leur inscription spatiale (Inra-Ensa, 1997 ; Capillon et 1979). « L'inscription spatiale » nous renvoie à « l'inscription géographique ».

Malgré les derniers développements qui ont été réalisés dans le domaine de l'analyse des systèmes de production, « les analyses spatiales des faits agricoles sont encore très insuffisantes... ». La majorité des chercheurs et des agronomes ne considèrent pas suffisamment les exploitations agricoles comme un « ensemble organisé d'espaces d'activités » permettant de parler de gestion territoriale des exploitations, ceci en introduisant dans les typologies d'exploitation d'une région, la dimension spatiale » (Deffontaines et Lardon, 1994). D'après Thenail (1996), la relation entre l'exploitation et son environnement ne comporte pas explicitement les composantes spatiales, si ce n'est à l'échelle d'entités spatiales englobantes (bassin d'alimentation, région agricole...). Partant de ce constat, plusieurs études ont traité la relation entre le fonctionnement des exploitations agricoles et leurs unités spatiales. Deffontaines et Osty (1977) partent de l'hypothèse « qu'il existe des espaces dans lesquels les relations des exploitations entre elles et avec l'environnement présentent des caractéristiques et s'organisent en système » ; Laurent et Maigrot (1994) relient les systèmes de production à une organisation particulière de l'espace ; Perichon (1995) montre une liaison entre systèmes d'élevage et potentialités du milieu physique. Deffontaines (1998) est arrivé à combiner les concepts et les méthodes de l'agronomie et de la géographie avec les outils de la modélisation spatiale. En 2002, Bertrand C. et Bertrand G. montrent que la parcelle, l'exploitation, le terroir et toutes les formes d'emprises spatiales agricoles ne sont plus que des éléments parmi d'autres « dans une mosaïque géographique morcelée et instable ».

En partant de la réflexion de Deffontaines, où il visualise et inscrit le fonctionnement des exploitations agricoles dans l'espace à travers la combinaison des dimensions idéelles et matérielles du paysage, une relation avec la géographie a été établie. Le rôle de l'espace dans le fonctionnement des exploitations et de leur dynamique est notamment abordé via la question de l'innovation en agriculture (Berger, 2001 ; Gilbert, Pyka et Arhweiler, 2001 ; Steyler et Zimmermann, 2004).

La représentation spatiale de la diversité des exploitations agricoles est un élément important pour expliquer leur structure et leur fonctionnement qui est notamment sous contrainte de l'environnement physique.

3.2. Outils pour l'évaluation et la gestion des risques des produits phytosanitaires

En ce qui concerne la pollution diffuse d'origine agricole et dans le but d'aider les acteurs locaux à prendre des décisions et à gérer les pratiques agricoles phytosanitaires, d'énormes efforts ont été réalisés en partant d'indicateurs simples, à d'autres plus complexes.

D'après Bockstaller *et al.* (2008), les indicateurs sont classés en deux types : simple et/ou composite. Selon Girardin *et al.* (1999), l'indicateur simple est issu, soit de mesures directes, ou soit estimé par modélisation. Tandis que pour Devillers *et al.* (2005), un indicateur composite est issu d'une agrégation de plusieurs variables ou de plusieurs indicateurs simples mesurés ou estimés.

Devillers *et al.* (2005) ont en effet, distingué trois grands groupes d'indicateurs:

- **Les indicateurs mécanistes** : ce type d'indicateur regroupe tous ceux qui intègrent directement les variables dans le calcul. Selon le même auteur, les modèles utilisés sont soit simples (systèmes d'équations ex: la quantité de substance active/ha), soit plus ou moins complexes. Ces méthodes présentent des résultats plus précis que les indicateurs à notation.
- **Les indicateurs à notation** : ce type d'indicateur est intégré dans les calculs où les valeurs des variables issues de ces calculs sont transformées en notes. Sachant que chaque note est affectée à une classe qui détermine les seuils de limite. Cette méthode a comme d'avantage de faciliter la compréhension par les utilisateurs et d'utiliser des valeurs qualitatives et quantitatives. Quant à l'utilisation des limites des classes, elle peut être un avantage (facile à lire), comme elle peut être aussi un inconvénient. Ce dernier est constaté lorsqu'on fait appel à l'expertise pour avoir une interprétation claire et plus approfondie de résultats.
- **Les indicateurs hybrides**: ce type d'indicateur fait appel à l'utilisation des deux méthodes citées précédemment. Autrement dit, une partie des variables est utilisée sous forme de notes et l'autre est intégrée directement dans les calculs ; celle-ci constitue donc le premier groupe. Le second groupe n'est que le résultat du premier groupe transformé en notes. A ces indicateurs traités viennent s'ajouter :
 - **Les systèmes experts**: il s'agit des méthodes qui emploient simplement des règles de décisions. Ces méthodes permettent d'agréger les variables de nature différentes afin de bien comprendre la construction d'indicateur.
 - **L'analyse multicritère**: son objectif est de traiter toutes les informations qui se présentent sous forme de valeurs chiffrées ou notes. Elle permet donc de comparer et de classer les substances actives en fonction de différents critères prédéfinis.

Dans la littérature, une typologie d'indicateurs phytosanitaires a été élaborée. L'utilisation des produits phytosanitaires peut être ramenée à deux niveaux :

- L'estimation de l'utilisation par le recours aux données d'input (kg/an) ou de fréquences d'application (nombre de traitement/an).
- L'estimation du risque lié au traitement pour la santé (de l'agriculteur, du consommateur...) ou pour l'environnement (sol, eau, faune et flore...).

Cependant, les indicateurs d'évaluation des risques liés à l'utilisation des pesticides ont été développés depuis les années 80. Les principaux indicateurs utilisés sont regroupés dans le tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10: Principaux indicateurs utilisés pour l'évaluation de risques liés à l'utilisation des pesticides (Source : Hamdi, 2011).

| Nom de la méthode ou d'indicateur | Auteur, année | Domaine cibles |
|---|--|---|
| Insecticide Pest Management Rating (IPMR) | Metcalf, 1975 | Faune aquatique et terrestre |
| Indicateur SIRIS | SIRIS, 1980 France | Eaux souterraines et de surfaces |
| Florida Pesticide Use Risk Evaluation | Shahane et Inmane, 1984 USA | Eaux souterraines et eaux de surface |
| Soil Pesticide Interaction Screening Procedure (SPISP) | Goss et Wauchop, US natural (Ressource Conservation Service USA, 1990) | Sol, eaux souterraines et eaux de surface |
| Environnement Impact Quotient (EIQ) | Kovach <i>et al.</i> , 1992 Université de Cornell | Santé humaine et environnement |
| Criblage selon la capacité d'altérer la qualité de l'eau | Hornsby, 1992 | Eaux souterraines et eaux de surface |
| Stemilt Growers Integrated Fruit Production Responsible Choice Point Summary | Reed, 1993 (Washington State) | Produits (Pommes) |
| Environnement Yardstick for pesticides ou point d'impact environnemental (PIE) | Reus et Pak (Pays-Bas), 1993 | Eaux souterraines, organismes aquatiques, organismes du sol |
| Indice Pesticide (IP) ou Pesticide Index (PI) | Penros <i>et al.</i> , 1994 | Produit |
| Integrated farming systems and environmental exposure to pesticide (EEP) | Wijnands et Van Dongen, 1995 Pays-Bas | Eau, sol, air |
| Environmental Health Policy Programme Raining system (EHP) | Pease <i>et al.</i> , 1996 Californie | Santé humaine, environnement (faune) et ressources naturelles |
| Raiting systems for pesticide Risk. Classification on different Ecosystems | Finizio, Calliera et Vighi (Italie), 1997 | Eaux de surface et faune du sol |
| Méthode développé en Allemagne | Gutshe, V. et Rossberg D., 1997 | Sol, eaux de surface, air |
| Méthode danoise (Plan d'action danois) | Clausen (1998) et Gyldenkaerne (1997) | Santé humaine et environnement |
| Méthode développé en Suède | Bureau National d'Inspection Chimique | Santé humaine et environnement |
| Méthode REXTOX, ADSCOR et SYSCOR issues de travaux européens | OCDE, 2000 | Milieu aquatique |
| Indicateur de risque sur la santé et l'environnement | Norvège, 2001-2004 | Environnement et santé humaine |
| IRPeQ santé et environnement | Québec, 2012 | Environnement et santé humaine |

D'après la directive de la commission européenne en 1994, pour évaluer les impacts des pesticides sur la santé humaine et l'environnement, il est indispensable de prendre en compte

les dangers (toxicités intrinsèques) et le degré d'exposition (concentration prévisible du pesticide dans l'environnement. En se basant sur le modèle causal « pression et impact, état, suivi,» de classification des indicateurs, élaborés par Gassiat et Zham (2010) on dispose de quatre grandes familles d'indicateurs pour mettre en place un processus d'évaluation des effets d'un pesticide sur la santé humaine et l'environnement. Ce sont :

- Des indicateurs de pression (P) qui visent à mettre en évidence l'effet environnemental des pratiques agricoles sur l'environnement. Le concept de pression fait référence aux causes induisant des changements d'états et des impacts (Gassiat et Zham, 2009).
- Des indicateurs d'impact (I) qui caractérisent les effets ultimes causés par les changements d'état.
- Des indicateurs d'état (S) qui correspondent à des mesures directes de l'état du milieu (flore présente, concentration d'une matière active dans l'eau, etc.).
- Des indicateurs de réponse ou de suivi (R) qui évaluent dans quelles mesures les modifications de pratiques via, entre autres, des programmes d'action ont atteint les objectifs fixés.

Pour cela, les acteurs de terrain (agriculteurs, gestionnaires de l'eau, etc) ont besoin d'indicateurs génériques, simples d'utilisation à différentes échelles spatiales (de la parcelle culturale au bassin versant) et modulables suivant les conditions de l'environnement récepteur, du fait de la complexité de la réalité pour être appréhendée par des mesures directes.

Les principales préoccupations de ces acteurs sont de :

- classer les substances en vue d'identifier celles qui sont les plus à risque pour l'environnement ou la santé humaine ;
- évaluer l'impact des pesticides sur l'environnement (qualité de la ressource en eau,...) ;
- choisir un produit de substitution pour un usage donné en vue de réduire les risques associés ;
- rendre compte de l'efficacité d'une modification de pratiques ou d'une politique (mesure agri environnementale,...).

Pour l'évaluation des effets des pratiques phytosanitaires sur la santé des utilisateurs et de leur voisinage deux indicateurs ont été élaborés l'Indicateur de Risque de l'Applicateur (IRSA) et l'Indicateur de Risque de Toxicité Environnementale (IRTE).

Indicateur de risque de l'applicateur (IRSA)

L'IRSA est un indicateur composite, conçu en se basant sur des travaux norvégiens (Spikkerud, 2001) et québécois (Samuel *et al.*, 2007) qui évaluent la toxicité aiguë et chronique des produits phytosanitaires en considérant les propriétés physico-chimiques et toxicologiques des matières actives. Il exprime aussi le risque associé à l'utilisation du produit en considérant l'exposition liée au type de formulation, au milieu et à la technique d'application.

L'IRSA se calcule en deux phases. La première consiste à évaluer un indice de risque de toxicité par matière active (IRTm.a) en tenant compte des propriétés toxicologiques et physicochimiques suivantes:

- la toxicité aiguë (nocif par contact avec la peau, par inhalation et en cas d'ingestion) représentée par les DL50 orale ou cutanée et CL50 (DL50 et CL50: dose létale et concentration létale entraînant la mort de 50 % d'une population animale expérimentale) ainsi que les irritations oculaires et cutanées,

- la toxicité chronique (risques liés au cancer, à la reproduction, à la neurotoxicité, aux perturbations endocriniennes...),

- Facteur de persistance (FPer) tenant compte de la demi-vie des molécules et de leur bioaccumulation dans les tissus vivants (Valcke et al., 2005). La somme des risques chroniques est multipliée par un facteur de persistance (FPer). Ce dernier permet d'obtenir un indice de risque toxicologique tenant aussi compte de la biodisponibilité.

Cet IRTm.a (formule 1) est déterminé par addition des points alloués en fonction des différents critères retenus de la toxicité aiguë et chronique. La valeur est d'autant plus élevée que le risque est important. Pour obtenir une plus grande distribution des valeurs et mettre davantage en évidence des pesticides présentant un risque plus élevé, la somme des variables a été portée au carré (Samuel et al, 2007).

L'indice de risque toxicologique d'une matière active est donc défini selon la formule suivante :

$$\text{IRTm.a} = [\sum \text{Risques aigus} + (\sum \text{Risques chroniques} * \text{FPer})] \text{ (1)}$$

La deuxième phase correspond à la pondération de l'indice de risque toxicologique des matières actives (IRTm.a) par différents facteurs liés à la préparation commerciale et son application. Pour chaque valeur calculée, un coefficient est attribué.

Indicateur de Risque de Toxicité Environnementale (IRTE)

Dans la même logique du développement de l'IRSA, l'indicateur de risque de toxicité environnementale (IRTE) a été développé en se basant sur plusieurs travaux de recherche

dont les travaux norvégiens (Spikkerud, 2001) et québécois (Samuel et al., 2007), du groupe de travail européen FOCUS (1997 ; 2003) et de la commission européenne sur l'homologation des phytosanitaires (CE, 1994, 2009). L'IRTE prend en compte comme données d'entrées plusieurs variables critiques telles que les caractéristiques de la matière active (propriétés physicochimiques et écotoxicologiques), de la préparation commerciale (concentration de la matière active, dose appliquée..), du lieu d'application (plein champs, sous-serre...) et du type de culture (culture basse, arboriculture...). Il est également conditionné par l'environnement récepteur: facteur d'interception de la culture, potentiel de dérive, de ruissellement et de drainage, profondeur de pénétration du pesticide, densité apparente et profondeur de la colonne d'eau et de la colonne des sédiments (FOCUS 1997 et 2003). Il attribue à ces variables une note avant de les intégrer au calcul à partir d'un ratio toxicité/exposition (CE, 1994, 2009).

Le principe de l'évaluation des risques repose sur la comparaison des niveaux de toxicité avec les concentrations prévisibles dans un environnement (CPE).

Les ratios toxicité/exposition doivent respecter des marges de sécurité définies réglementairement dans la directive d'homologation des produits (directive 91/414/CEE). Ces marges sont établies par type d'organismes et tiennent compte de la durée d'exposition (court ou long terme). Sur le court terme, les valeurs de toxicité prise en compte sont les DL 50/CL50 des matières actives. Sur le long terme, les valeurs de toxicité de référence sont les

Concentrations Sans Effet Observé (CSEO) c'est-à-dire n'ayant engendré aucun effet néfaste, appelé aussi NOEC: No Observed Effect ou également NOAEL (Non observed adverse effect level).

Indicateur de risque de pression phytosanitaire : Indicateur de fréquence de traitement (IFT)

D'après Champeaux (2006) et Pingault *et al.* (2009), les politiques actuelles de réduction des produits phytosanitaires, telles que le Plan EcoPhyto 2018, utilisent essentiellement des indicateurs « de pression » dont l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT).

A la fin des années 1980, l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) a été élaboré au Danemark dans le but de supprimer les produits les plus dangereux pour l'environnement et de limiter l'usage d'autres produits. Issue de l'expérience danoise, l'IFT a été proposé par le gouvernement français à travers le Ministère de l'Agriculture et l'INRA³¹. Il est un indice de pression qui permet d'évaluer la pression phytosanitaire sur chaque parcelle. Il ne tient pas du tout en considération les propriétés toxicologiques des molécules contenues dans les produits.

Il est à noter que l'indicateur «nombre de traitements» ou «nombre de passages», intègre la consommation réelle de substance active en tenant compte du fait que ces traitements sont souvent réalisés à dose réduite. Ainsi, l'IFT reflète l'intensité d'utilisation des produits phytosanitaires en agriculture et la dépendance des agriculteurs vis-à-vis de ces produits (Abdelouahed, 2014).

D'après Ayadi (2009), cet indicateur peut être calculé pour un ensemble de parcelles, une exploitation agricole ou un territoire ou encore par grandes catégories de produits. Selon les cultures, nous distinguons deux types d'IFT : les « IFT Herbicides » qui correspondent à un cumul de traitements par des produits herbicides et les « IFT Hors Herbicides » qui correspondent au cumul des traitements par d'autres produits (fongicides, insecticides...).

Méthode de calcul de l'indicateur de fréquence IFT

Pour chaque traitement réalisé sur la parcelle, la quantité normalisée est obtenue en divisant la dose appliquée par l'agriculteur par hectare (issue de l'enquête) par la dose homologuée à l'hectare du produit et de la culture concernée. D'après Mouileh (2012), pour un couple «culture-Produits Phytosanitaires», il existe plusieurs doses homologuées correspondant à des bio-agresseurs différents, nous retenons par convention la dose homologuée minimale:

$$\text{IFT}_{\text{Traitement}} = \text{Dose appliquée} / \text{Dose homologuée} * \text{la proportion de la parcelle traitée}$$

- ➔ Si le produit appliqué lors de ce traitement est un herbicide, alors l'IFT herbicide de ce traitement est égal à l'IFT de traitement et l'IFT hors herbicide est donc nul,

³¹ Institut National de la Recherche Agronomique

-
-
- Si le produit appliqué lors de ce traitement n'est pas un herbicide, alors l'IFT hors herbicide pour ce traitement est égal à l'IFT de traitement et l'IFT herbicide est nul.

Enfin l'IFT à l'échelle parcellaire est égal à la somme des IFT traitements pour l'ensemble des traitements réalisés au cours d'un cycle de production c.à.d. de la récolte précédente jusqu'à la récolte actuelle, nous obtenons ainsi :

- IFT herbicides de la parcelle est la somme des IFT traitement des herbicides.
- IFT hors herbicides de la parcelle est la somme des IFT traitements hors herbicides.

$$\text{IFT}_{\text{parcelle}} = \Sigma \text{DA}_T / \text{DH}_T$$

Avec :

DA: Dose Appliquée

DH: Dose Homologuée

Il est à noter que le calcul de l'IFT ne prend pas en considération les matières actives de chaque produit traité mais il est basé sur les noms commerciaux des produits phytosanitaires. De plus les IFT ne tiennent pas compte des caractéristiques spécifiques de chaque produit phytosanitaire tels que le comportement dans l'environnement, la solubilité, la volatilité, la toxicité par les organismes non ciblées et l'écotoxicité pour le milieu ni aussi de la vulnérabilité propre à chaque milieu physique.

Il est seulement un indicateur d'évaluation de pression phytosanitaire à l'échelle d'une parcelle, d'une exploitation, ou d'une région.

Comme notre but est d'identifier et d'évaluer les sources de pollution, alors il faut concevoir un outil qui aide à la mise en place de solutions aux problèmes engendrés par les produits phytosanitaires. Comme l'indicateur de pression phytosanitaire ne prend pas en compte ni des données pédoclimatiques ni de la vulnérabilité du milieu physique, alors nous sommes amenés à poursuivre notre travail avec des outils de modélisation permettant d'évaluer le niveau de diffusion dans l'environnement.

3.3. Outils et méthodes de gestion de la pollution diffuse de qualité de ressources en eaux contaminées par les pesticides:

D'après le cadre conceptuel de Hatchuel et Weil (1992), *«un outil peut être analysé à travers trois dimensions : le substrat technique, la philosophie gestionnaire ou dimension politique et la doctrine d'usage définie comme étant la façon dont l'outil doit être utilisé dans un contexte d'action »*.

Des chercheurs ont mobilisé récemment ce cadre conceptuel pour mettre en évidence les connaissances que les outils véhiculent et analyser leur rapport à l'action (Girard *et al.* 2015 ; Gross, 2011). Une grille d'analyse a ainsi établie dans le cadre de ces travaux comprenant de nombreux critères se référant aux trois dimensions. Il est à noter que deux critères de cette grille sont utilisés dans le référentiel sur les outils de la recherche pour réduire les pollutions de l'eau par les pesticides (2018) qui ont été l'objectif de gestion et l'objet étudié.

Pour une gestion de la pollution diffuse des eaux dues à l'utilisation des pesticides, huit étapes ont été identifiées :

1- Caractériser le milieu, l'état des masses d'eau et les usages

Visé à établir un état des lieux complet des différentes composantes de la problématique. Les données sont recueillies afin de diagnostiquer l'intensité et l'origine des contaminations.

2- Evaluer des risques de contamination et identifier des zones prioritaires

Les risques de contamination sont liés à l'utilisation de produits phytosanitaires et à la vulnérabilité du milieu en termes de contamination de l'eau. Les risques évalués sont donc les risques de transfert pouvant induire une contamination et une dégradation de la qualité de l'eau. Ils permettent d'établir une priorisation des territoires d'intervention. D'autres critères peuvent néanmoins être considérés, comme par exemple ceux qui se réfèrent au contexte socio-économique.

3- Réduire ou supprimer le recours aux pesticides

Du point de vue agronomique la réduction de l'utilisation de pesticides peut s'envisager de différentes manières : en améliorant l'efficacité des traitements, en substituant un ou l'ensemble des traitements phytosanitaires, en adaptant les objectifs de maîtrise des bio agresseurs ou aussi en concevant des systèmes de culture qui réduisent les risques de développement des bio agresseurs (Aubertot et al. 2005). Plusieurs stratégies peuvent être mobilisées sur une même exploitation.

4- Limiter les transferts

Correspond à la mise en œuvre d'actions correctives visant à adapter les usages de produits phytosanitaires aux conditions du milieu, adopter des pratiques permettant de limiter leur dispersion et augmenter la rétention des molécules par l'installation de zones tampons. Ces dernières sont des infrastructures paysagères maintenues ou expressément mises en place pour assurer une fonction d'interception et d'atténuation des transferts de contaminant d'origine agricole vers les milieux aquatiques. En fonction de leur efficacité, du type de transfert et des propriétés physico-chimiques des polluants, différents types de zones tampons peuvent être installés.

5- Suivre et analyser les actions menées

Consiste à rendre compte des moyens mis en œuvre, de la modalité d'animation et de gouvernance et de l'avancement des actions initialement prévues. On entend par action les mesures concrètes (réunions avec les

| | |
|--|--|
| | agriculteurs, animation, MAE contractualisées, etc.) mises en place par le gestionnaire. |
| 6- Evaluer les effets | Consiste à évaluer la pertinence, la cohérence, l'efficacité et l'efficience des actions proposées et mises en oeuvre pour améliorer la qualité de l'eau. Cette évaluation intervient une fois terminée la mise en oeuvre d'un programme ou d'un plan d'actions et consiste donc à analyser « <i>les liens de causalité entre les différentes composantes de la dynamique de projet : les objectifs sont-ils adaptés aux enjeux (pertinence), les moyens d'intervention – financiers, humains, techniques – sont-ils cohérents avec les objectifs et l'ambition affichée (cohérence interne), les résultats sont-ils à la hauteur des objectifs (efficacité)...?</i> » (Zakeossian et Mühlberger, 2012). L'évaluation doit notamment permettre de faire le lien entre l'ensemble des indicateurs de suivi des actions et d'évaluation d'impact, afin d'identifier les facteurs à l'origine de l'amélioration de la qualité de l'eau. |
| 7- Faire dialoguer les acteurs pour arriver à une analyse partagée des enjeux | Revient à engager une démarche collective favorisant la compréhension des points de vue des acteurs du territoire. Plusieurs techniques et outils d'animation peuvent être mobilisés pour faciliter les échanges, stimuler les idées ou favoriser la créativité. |
| 8- Engager et accompagner les acteurs dans un processus participatif de prise de décision et/ou de mise en oeuvre d'actions | Les acteurs du territoire participent au processus de prise de décisions. Pour cela, la construction de scénarios peut être un moyen à mobiliser tout comme les instruments d'action publique, de nature économique ou non, pour inciter les acteurs à mettre en oeuvre des actions. Cet objectif s'insère dans un processus transformatif. |

D'après la littérature, plusieurs outils et méthodes issue de travaux de recherche mobilisable dans une démarche de gestion de ressource en sol et en eau contaminé par les pesticides ont été élaboré durant ces dernières années. Comme tous les travaux de gestion, il fallait réaliser un diagnostic initial (étape 1 et 2 citée précédemment). La liste des méthodes et des outils à l'échelle locale peut servir est la suivante:

| Diagnostic initial | |
|---|---|
| Caractériser le milieu, l'état des masses d'eau et les usages | Evaluer des risques et identifier des zones prioritaires |
| <p>Analyse de l'état des masses d'eau : HYPE</p> <p>Evaluation de la vulnérabilité du milieu : BV Service Délimitation et cartographie de la vulnérabilité des AAC d'eau de surface, d'eau souterraine et mixtes IDPR Méthode du diagnostic parcellaire du risque de contamination des eaux superficielles par les produits phytosanitaires (DPR)</p> <p>Description de l'usage agricole d'un territoire : IDEA Méthode de construction de rotations-types en fonction des types de sol Méthode de diagnostic agraire Méthode de formalisation de types de pratiques des agriculteurs Méthode de reconstitution des séquences de cultures à partir du RPG Méthode de spatialisation de séquences à partir de facteurs déterminants RPG Explorer</p> <p>Analyse des pratiques phytosanitaires : IFT Méthode d'évaluation des pratiques phytosanitaires à partir des carnets de plaine Méthode de spatialisation de la BNV-d SIRIS-Pesticides</p> <p>Analyse du comportement des molécules : TyPol</p> <p>Evaluation du pouvoir tampon d'infrastructures paysagères : Méthode de diagnostic de l'état des zones tampons rivulaires et mise en place à l'échelle du bassin versant Méthode de diagnostic et recommandations de gestion des réseaux de fossés agricoles infiltrant</p> <p>Caractérisation des positionnements et comportements des acteurs : METE'EAU Méthode d'analyse des réseaux de pairs Méthode d'analyse agro-anthropologique des pratiques phytosanitaires Outils d'analyse territorialisée des parcellaires des exploitations agricoles concernées par une AAC</p> | <p>Evaluation de risques de transfert par modélisation à l'échelle parcellaire : MACRO PASTIS PEARL PESTDRAIN PeSTICS STICS-MACRO WATFAR</p> <p>Evaluation de risques de transfert par modélisation à l'échelle du bassin versant ou de la masse d'eau : MACRO - MARTHE MARTHE Méthode d'évaluation du potentiel de contamination des eaux de surface MHYDAS-pesticides Outil de modélisation du transport de pesticides basé sur OpenLISEM SACADEAU SWAT</p> <p>Evaluation de risques de transfert par approche combinatoire à l'échelle de l'exploitation : Diagnostic Agri-Environnemental Géographique INDIGO I-Phy</p> <p>Evaluation de risques de transfert par approche combinatoire à l'échelle du bassin versant ou de la masse d'eau : Diagnostic Territorial des Pressions et Emissions Agricoles Entrepôt de données spatiales pour l'aide à la décision Indicateur de risque potentiel de transfert de pesticides vers les eaux superficielles Méthode de diagnostic « Territ'eau » Méthode multicritère d'aide à la décision (ELECTRE Tri) PHYTOPIXAL</p> |

Conclusion du chapitre 2

Après une période d'évolution remarquable de l'agriculture en termes d'usage d'engrais chimiques et des pesticides qui avait comme but d'augmenter et d'améliorer la production en qualité et en quantité. En revanche, des impacts négatifs sont apparus suite à l'utilisation excessive de ces produits qui aboutissent à l'augmentation des risques de toxicité sur l'environnement et sur la santé humaine. Le transfert de ces produits et leur dissipation dans les différents compartiments de l'environnement génèrent des effets négatifs sur la qualité du sol et des eaux souterraines. En conséquence, les acteurs locaux et les décideurs publics sont de plus en plus conscients de la problématique de la pollution diffuse due à l'utilisation des pesticides.

De là, une question qui se pose : quel indicateur devons-nous développer comme outil d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion des risques liés à la pollution diffuse?

Pour répondre à cette question, nous avons développé dans ce chapitre l'état des lieux de la pollution diffuse liée à l'utilisation des produits phytosanitaires, les processus clés de devenir des PP dans les compartiments de l'environnement et les dispositifs mis en place pour la gestion liée à l'utilisation des pesticides et la réduction de la pollution diffuse.

De ce fait nous avons présenté dans ce chapitre les impacts des pesticides sur l'environnement, les différents processus clés du devenir des PP qui sont le phénomène de rétention et le phénomène de transformation dans les sols. Ces deux phénomènes sont des réactions qui affectent fortement le mouvement des pesticides à travers les zones insaturées du sol vers les eaux de surfaces et les eaux souterraines, et les différents outils d'évaluation des risques des produits phytosanitaires tels que l'indicateur de pression phytosanitaire (IFT).

CHAPITRE III

LA MODÉLISATION COMME INSTRUMENT D'ÉVALUATION DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES AU NIVEAU D'UN TERRITOIRE

Ce chapitre traite l'évolution de la modélisation et décrit les différents types de modèles utilisés, les approches de modélisation relatives à l'espace, les nouveaux instruments utilisés en fonction des caractéristiques physico-chimiques afin d'évaluer la pollution diffuse d'origine agricole.

Il met aussi l'accent sur l'état des produits phytosanitaires une fois appliqués sur les cultures que ce soit au niveau des producteurs, des gestionnaires du territoire et enfin on voit comment les décisions doivent être transmises aux producteurs.

1. Le rôle de la modélisation dans l'évaluation du risque d'utilisation des produits phytosanitaires

Les modèles sont des représentations simplifiées de la réalité. D'après Rousseau A. *et al.*, (2005), les modèles sont des représentations mathématiques des processus qui contrôlent les modes d'émissions, de transport et/ou d'impact des contaminants sur les écosystèmes.

D'après la littérature, le modèle peut être considéré comme la représentation mentale d'un phénomène, d'une description textuelle, d'un schéma conceptuel, d'un modèle réduit, d'une maquette, d'un prototype, d'un modèle statistique de régression très simple ou très complexe.

L'objectif du modèle est de permettre une meilleure structure de la pensée, le choix des indicateurs d'état, de pression ou de réponse les plus appropriés, et la prédiction de changements. En cours de réalisation d'une étude d'impact, les modèles donnent notamment l'occasion de simuler les changements de l'environnement ainsi que d'évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation (André *et al.*, 2008).

Au cours du temps, de nombreux modèles ont été développés dans le but de simuler le devenir des contaminants dans l'environnement. Ces modèles permettent dans un premier temps d'évaluer l'état d'un système, et dans un deuxième temps de réaliser une évaluation prédictive de l'effet de certaines modifications dans les paramètres ou les données d'entrée sur les variables de sortie. Par exemple, dans notre cas où il s'agit de l'influence des pratiques agricoles sur la pollution du sol et des eaux souterraines, l'application des outils de modélisation s'avère intéressante et utile car dans le cas des pesticides et des pratiques agricoles, les coûts d'analyse sont très élevés d'une part, et le grand nombre des matières actives utilisées en agriculture limite l'acquisition extensive de données sur le terrain d'une autre part (Rousseau *et al.*, 2005).

1.1. Les différents types de modèles

Plusieurs types de modèles sont disponibles, mais leur utilisation dépend tout d'abord de ce que nous souhaitons en faire, et ensuite de la précision désirée des résultats obtenus. Les

différents types sont les suivants **Les modèles de recherche:** ce sont des modèles complexes et souvent difficiles à appliquer car ils nécessitent de nombreuses données d'entrée. Ils tentent de représenter l'ensemble de tous les processus physiques, chimiques et biologiques connus, etc. afin d'estimer le plus précisément possible et de manière quantitative le devenir des pesticides sous des conditions limites très précises.

- **Les modèles de gestion:** ces types de modèle sont peu utilisés dans le cas de devenir des pesticides. Ils sont davantage conçus pour une utilisation pratique par les gestionnaires, en tenant compte uniquement des processus dominants et en nécessitant moins de données d'entrée. Mais les estimations sont souvent moins précises et fiables que celles obtenues avec des modèles de recherche.
- **Les modèles de tri:** ce sont des modèles qui permettent une caractérisation qualitative du devenir des pesticides et des risques qu'ils représentent pour l'environnement. Ces types de modèle proposent une solution analytique pour comparer le comportement relatif des pesticides sous des conditions limites très précises.
- **Les modèles de fugacité multi-média:** ces modèles sont tous dérivés du modèle de fugacité de Mackay (Mackay et al., 1991). Ils sont intéressants en première approximation à grande échelle, mais ils restent imprécis et ne permettent pas de prévoir les pics de concentration des pesticides. Ils reposent sur la définition de compartiments correspondant à chaque milieu (atmosphère, eau de surface, eau souterraine, sol, etc.) considérés en équilibre et en régime permanent.

1.2. Les approches de modélisation

Comme pour tous les modèles, on peut différencier les modèles de devenir des pesticides selon l'approche mathématique utilisée: probabiliste ou déterministe, mécaniste ou empirique.

- **Les modèles probabilistes:** ils utilisent des variables aléatoires pour présenter à la fois la variabilité et l'incertitude liées aux processus de devenir des pesticides. Les simulations qui seront faites dans ce modèle consistent en une série de tirages aléatoires. Ces tirages aléatoires déterminent une valeur différente pour chaque variable d'entrée et/ou paramètre et, après calcul, une valeur pour chaque variable de sortie. À l'issue de chaque simulation, nous obtenons une distribution de valeurs pour les variables de sortie. Un exemple de modèle probabiliste utilisé pour le devenir des pesticides est décrit par Beulke *et al.* (2004).
- **Les modèles déterministes:** ces modèles ne font pas appel aux probabilités mais sont basés sur l'hypothèse que les mêmes causes (valeurs des données d'entrée, conditions initiales, paramètres) produisent les mêmes effets (variables de sortie). Parmi les modèles déterministes, nous distinguons:
 - **Les modèles mécanistes ou conceptuels:** ce sont des modèles robustes. Ils peuvent être transformés et appliqués sous des conditions diverses, mais ils sont souvent complexes et nécessitent de nombreuses données d'entrée. Ces modèles sont basés sur les lois physiques et ils sont composés d'un modèle hydrologique,

d'un modèle d'érosion, d'un modèle de transport de polluants et dans certains cas d'un modèle de qualité de l'eau.

- **Les modèles empiriques:** ce sont des modèles à grande échelle qui reproduisent souvent le comportement d'un territoire par un ensemble de réservoirs interconnectés. Ils font appel à des relations établies entre certaines variables du modèle à partir de données mesurées en fonction des conditions d'application. Cela aboutit à un nombre important de paramètres à ajuster par calage. Les modèles de régression multiples sont des exemples de modèles empiriques, qui peuvent donner dans certains cas de très bons résultats (Gustafson, 1990).

D'après la littérature, certains modèles déterministes peuvent être utilisés en tant que modèle probabiliste, par conséquent, nous pouvons dire que la frontière entre ces types de modèles est parfois mince. D'après Rousseau *et al.* (2005), la plupart des modèles utilisés dans le transport de polluants sont des modèles déterministes avec une base mécaniste et quelques éléments empiriques sont nécessaires dans certaines étapes de calcul.

Certaines caractéristiques des modèles sont étroitement liées, comme il est indiqué dans la figure 12 ci-dessous, par exemple la performance prédictive est liée à la complexité du modèle et à celle des données requises.

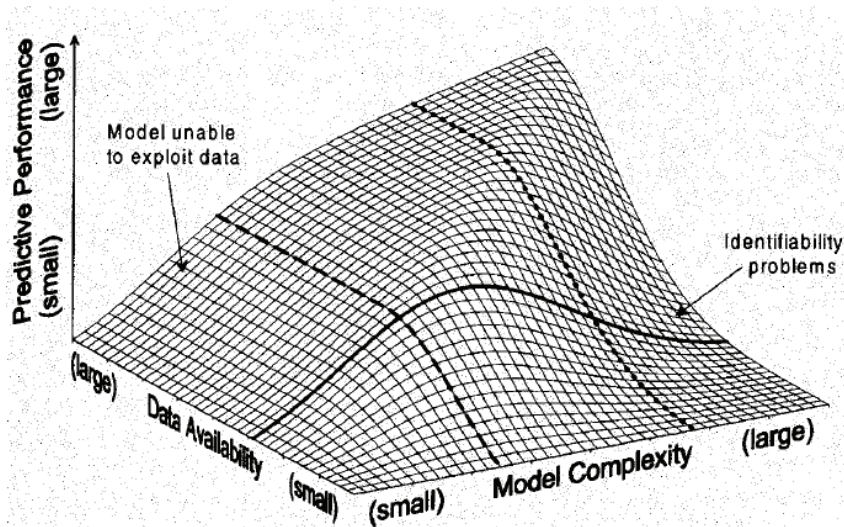


Figure 12: Diagramme schématisant la relation entre la complexité du modèle, la disponibilité des données et la performance prédictive (Source: Grayson et Broschl, 2000)

Ainsi, théoriquement, les modèles qui donnent des meilleurs résultats sont souvent pratiquement inapplicables et cela pour plusieurs raisons. D'une part, les données requises sont indisponibles et d'autre part la procédure de calage est trop fastidieuse (zone «Identifiability problems» sur la figure). Au contraire, l'utilisation des modèles très simples où les données sont complètes et disponibles, représente une perte d'information puisque le modèle est incapable d'exploiter ces données.

1.3. Les échelles spatiales des modèles de devenir des pesticides:

Nous pouvons différencier les modèles de devenir des pesticides selon leur échelle spatiale d'application: l'échelle parcellaire (incluant le champ agricole) et l'échelle des bassins versants.

- **L'échelle parcellaire:** à cette échelle, ces modèles sont utiles dans une perspective agronomique et de protection des eaux souterraines. Ces modèles permettent d'évaluer des flux de pesticides en sortie de champs par infiltration, ruissellement et érosion. Cependant, ces modèles sont limités pour évaluer les impacts au niveau du réseau hydrographique de surface. En revanche, compte tenu de la finesse de l'échelle, ils permettent d'évaluer l'effet de pratiques agricoles à l'échelle de la ferme sur les flux sortants de pesticides à l'échelle de la parcelle (Rousseau *et al.*, 2005).
- **L'échelle du bassin versant:** l'unité spatiale de calcul à cette échelle est plus grande que celle utilisée pour les modèles à l'échelle parcellaire, ce qui aboutit à une simplification des processus simulés. Ces modèles permettent de présenter les processus hydrologiques et le devenir des pesticides aussi bien au niveau du sol que des eaux souterraines. Ces modèles sont basés sur des modèles à l'échelle parcellaire, complétés par des modèles de transformation en rivière et des outils de gestion à l'échelle du bassin versant. Compte tenu de leur approche plus globale, ces modèles se prêtent bien à la gestion de pratiques culturales à grande échelle, permettant ainsi une approche intégrée de la gestion de l'eau selon les différents usages du sol sur un territoire donné.

1.4. Evolution du développement du modèle de devenir des pesticides au cours du temps

D'après la littérature, l'approche la plus simple pour modéliser le devenir des pesticides dans l'environnement est une approche empirique non distribuée.

Ce type de modélisation est basé sur des hypothèses que l'environnement peut être divisé en compartiments: sol, eau, atmosphère, avec éventuellement plusieurs sous-compartiments à titre d'exemple les compartiments organique et minéral du sol. Les échanges sont calculés entre chaque compartiment.

Récemment, le risque de lixiviation - transfert des pesticides au niveau des eaux souterraines comme source principale d'eau potable - a reçu beaucoup d'attention des gestionnaires des eaux dans les pays développés et dans les pays en développement.

Le comportement des pesticides dans le système sol-plante-eau détermine également l'exposition des organismes du sol où ce dernier joue un rôle important dans le processus du transfert des pesticides au niveau de la nappe phréatique. Par conséquent, le risque d'effets sur ces organismes doit être évalué complètement dans la procédure de régulation.

Au fil des années, 68 modèles ont été créés : 36 modèles à l'échelle du bassin versant et 32 modèles à l'échelle parcellaire. Mais en ce qui concerne les modèles d'évaluation des risques

de pollution environnementale liées aux sols, plusieurs études ont démontré que le sol joue un rôle prépondérant dans toutes les transformations des matières actives dans l'environnement. D'après nos recherches, peu de modèles développés pour l'évaluation des produits phytosanitaires dans le sol restent à des fins agronomiques. D'après Ecrin (2002), les modèles qui traitent le composant sol sont peu nombreux. Certains modèles sont axés sur la dynamique des produits phytosanitaires à travers le sol mais simulent très rarement les différents processus de la transformation des substances du sol. Comme preuve, l'étude réalisée par Devillers *et al.* en 2005 signale que le compartiment « eaux de surface » intéressent 80% des indicateurs étudiés, celui des « eaux souterraines » 58%, le compartiment sol 35% et enfin le compartiment « air » 19%. Mais, il est à noter qu'il faut prendre les pourcentages avec prudence, car certains indicateurs ne sont utilisés qu'une fois et n'ont fait objet d'aucune validation et d'aucune publication. Par ailleurs, l'objectif de notre étude consiste à choisir un modèle parmi ceux qui ont été validés.

Avec le temps, à la fin des années 80, le modèle PESTLA a été développé. Les résultats de ce modèle ont été largement utilisés pour l'évaluation de la lixiviation des pesticides dans les eaux souterraines (Van den Berg et Boesten, 1990 ; Boesten et Gottesburen, 2000).

Au Pays-Bas, les chercheurs ont développé en 1994 le modèle PESTRAS qui a comme objectif de donner une estimation simultanée du lessivage dans les eaux souterraines et de l'accumulation dans la couche superficielle du sol (Tiktak *et al.*, 1994).

En Suède, les chercheurs utilisent le modèle MACRO qui est un modèle unidimensionnel. Il a comme objectif de simuler le transfert des eaux et des produits phytosanitaires dans les premiers horizons du sol (Jarvis, 1994 ; Jarvis *et al.*, 2000)

Aux Etats-Unis, l'utilisation du modèle PRMZ (Pesticide Root Zone Model) a comme objectif d'estimer la probabilité pour qu'une certaine quantité de pesticide se disperse en dessous de la région de la plante cultivée. C'est le modèle le plus utilisé pour évaluer le lessivage (Mullen *et al.*, 1992 ; Trevisan *et al.*, 2000a).

En Allemagne, le modèle PALMO (Pesticide Leaching Model) qui est la version modifiée du PRMZ a été créé dans le cadre d'une procédure d'agrément des pesticides. Ces deux modèles PRMZ et PALMO sont des modèles qui introduisent des données hydrologiques d'une manière simple. Ces modèles sont largement utilisés dans l'évaluation des pertes de lixiviation, de ruissellement et d'érosion. Mais avec ces modèles, il existe une limite que la prédiction des profils des concentrations du produits phytosanitaires dans le sol reste assez hasardeuse (Klein *et al.*, 2000).

En 2002, au Pays-Bas, le modèle PEARL (Pesticide Leaching at Regional and Localscale) a été construit. Ce modèle est un modèle unidimensionnel. Son objectif consiste à évaluer le risque des produits phytosanitaires au niveau de l'environnement notamment dans le sol à l'échelle parcellaire.

Les différents processus pris en compte dans les modèles homologués sont décrits dans le tableau 11 suivant.

Tableau 11: Les différents processus pris en compte dans les modèles homologués (Source: Rat *et al.*, 2005).

| Modèles Phénomènes | MACRO (Larsbo M. et Jarvis N. | PEARL Tiktak <i>et al.</i>, 2002) | PRZM Carousel <i>et al.</i>) | PELMO (Jenne, 1998) |
|--|---|---|---|---|
| Transport de l'eau en milieu non saturé | Equation de Richards, Gravitaires dans les macrospores | Equation de Richards | Modèle à réservoir | Modèle à réservoir |
| Transport des solutés | Convection / Dispersion, Convection dans les macrospores | Convection / Dispersion, | Concentrations dans les réservoirs à chaque pas de temps | Concentrations dans les réservoirs à chaque pas de temps |
| Ecoulements préférentiels | Oui | Non | Non | Non |
| Sorption | Equilibre Instantané, Equation de Freundlich | Isotherme de Freundlich avec 2 sites: un avec équilibre instantané, l'autre avec une cinétique de premier ordre | Equilibre instantané, Equation de Freundlich | Equilibre instantané, Equation de Freundlich |
| Dégradation | Cinétique du premier ordre propre à chaque phase | Oui | Cinétique de premier ordre de plusieurs variables | Cinétique de premier ordre de plusieurs variables |
| Volatilisation | Non | Non | Equation de Fick et de Henry | Equation de Fick et de Henry |
| Métabolisme | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Ruissellement | Non | Non | Oui | Oui |
| Prélèvement par les plantes | Fonction de la transpiration de plante | Oui | Fonction de la concentration dans les sols | Fonction de la concentration dans les sols |
| Commentaires | modèle monodimensionnel | Modèle unidimensionnel issu de deux autres modèles PESTLA et PESTRA, le bilan hydrique étant simulé par un autre modèle SWAP | modèle monodimensionnel | modèle monodimensionnel |

1.5. Le modèle retenu

En se basant sur l'étude bibliographique et la littérature, le modèle retenu dans notre étude est le modèle PEARL. Il est l'un des modèles développés qui dépasse le simple stade de modèle mathématique et constitue de véritables systèmes d'aide à la décision pour évaluer l'effet de pratique de gestion sur la qualité du sol et de l'eau. PEARL, à l'aide de l'équation de Richards, fait une description plus fine des données de l'hydrologie.

Par ailleurs le modèle PEARL est un modèle qui a déjà été validé tant pour la partie hydrique et substance du sol que pour le transfert des matières actives au-delà de la zone racinaire. Ce modèle est un modèle qui peut être appliqué à des petites échelles comme à l'échelle parcellaire et à des grandes échelles comme à l'échelle d'un bassin versant ou régional. De plus, il prédit le risque de pollution des sols par les produits phytosanitaires et ainsi il donne la possibilité d'orienter les agriculteurs afin de mieux choisir leurs pratiques agricoles.

2. Prise de décision et gestion des risques des produits phytosanitaires

2.1. La perception des producteurs de l'utilisation des produits phytosanitaires

L'utilisation des produits phytosanitaires d'une manière excessive et incontrôlée causera des risques de pollution et de contamination des compartiments de l'environnement. La perception de ce type de risque est un facteur du comportement humain face à celui-ci. Il est à noter que la perception du risque des produits phytosanitaires chez les agriculteurs et les expositions aux substances actives des utilisateurs est peu étudiée. La dégradation de l'environnement et de l'écosystème est liée aux facteurs anthropiques et plus particulièrement aux pratiques agricoles. L'action de l'homme (agriculteur / producteur dans notre cas) constitue l'une des causes principales de cette dégradation. L'étude réalisée en 2014 par Romain Boissonnot intitulée « Risques sanitaires et perception chez les agriculteurs utilisateurs des produits phytopharmaceutiques » montre que la perception des agriculteurs du risque lié aux produits phytosanitaires est empirique. Elle se base sur des critères tels que l'odeur, le type, la forme ou l'efficacité des produits pour estimer le risque.

A cet effet, les pratiques agricoles et les perceptions engendrées des problèmes environnementaux et sanitaires sont déterminants dans l'élaboration des solutions aux problèmes de la gestion des pratiques agricoles.

2.2. Les modalités de contamination par les pesticides pour les utilisateurs

D'après Hayo et Van Der Werf (1997), le risque pour l'utilisateur (agriculteur, manipulateur) existe lors de la préparation de la bouillie, mais aussi lors de son application sur les cultures et sur des interventions sur le matériel. Ce risque sera d'autant plus grand si l'utilisateur ne porte pas des équipements de protection.

Aussi il est à noter que tous les travailleurs qui entrent en contact avec des surfaces traitées avec les pesticides (ex : les cueilleurs, les travailleurs affectés au désherbage ...) peuvent être exposés à des quantités de pesticides similaires ou même supérieures à celles des applicateurs.

De plus, dans certains cas, selon Samuel et Saint-Laurent (2001), ils pourraient être exposés à des produits plus toxiques en raison d'une transformation environnementale du pesticide qui a fait l'objet d'une application.

Selon Vleninckx (2006) et In Nado (2008), les personnes qui se trouvent accidentellement sur les champs déjà traités peuvent être exposés directement aux pesticides, à travers les particules persistant dans l'atmosphère.

Ainsi, selon Conso *et al.* (2002), les produits phytosanitaires peuvent pénétrer dans l'organisme par plusieurs voies d'entrée qui peuvent être à l'origine d'intoxication aiguë ou chronique.

Les voies de contaminations sont:

- La voie cutanée: c'est le mode le plus fréquent, cette contamination se fait lors:
 - 1- du mélange à mains nues de la bouillie, éclaboussure de produits sur la peau et dans les yeux ;
 - 2- de l'application sans équipements de protection individuelle,
 - 3- de contact des mains avec la région génitale,
 - 4- de la pulvérisation en hauteur ;
 - 5- l'application des produits dans un espace confiné et clos.

- La voie respiratoire: c'est une voie dangereuse, car le produit sera en contact direct avec le sang au niveau des alvéoles pulmonaires. C'est la voie d'intoxication la plus rapide et la plus directe. Cette intoxication peut se produire lorsqu'une personne respire de vapeurs, lors de la préparation d'un mélange de PP, lors d'une pulvérisation en hauteur ou à contre vent et lorsque les applications sont effectuées dans un endroit confiné et clos où la ventilation est inadéquate.

- La voie digestive: c'est un mode de pénétration accidentel. La substance sera réabsorbée au niveau de l'estomac. Plusieurs pratiques non recommandées (ou interdites) peuvent favoriser ce type d'exposition : fumer, boire ou manger lors de l'exécution de travaux avec les pesticides; souffler ou aspirer dans la tubulaire de l'équipement d'application afin de déboucher le tuyau; réutilisation des emballages vides pour stocker d'autres produits, des aliments ou de boissons.

- La voie oculaire: en cas de projection, ce qui provoque en plus de pénétration dans l'organisme, de phénomènes de toxicité locale (réaction allergique locale).

2.3. Le risque pour les consommateurs

Après l'application, les pesticides évoluent au cours du temps. La quantité de substance active ou de ces produits de transformation, présente dans les denrées végétales à la récolte, constitue le résidu. Selon plusieurs auteurs, Conso *et al.* (2002) et Carmad *et al.* (2010), la formation des résidus dépend tout d'abord de la nature du produit utilisé mais aussi d'un certain nombre de conditions extérieures comme le climat, les conditions d'utilisation, la dose et le délai avant récolte (D.A.R). Pour évaluer le risque pour le consommateur, il existe un indicateur qui est la Limite Maximale en Résidus (LMR). Ce dernier précise clairement que

les agriculteurs lors de l'application d'un produit prennent conscience des quantités utilisées pour que les LMR établis restent dans les limites compatibles avec la santé du consommateur.

3. Prise de décision et aide à la décision : comment faire passer le message aux producteurs?

Généralement, le processus d'étude d'impact des risques apparaît comme une succession de décisions partielles qui conduisent à la prise de la décision finale. Le mot « décider », dans le domaine de gestion *est décidé dans l'incertain*. Pour prendre la décision, les décideurs émettent des hypothèses souvent nourries par des données du passé.

En matière d'environnement, la prise de décision diffère des autres types de décisions. Selon Chechil et Carlisle (1991 : 11)³², les décisions environnementales revêtent des caractéristiques particulières:

- 1- *Sont complexes en raison des interrelations étroites entre les éléments du système écologique ; il s'ensuit que les conséquences d'une action sont difficiles à déterminer et encore plus difficile à évaluer;*
- 2- *Ont des problèmes plus vastes, les décisions environnementales ont fréquemment un degré d'incertitude plus élevé. Dans plusieurs cas, c'est la connaissance scientifique qui est défaillante; les scientifiques ne sont pas en mesure de prédire ou d'envisager tous les résultats ou toutes les conséquences possibles de la décision. Dans d'autre cas, il est difficile, voire impossible, de prévoir ce que la Cour pourrait demander en dommage si une catastrophe survenait;*
- 3- *Dans les systèmes écologiques, les actions reliées à une décision qu'on pose aujourd'hui peuvent ne pas produire immédiatement les effets prévus ; le système étant dynamique, il demande un suivi des changements dans le temps;*
- 4- *Les risques et les dangers environnementaux stimulent l'engagement des citoyens, ce qui résulte en des pressions d'ordre politique qui ne sont pas typiques des autres genres de décisions;*
- 5- *Le développement technologique a été si rapide que les conflits internationaux au sujet de décisions environnementales demandent une solution non conventionnelle.*

Ces caractéristiques illustrent bien la spécificité des décisions en environnement ainsi que les nouveaux défis qu'elles présentent.

Toujours d'après Chechile (1991 : 5), une bonne décision environnementale est définie comme une décision issue d'un ensemble rigoureux d'options qui est efficace, applicable, éthique et optimale. Afin de parvenir à cette décision éclairée, le décideur a besoin d'aide.

Les aides à la décision sont donc des opérations qui facilitent la tâche de prise de décision en simplifiant ou en raccourcissant le chemin cognitif suivi par l'homme. Selon la définition de Roy (1985) et In Simon (1990 : 35), l'aide à la décision est l'activité de la personne ou de l'organisation qui contribue à fournir des éléments de réponses aux questions que pose un intervenant dans un processus de décision. Ces éléments concourent à éclairer la décision.

³² L'ouvrage de Chechile et Carlisle (1991) traite abondamment, exemples à l'appui, du caractère spécifique des décisions environnementales.

Pour une gestion de la pollution phytosanitaire d'origine agricole, il est nécessaire de prendre des dispositions face aux enjeux économiques, agronomiques et environnementaux au niveau d'un territoire. Pour que le décideur choisisse entre différentes possibilités d'action, l'aide à la décision apparaît comme un moyen assurant la compréhension d'une problématique et permet la formulation des solutions possibles ainsi que les conséquences d'un choix donné (Ayadi-Hajji, 2012).

Pour Roy (2000) l'aide à la décision est comme « *l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un acteur dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces acteurs se trouvent placés d'autre part* ». Aussi selon Roy (2000), l'interaction qui existe entre l'homme et son environnement ne peut pas être ignorée en les considérant séparément dans un travail de modélisation. Pour Holtzman (1989), prendre une décision signifie concevoir et s'engager dans une stratégie de gestion de ressources.

La prise de décision nécessite une mise en place d'un processus de décision. Plusieurs travaux ont été effectués concernant le processus de décision. Nous avons retenu le modèle qui nous semble le plus clair et qui est adaptable.

3.1. Processus de décision

Le processus choisi reflète à la fois des expériences pratiques professionnelles et pédagogiques (Boothroyd, 1991) et une réflexion théorique (Chechile, 1991). Chacune des étapes de ce processus correspond à une action bien définie de l'un ou l'autre des acteurs (figure 13).

- 1- **Préciser la tâche à entreprendre:** cette étape consiste à identifier le problème et elle doit établir clairement les difficultés courantes et désigner tous les acteurs concernés.
- 2- **Définir les buts et les objectifs** visés par la tâche.
- 3- **Recueillir les données :** il s'agit de la recherche et de la collecte des données. A cette étape, il faut définir quelles données sont nécessaires à l'évaluation des objectifs.
- 4- **Analyser les données:** l'étape d'analyse comporte une critique et un traitement de l'information de même qu'une explication de la situation.
- 5- **Déterminer les possibilités:** consiste à déterminer les interventions ou les actions qu'il convient d'employer pour atteindre les objectifs visés compte tenu de l'état de la situation (Boothroyd, 1991).
- 6- **Définir les options:** cette étape consiste à classer les possibilités préalablement déterminées en différentes options compatibles et mutuellement exclusives. Par ailleurs, ces options doivent être réalisables et souhaitables.
- 7- **Evaluer les options:** il s'agit de dresser la liste des avantages et des inconvénients que présente chaque option et d'en faire l'analyse. Pour ce faire, on procède tout d'abord à la collecte et à l'analyse de données relatives aux options déjà définies ci-dessus, puis à l'évaluation des conséquences à court et à long terme, des risques et des bénéfices qui leurs sont associés et enfin à une évaluation de leur acceptabilité. Ce genre

d'analyse critique est exigeant et peut demander l'application de techniques quantitatives (Chechile, 1991).

- 8- **Décider** : une fois les étapes précédentes accomplies, nous arrivons à la décision elle-même. Pour prendre la décision de façon cohérente et efficace, le décideur peut faire appel à des outils d'aide à la décision (indicateurs, modèle, analyse multicritère, arbres de décision...) et tenir compte du degré d'acceptabilité sociale de cette décision.
- 9- **Mettre en œuvre la décision**: une fois la décision est prise, il convient généralement de la justifier et de mettre en place une démarche qui assurera sa prise en compte et son application.
- 10- **Suivre et contrôler**: assurer l'application des éléments liés à la décision.

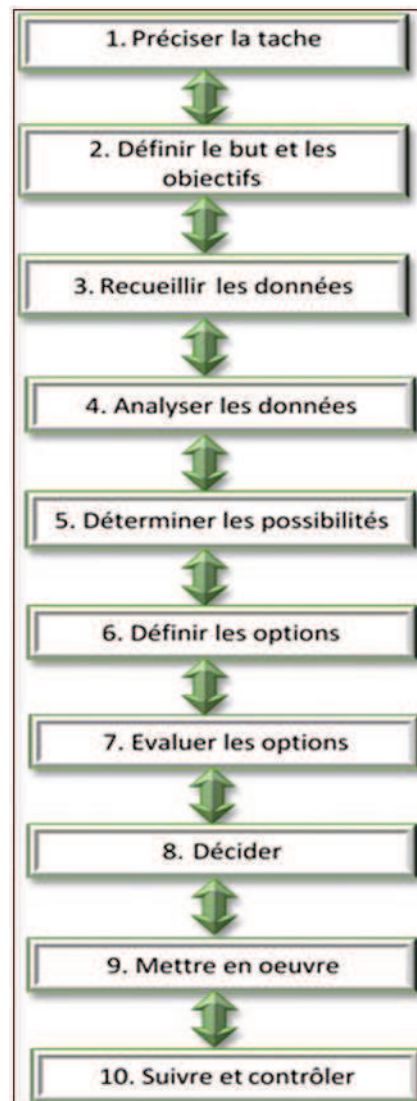


Figure 13: Processus de prise de décision (Source: élaboration personnelle d'après la réflexion de Boothroyd, 1991 et Chechile, 1991)

3.2. Transmettre la décision aux producteurs

Les agriculteurs se retrouvent face à deux courants contradictoires, le premier est celui de la forte pression économique et le deuxième est celui de la pression sociétale croissante pour une meilleure prise en compte de l'environnement, de la santé, de la biodiversité ...

D'après Michel Blanc³³, la profession agricole traverse une crise identitaire. Nous sommes dans une représentation où les individus ont l'impression de ne plus avoir de maîtrise. Lorsqu'ils se rencontrent, ils sont dans le domaine de la plainte.

Le problème principal réside dans la mentalité difficile que révèlent les agriculteurs. Ils se retrouvent en difficulté pour interagir avec le reste de la société.

Selon le sociologue Roger Le Guen (2012), pour qu'on puisse transmettre le message aux agriculteurs, il faut tout d'abord les forcer à discuter entre eux pour pouvoir discuter avec les autres acteurs.

Toujours d'après le regard du sociologue Roger Le Guen, *« on observe deux types de pressions extérieures contradictoires qui pèsent en s'accroissant sur le monde agricole. La première de ces pressions provient des politiques publiques et des acteurs de marché qui demandent aux agriculteurs de se comporter en concurrents d'une compétition globalisée. On va leur demander d'exercer leur esprit d'initiative, de prendre des risques, d'être économiquement libres (c'est-à-dire moins protégés par l'Etat) (...). Par ailleurs, il existe une nouvelle pression contradictoire qui consiste à demander aux agriculteurs de prendre en compte toutes les ressources dont ils sont en charge indirectement, qu'elles soient liées à la nature ou aux biens communs de la société. Ainsi, toute une série d'enjeux environnementaux (tels que l'accès à l'eau, les questions liées à la biodiversité, à la pollution de l'air, à la préservation des paysages, à la gestion des territoires et du foncier rural...) sont devenus pour les agriculteurs synonymes de changement subi, à la fois dans leur manière de travailler et de se situer»*.

Aujourd'hui, avec le changement au niveau de la profession agricole, les agriculteurs ont comme défi de changer leurs habitudes agricoles. Ils sont obligés d'apprendre à travailler en partenariat avec de nombreux interlocuteurs.

Avec l'émergence des problèmes de pollution diffuse et dans le cadre d'évaluer les pratiques agricoles des agriculteurs, la prise de décision et le passage de l'information nécessite une implication conjointe entre les pouvoirs publics et les acteurs eux-mêmes. Suite à cette implication, une démarche participative et une décision collective sont nécessaires pour une meilleure gestion d'utilisation des produits phytosanitaires.

4. Rôle de la spatialisation dans la détermination des degrés de pollution par les pesticides

La pollution diffuse est un problème temporel comme il est un problème spatial. Alors l'approche spatiale telle qu'elle est conçue par son mode d'organisation joue un rôle important dans la gestion de ce type de pollution.

³³ Formateur et consultant en accompagnement du changement et notamment auprès des chambres d'agriculture.

Dans le domaine de l'aménagement de l'espace, le recours à cette approche permet l'identification des zones les plus réceptives à ce type de pollution et de localiser les parcelles sensibles.

Comme la pollution diffuse dépend de la vulnérabilité de la parcelle agricole (topographie et localisation géographique) qui est amplifiée par les pratiques agricoles, et dans le but de développer les méthodes de gestion de ce type de pollution, des méthodes de cartographie montrant les risques de transfert des matières actives et les zones risquées ont été développées.

Les outils informatiques comme le SIG³⁴ ont été un facilitateur dans la mise en œuvre de ces méthodes.

D'après Ayadi-Hajji (2012), ces outils servent de support pour l'analyse, la réflexion ou l'aide à la décision pour les acteurs de terrain.

Les données descriptives des pratiques agricoles et du milieu physique sont indispensables pour ce type d'approche. D'après Dubois de la Sablonière *et al.* (1999), l'étape de modélisation nécessite à rapporter sur une carte différents facteurs. Selon Marchant (1994), la validation de ce type de cartographie est faite par des mesures directes et/ou à dire expert. Il est à noter que les niveaux d'organisation spatiale étudiée varient d'une échelle à une autre (CORPEN, 2003). Puisque l'analyse de la pollution phytosanitaire varie d'un niveau à un autre, alors la construction d'un outil de diagnostic ou d'aide à la réflexion pour la gestion de ce type de pollution se heurte au problème de changement d'échelle.

Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre a été consacré à une analyse bibliographique des outils d'aide à la décision développés dans notre étude qui sont utiles pour l'évaluation de la pollution diffuse d'origine agricole. Il en ressort que la modélisation, la perception des agriculteurs et la spatialisation sont les éléments clés qui permettent d'évaluer la situation actuelle et d'aider les acteurs locaux (gestionnaires, conseillers agricoles, décideurs politiques...) à mettre en œuvre des stratégies de gestion. La modélisation avec le choix des indicateurs va aider à simuler le devenir des contaminants dans les différents compartiments.

De ce fait nous avons détaillé l'évolution du développement du modèle de devenir des pesticides au cours du temps afin de choisir le modèle que nous allons utiliser comme outil d'évaluation des risques de transfert des PP dans l'environnement. A partir de cette littérature, le modèle retenu pour notre étude est le modèle PEARL qui est un véritable système d'aide à la décision pour évaluer l'effet des pratiques de gestion sur la qualité du sol et des eaux souterraines.

La perception de risque de pollution diffuse est un facteur du comportement humain face à celui-ci. D'après Boissonnot (2014), la perception chez les agriculteurs est une perception empirique. A cet effet, la perception est l'un des déterminants dans l'élaboration des solutions

³⁴ Système Informatique Géographique

aux problèmes de la gestion des pratiques agricoles car c'est l'agriculteur lui-même qui prend la décision des traitements recommandés.

De même, la littérature scientifique analysée indique que le problème de pollution diffuse est un problème spatial et un problème temporel. Le SIG est un outil d'aide à la décision mettant en évidence la notion de risque de pollution diffuse au niveau spatial.

Ce chapitre est aussi une introduction à la deuxième partie qui présente une démarche méthodologique d'élaboration d'une stratégie d'évaluation de risques de transfert des produits phytosanitaires aux niveaux des eaux souterraines dans notre travail.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

L'analyse de la revue bibliographique réalisée pour les trois axes de recherche développés dans les trois premiers chapitres nous a permis de construire le contexte général de la thèse. Les éléments analysés dans ces chapitres montrent l'importance de l'introduction du concept de la gestion raisonnée des pratiques agricoles dans le développement d'une stratégie de gestion de la pollution diffuse d'origine agricole sur un territoire donné.

Face à l'intensification durable de la production et la prévention des pertes de récoltes qui sont des éléments clés pour augmenter les productions et garantir leur régularité, l'utilisation massive d'intrants (engrais chimiques, pesticides) était le plus souvent la solution la plus facile et la sûre à court terme. Ces pratiques d'intensification entraînant des consommations parfois excessives d'engrais et de produits phytosanitaires ont un impact négatif sur l'environnement et la santé, ce qui pose aujourd'hui le problème de la durabilité de ces modes de production. En revanche, assurer la sécurité alimentaire par des processus d'intensification et la durabilité environnementale semblent être alors en opposition. Les conséquences sur l'environnement et la santé humaine de l'intensification des pratiques agricoles avec l'utilisation croissante de produits chimiques ont amené la société civile et les pouvoirs publics à s'interroger sur la pérennité de ce système de développement et à interroger le monde scientifique pour proposer d'autres modes de production permettant un développement durable. Quelle démarche méthodologique nous laisse mettre en place des systèmes de production agricole durables dans les territoires, tout en répondant aux objectifs d'accroissement de la production pour assurer un niveau acceptable de sécurité alimentaire? Quels outils doivent être développés pour évaluer les risques des produits phytosanitaires sur la durabilité de l'écosystème? Quels outils et méthodes doivent être mise en place par les décideurs dans les territoires pour assurer une gestion raisonnée des pratiques agricoles? Répondre à ces questions clés permettra de résoudre la problématique traitée dans cette thèse. Nous développerons ces points dans les deux parties suivantes.

L'analyse bibliographique, illustrée par le **premier chapitre**, nous a permis de montrer la complexité que les agriculteurs doivent prendre en considération pour atteindre une gestion raisonnée au niveau de leurs pratiques agricoles. Donc nous avons développé dans ce chapitre l'histoire de l'agriculture dans les pays du Nord d'une part et dans les pays du Sud d'autre part pour comparer les comportements afin d'identifier quelles sont les étapes à suivre pour atteindre une gestion raisonnée des pratiques agricoles.

L'état des lieux de la pollution diffuse liés à l'utilisation des produits phytosanitaires, les processus clés de devenir des PP dans les compartiments de l'environnement et les diapositifs mise en place pour la gestion lié à l'utilisation des pesticides et réduction de la pollution diffuse présenté dans le **deuxième chapitre**, a montré le cadre de la problématique de notre étude. De ce fait nous avons présenté dans ce chapitre les impacts des pesticides sur l'environnement, les différents processus clés du devenir des PP qui sont le phénomène de rétention et le phénomène de transformation dans les sols. Ces deux phénomènes sont des réactions qui affectent fortement le mouvement des pesticides à travers les zones insaturées du sol vers les eaux de surfaces et les eaux souterraines, et les différents outils d'évaluation des risques des produits phytosanitaires tels que l'indicateur de pression phytosanitaire (IFT).

Mais puisque ce type d'indicateur ne prend pas en considération ni les données pédoclimatiques ni la vulnérabilité du milieu physique, nous avons continué à détailler les outils d'aide à la décision qui permettent d'évaluer le niveau de diffusion dans l'environnement et cela est présenté dans le **troisième chapitre**. Ce chapitre a montré l'utilité des méthodes et des outils d'aide à la décision dans la gestion des risques des produits phytosanitaires.

La construction de ces diapositifs d'évaluation et de gestion des risques liés aux pratiques phytosanitaires à l'aide de l'indicateur de pression phytosanitaires (IFT) et le modèle PEARL est l'objet de la deuxième partie de cette thèse.

DEUXIEME PARTIE

**DEVELOPPEMENT D'UNE STRATEGIE D'EVALUATION DE
RISQUES DE DEVENIR DES PRODUITS
PHYTOSANITAIRES DANS LA REGION DU CAZA DE
ZAHLE**

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

La nécessité de réduire les risques des pratiques phytosanitaires sur les différents compartiments de l'environnement vient comme une réponse à l'accroissement de la pollution diffuse liée à l'usage des pesticides. Ainsi nous nous intéressons dans notre travail à la recherche d'outils d'aide à l'évaluation et à la gestion du risque de devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement. Ces méthodes permettent d'élaborer un plan stratégique de gestion de ce type de risque, afin de répondre aux exigences des différents acteurs, notamment les agriculteurs, les conseillers agricoles et les gestionnaires locaux.

Le besoin de réduire les impacts de l'usage des pesticides sur la durabilité des systèmes de production nous a conduits à focaliser notre réflexion sur la mise en place d'une démarche méthodologique d'évaluation et de gestion de risque de la pollution diffuse par les pesticides afin de comprendre le fonctionnement des exploitations agricoles en termes d'utilisation des produits phytosanitaires du territoire du caza de Zahlé sans les avoir replacées dans leur contexte global géographique, historique, social, politique et économique. A partir de ces caractéristiques, deux dispositifs ont été développés. Le premier a comme objectif d'élaborer une méthode de diagnostic des pratiques phytosanitaires et leur impact sur l'environnement. Alors que le deuxième consiste à représenter la méthode d'évaluation des quantités des pesticides dans le sol et les eaux souterraines à l'aide d'un outil d'aide à la décision qui est le modèle PEARL. Les résultats de ce modèle permettent de proposer aux agriculteurs et aux conseillers agricoles des alternatives de gestion dans le choix des pratiques phytosanitaires.

Nous avons donc choisi de retracer dans un **quatrième chapitre** les faits marquants de l'agriculture dans notre zone d'étude, les enjeux environnementaux en justifiant le choix du cadre géographique de notre étude. Pour cela une analyse des caractéristiques physiques, socioéconomiques et agronomiques a été décrite au cours de ce chapitre.

Les deux chapitres qui suivent (les chapitres 5 et 6) sont consacrés à présenter la démarche méthodologique adoptée et les outils utilisés pour atteindre l'objectif de cette étude. Le **chapitre 5** présente les étapes de notre démarche méthodologique adoptée de la typologie jusqu'à l'échantillonnage, les différentes étapes pour la réalisation des enquêtes. Le **chapitre 6** est consacré à la description du modèle PEARL. Ce modèle est la base de notre recherche. Il permet d'identifier le devenir des produits phytosanitaires au niveau du sol et des eaux souterraines. Pour cela, nous expliquons étape par étape le modèle afin de montrer la démarche appliquée lors de l'analyse de nos résultats de terrain.

CHAPITRE IV

LE TERRITOIRE DU CAZA DE ZAHLÉ ET LES CARACTERISTIQUES DE SON SYSTÈME AGRICOLE

La région du bassin versant supérieur du Litani en général, et le caza de Zahlé en particulier, est caractérisée par un paysage diversifié en termes de systèmes de culture, de types de sol, de pratiques agricoles et de pratiques phytosanitaires. Cette région constitue un territoire agricole de premier ordre mais elle est très touchée par la pollution diffuse d'origine agricole et cela est dû à la diversification des pratiques agricoles et phytosanitaires.

Cependant, cette diversité, qui est à l'origine de la pollution diffuse par les pesticides, est peu connue et rarement évaluée au niveau du territoire libanais en général et au niveau de notre zone d'étude en particulier.

Ce territoire est marqué par une forte interaction entre des activités socio-économiques diversifiées (agricole, commerce...). Il est caractérisé comme un espace marqué par la reprise d'une activité agro-industrielle depuis la fin de la guerre civile au Liban. De plus, ce territoire est connu par les étrangers en général et les français en particulier car c'est là que se situe le château Ksara. Le château Ksara est l'une des références du Liban à travers le monde pour la fabrication de vin ; il est connu à l'étranger en général et spécialement en France. De plus ce territoire est traversé par le plus grand fleuve au Liban: le Litani. Ce fleuve donne une caractéristique supplémentaire à notre territoire. Le choix du territoire du caza de Zahlé se justifie par les enjeux agronomiques, environnementaux et socio-économiques qui le caractérisent.



Figure 14: Photos prise durant notre travail de terrain, A: vue globale du territoire du caza de Zahlé, B: exemples d'exploitations agricoles à Nabi Ayla (source: travail de terrain, 2015-2016).

Pour répondre à notre problématique et atteindre nos objectifs de travail, des questions ont été posées: comment ce territoire est-il organisé ? Quelles sont les spécificités des systèmes agricoles face à la diversification des pratiques agricoles et phytosanitaires? Ce chapitre a pour objectif de

répondre à ces questions. Dans une première section, nous décrivons les caractéristiques physiques du territoire étudié et ses spécificités globales. Ensuite, nous allons décrire les caractéristiques socioéconomiques qui seront l'objectif de la section 2. Et enfin, dans la troisième section nous allons montrer les caractéristiques agronomiques du territoire d'étude et les impacts environnementaux afin de comprendre le contexte global qui va nous permettre plus tard de mieux cerner l'analyse de nos résultats.

1. Les caractéristiques physiques de la région du caza de Zahlé

Notre territoire d'étude se situe entre les deux chaînes montagneuses du Mont-Liban et de l'Anti-Liban, il s'étend des villages de Tal Alakhdar et de Majdel anjar frontière Sud-Ouest et Sud-Est (à la limite du caza de Béqaa Ouest) au Sud de la ville de Zahlé jusqu'à Niha et Nasriyeh Rizk frontière Nord-Ouest et Nord-Est avec le Caza de Baalbeck (figure 15).

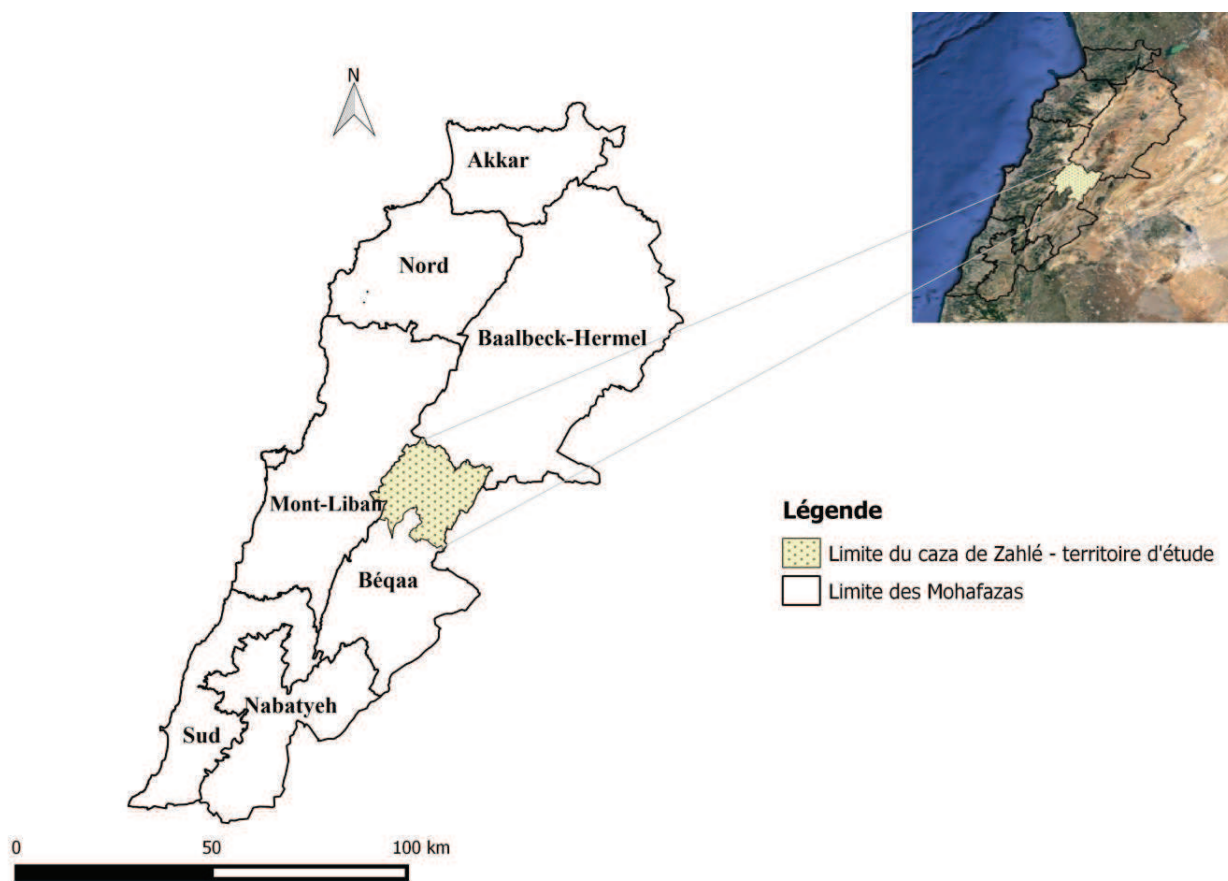


Figure 15: Localisation de notre zone d'étude - caza de Zahlé au niveau du territoire libanais (Source: F. Kanj, 2017-2018).

Le caza de Zahlé couvre 22 153 ha et représente près de 4% de la surface totale du Liban (418 km²) et 10% de la surface de la Béqaa (4 280 km²). La surface agricole utilisée atteint 20 844 ha

dont 10 213.56 ha sont irrigués³⁵. Le caza de Zahlé regroupe 43 circonscriptions foncières, 51 villages et 4 575 exploitations³⁶. Le caza de Zahlé est l'un des cinq cazas du Mohafazat de la Béqaa³⁷. A 40 kilomètres de Beyrouth, il se situe entre le Mont-Liban et la frontière syrienne.

Le caza de Zahlé comprend 43 localités dont 27 seulement sont pourvues de municipalités. Les autres n'ayant pas de conseil municipal sont soit rattachées à d'autres municipalités, soit relèvent directement de l'administrateur du Mohafazat quant à leurs équipements collectifs (figure 16).

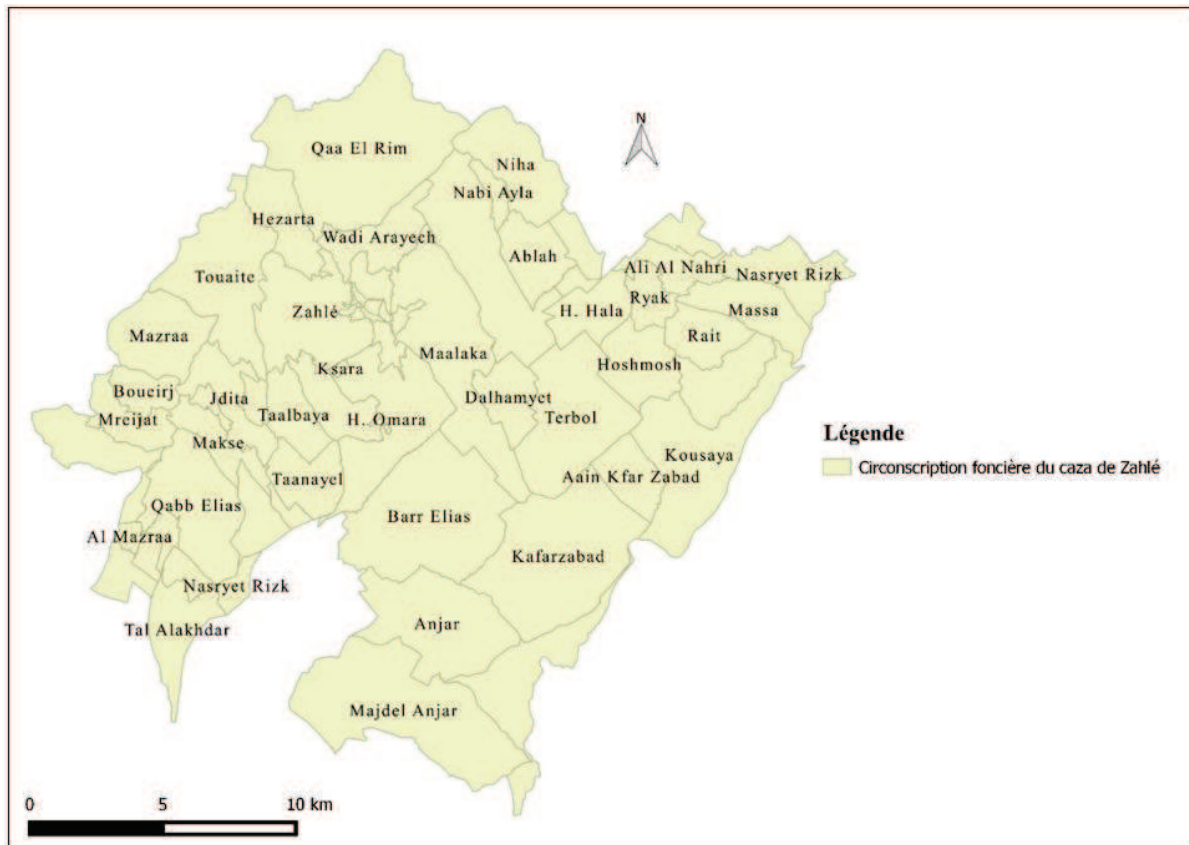


Figure 16: Circonscriptions foncières de notre zone d'étude (Source: F. Kanj, 2017-2018)

Notre zone d'étude se caractérise par des caractéristiques pédoclimatique et hydriques qui seront décrites comme suit.

1.1. Les sols

En se basant sur des recherches scientifiques qui ont été faites sur notre zone d'étude, d'après Chalhoub *et al.* (2009), les sols du Caza de Zahlé sont en général des sols non calcaires avec une teneur pauvre en matière organique. Ils contiennent au moins quelques minéraux altérables dans

³⁵ Ministère de l'Agriculture, FAO 2010.

³⁶ Une localité est l'équivalent d'une circonscription foncière. Elle peut être constituée d'un seul village, de deux ou plusieurs. Généralement, elle désigne une espace géographique bien limité ayant des frontières avec d'autres localités. Un village désigne une espace géographique bien déterminé où sont installés des habitants.

³⁷ Le Mohafazat de la Béqaa est l'un des sept mohafazats (départements) du Liban.

les fractions de limon et de sable. Toujours d'après Chalhoub *et al.* (2009), ces fractions produisent des positions de terrain qui permettent la décharge superficielle de l'eau en excès.

Généralement, les sols dans cette région sont caractérisés pour une texture moyenne et ont une bonne stabilité structurale, une porosité élevée, la capacité de l'eau a une bonne tenue et un bon drainage interne (Moussa-Haidar, 2014). En ce qui concerne la réaction du sol, le PH est neutre et légèrement acide. Les sols possèdent une fertilité chimique satisfaisante et une faune active.

D'après l'atlas agricole (2004), la reconnaissance des sols du Liban a été générée à partir des travaux menés en 1956 au sein du Ministère de l'Agriculture Libanaise par Bernard Gèze. Ces informations ont été présentées dans une carte intitulée «la reconnaissance des sols» qui classe les sols en tenant compte de la roche mère qui les compose.

En se basant sur cette carte, nous avons récupéré les principales classes qui sont présentées dans notre zone d'étude:

- 1- **Sol sur roche mère calcaire:** il englobe les sols rouges, les sols jaunâtres de montagne et les sols bruns. Les sols rouges sont des argiles résiduelles de décalcification. Les sols jaunâtres de montagne sont les analogues des sols rouges, ce sont des sols argileux, légèrement acide (pH 6.4 - 7.1) Les teneurs en éléments assimilables et en matières organiques sont très variables, mais la moyenne demeure favorable à une utilisation agricole. Les sols bruns sont en général fortement argileux. La réaction est légèrement alcaline (pH 7.0 - 7.6). Ces sols sont plus riches que les sols rouges.
- 2- **Sol sur des alluvions:** ces sols présentent des caractères variables et ont une réaction alcaline. Leur teneur en éléments assimilables est satisfaisante alors que le taux de matière organique est nettement déficitaire. Ce type de sol se trouve tout au long du Litani.
- 3- **Sol noir ou gris et sol tourbeux :** ce sont des sols de teintes très foncées. La réaction est toujours alcaline (pH 7.2 - 8). Les teneurs en éléments assimilables sont généralement moyennes.
- 4- **Sol steppique et subdésertique:** ces sols se localisent dans la Béqaa. Ils sont moyennement riches en éléments assimilables et la présence de matières organiques est très faible. La réaction est alcaline. On relève une teneur élevée de sels, surtout dans les sols subdésertiques.
- 5- **Sol de mélange:** ces sols sont constitués par une succession et une alternance de grès, sable, argile marnes, calcaires et basaltes anciennes. Ces sols présentent un parfait équilibre entre les divers constituants physiques, et les teneurs consistantes et équilibrés en éléments assimilables. La quantité de calcaire peut se montrer forte et peut entrainer des cas de chlorose. La réaction de ces sols est toujours neutre (pH 6.9 - 7.1). Ils sont convenables à toutes les cultures, et leur discontinuité entrave leur exploitation d'une manière extensive et mécanique. Ils constituent le domaine des plantations fruitières par excellence.

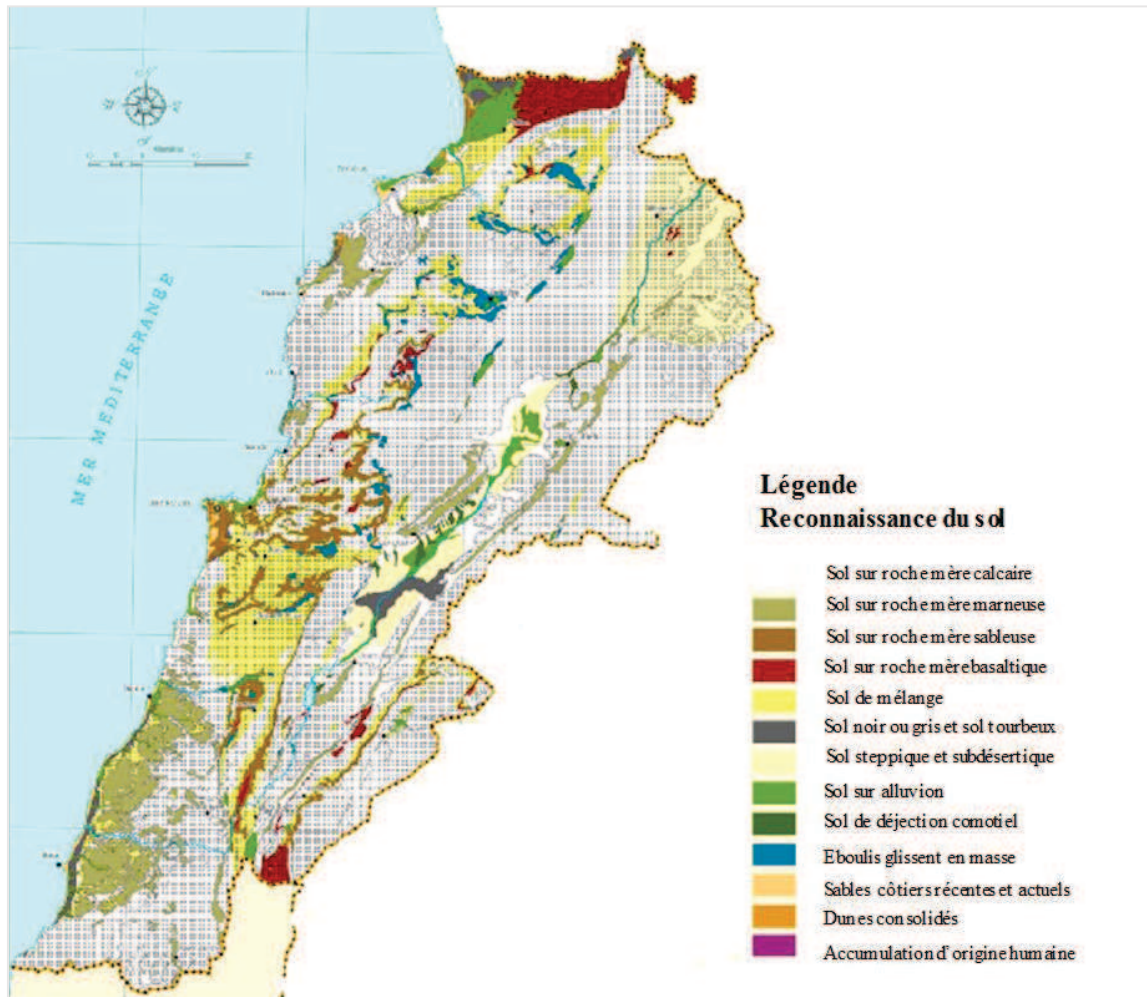


Figure 17: Carte de reconnaissance des sols (Source: Atlas Agricole, 2004).

En extrapolant les informations citées ci-dessus à l'échelle de notre zone d'étude, nous remarquons que :

- La texture du sol est la variable qui joue un rôle déterminant au niveau de la lixiviation des matières actives dans les eaux souterraines.
- Le sol du caza de Zahlé est composé de dix types de sol. Chaque type de sol est composé de 3 horizons. La profondeur maximale est de 155 cm et le PH varie entre 6.5 et 7.2 selon le type du sol. Les caractéristiques du sol de notre zone d'étude sont détaillées dans le tableau 12.

Les noms de types de sols qui sont décrits dans le tableau 12 ci-dessous sont : A: Regosol calcareos, B: Regosol non calcareous, C: Cambisols, D: Arenesols, E: Anthrosols, F: Calcisols, G: Fluvisols, H: Gleysols, I: Leptosols et J: Vertisols.

Tableau 11: Caractéristiques du sol de notre zone d'étude (Source: CNRS, Centre de télédétection national et MOA, 2016).

| Type du sol | Horizon | Profondeur (m) | Sand | Clay | Silt | Texture | Bulk density (kg/m ³) | MO | Saturation (%) | PH |
|-------------|---------|----------------|------|------|------|----------------|-----------------------------------|--------|----------------|-----|
| A | 1 | 0.07 | 0.41 | 0.32 | 0.27 | Clay Loam | 21.46 | 0.027 | 46.2 | 6.8 |
| | 2 | 0.45 | 0.41 | 0.32 | 0.27 | Clay Loam | 21.46 | 0.02 | 42.2 | 6.8 |
| | 3 | 0.42 | 0.44 | 0.26 | 0.3 | Loam | 22.11 | 0.015 | 40.5 | 6.8 |
| B | 1 | 0.15 | 0.59 | 0.2 | 0.21 | Sand loam | 23.07 | 0.024 | 41.6 | 7 |
| | 2 | 0.47 | 0.56 | 0.2 | 0.24 | Sand loam | 23.07 | 0.019 | 42.9 | 7 |
| | 3 | 0.43 | 0.55 | 0.25 | 0.2 | Sand Clay Loam | 21.62 | 0.007 | 34.7 | 7 |
| C | 1 | 0.08 | 0.14 | 0.46 | 0.4 | Silt Clay | 19.70 | 0.017 | 49.8 | 6.8 |
| | 2 | 0.42 | 0.14 | 0.5 | 0.36 | Clay | 19.54 | 0.016 | 51.5 | 6.8 |
| | 3 | 0.6 | 0.31 | 0.46 | 0.23 | Clay | 20.34 | 0.01 | 41.9 | 6.8 |
| D | 1 | 0.07 | 0.82 | 0.12 | 0.06 | Sand | 13.84 | 0.045 | 46.2 | 6.5 |
| | 2 | 0.45 | 0.8 | 0.12 | 0.08 | Sand | 13.85 | 0.05 | 42.2 | 6.5 |
| | 3 | 0.42 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | Sand | 13.9 | 0.05 | 40.5 | 6.5 |
| E | 1 | 0.15 | 0.17 | 0.23 | 0.6 | Clay silt | 10.195 | 0.069 | 41.6 | 7 |
| | 2 | 0.47 | 0.19 | 0.21 | 0.6 | Clay silt | 10.2 | 0.07 | 42.9 | 7 |
| | 3 | 0.43 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | Clay silt | 10.21 | 0.072 | 34.7 | 7 |
| F | 1 | 0.08 | 0.33 | 0.38 | 0.29 | Sand clay | 13.03 | 0.0537 | 49.8 | 7 |
| | 2 | 0.42 | 0.31 | 0.4 | 0.29 | Sand clay | 13.2 | 0.055 | 51.5 | 7 |
| | 3 | 0.6 | 0.32 | 0.4 | 0.28 | Sand clay | 13.25 | 0.065 | 41.9 | 7 |
| G | 1 | 0.07 | 0.09 | 0.6 | 0.31 | Clay silt | 12.14 | 0.0243 | 46.2 | 7 |
| | 2 | 0.45 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | Clay silt | 12.3 | 0.025 | 42.2 | 7 |
| | 3 | 0.42 | 0.15 | 0.6 | 0.25 | Clay silt | 12.3 | 0.025 | 40.5 | 7 |
| H | 1 | 0.15 | 0.31 | 0.51 | 0.18 | Sand clay | 13.92 | 0.0115 | 41.6 | 7 |
| | 2 | 0.47 | 0.3 | 0.51 | 0.19 | Sand clay | 13.95 | 0.012 | 42.9 | 7.2 |
| | 3 | 0.43 | 0.27 | 0.51 | 0.22 | Sand clay | 14 | 0.012 | 34.7 | 7.2 |
| I | 1 | 0.08 | 0.13 | 0.75 | 0.12 | Clay | 11.92 | 0.07 | 49.8 | 6.5 |
| | 2 | 0.42 | 0.16 | 0.7 | 0.14 | Clay | 11.95 | 0.065 | 51.5 | 6.5 |
| | 3 | 0.6 | 0.15 | 0.73 | 0.12 | Clay | 12 | 0.066 | 41.9 | 6.5 |
| J | 1 | | 0.49 | 0.32 | 0.19 | Sand Clay Loam | 15.13 | 0.168 | 41.6 | 6.2 |
| | 2 | | 0.5 | 0.32 | 0.18 | Sand Clay Loam | 15.5 | 0.17 | 42.9 | 6.5 |
| | 3 | | 0.51 | 31 | 0.18 | Sand Clay Loam | 15.55 | 0.1725 | 34.7 | 6.2 |

1.2. Le climat

Dans son ensemble, le Liban se caractérise par un climat méditerranéen, qui est froid et pluvieux en hiver, chaud et humide en été, doux au printemps et en automne. Cependant, il y a une différence dans la météorologie entre les régions et notamment entre les régions côtières et intérieures. D'après Enzel *et al.* (2008), ceci est bien prononcé dans les chaînes des montagnes de l'Ouest du Liban (zone de Mont-Liban) comprenant une barrière climatique entre les deux régions.

Ainsi, le climat joue un rôle important sur l'écosystème et notamment au niveau de la répartition végétale et agricole. Cette variation de météorologie entre les régions a permis une diversification des productions. Cependant, plusieurs facteurs influencent les éléments climatiques d'une région : la latitude, le relief, l'altitude et les étendues d'eau (De Vaumas E., 1956 et le Loiret, météo 45).

Par ailleurs, la latitude du Liban influe sur sa température et son humidité, le relief sur le climat, les ressources en eau, la végétation et la différence d'altitude sont à l'origine des précipitations variées.

La nature des précipitations varie en fonction de l'altitude. Ainsi, la ceinture du Mont-Liban reçoit de 1000 à 1500 mm de pluie, alors que dans la vallée de la Béqaa, elle diminue du Sud au Nord de 600 à 200 mm de pluie.

La caractéristique principale des précipitations au Liban, ainsi que dans le bassin méditerranéen, réside dans sa répartition saisonnière. Au Liban, la pluviométrie s'étend du début du mois de septembre jusqu'à la fin du mois de mai, tout en sachant que la pluviométrie de l'automne est légère et irrégulière. Les trois mois de l'hiver sont considérés comme les plus pluvieux de l'année (Baldy, 1959; Fadlallah, 2001). En effet, 60 à 70% de la pluviométrie annuelle concernent ces trois mois, avec un pic au mois de janvier. Quant à l'été, il est considéré comme une saison sèche, notamment durant les mois de juillet et d'août.

Le climat du caza de Zahlé, est à la fois méditerranéen et semi-continentale, par sa température et sa pluviométrie. En effet, la moyenne des températures au mois de janvier 2015 est de 3°C et au mois d'août de la même année est de 25°C (IRAL, 2016).

Dans le caza, les températures oscillent entre 40° en saison chaude et sèche et baissent en dessous de 0°C pendant l'hiver. Ces fluctuations, surtout pendant les périodes de floraison des arbres fruitiers et de certaines cultures annuelles précoces, entraînent de graves problèmes agricoles, parfois même une destruction complète des récoltes.

➤ *Régime des précipitations*

Au niveau du territoire libanais le service météorologique se base sur deux sources officielles l'aéroport de Beyrouth et l'Institut de Recherche Agronomique Libanais (IRAL). Ils surveillent les différents paramètres météorologiques comme la température, l'humidité, la radiation solaire, la vitesse du vent, les précipitations et l'évapotranspiration. Avant la guerre civile, le Liban possédait 80 stations météorologiques distribuées sur tout le territoire libanais mais la plupart de ces stations ont été détruites pendant la guerre, ce qui a provoqué une interruption d'enregistrement des

données. Il est donc difficile d'avoir une série chronologique de la pluviométrie de notre zone d'étude malgré l'existence de quatre stations météorologiques celle de Bar Elias, Hoch Omara, Tall Amara et Terbol ce qui rend difficile l'interprétation des données climatiques.

Le climat de la Béquaa diffère entre le nord, le centre et le sud (différence de températures, d'humidité et de précipitations). En 2016, au niveau de notre zone d'étude, les précipitations ont atteint 544.2 mm. Ces précipitations sont inégalement distribuées suivant les mois de l'année, à noter que 90% des pluies tombent entre le mois de novembre et avril (figure 18) (ICARDA, IRAL, 2016).

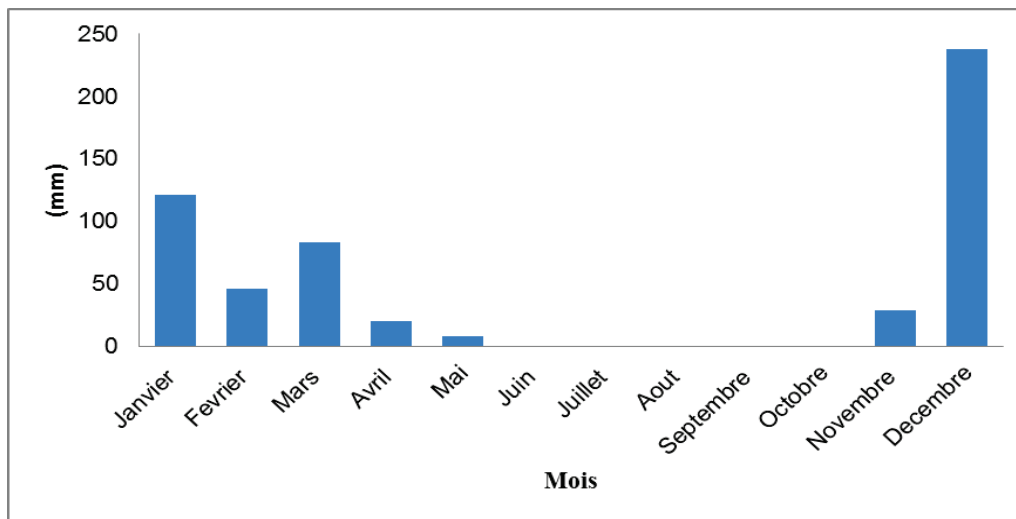


Figure 18: Total des précipitations mensuelles (mm) durant l'année 2016 (Source: calculs personnels d'après les données collectées d'ICARDA et de IRAL, 2017).

En ce qui concerne la variation des précipitations annuelles totales depuis l'année 2005, il apparaît clairement d'après la figure 19 que l'intensité des précipitations en fonction des années est variable. Nous remarquons que tous les 4 ans, nous avons une année où les précipitations sont très faibles (2006, 2010 et 2014).

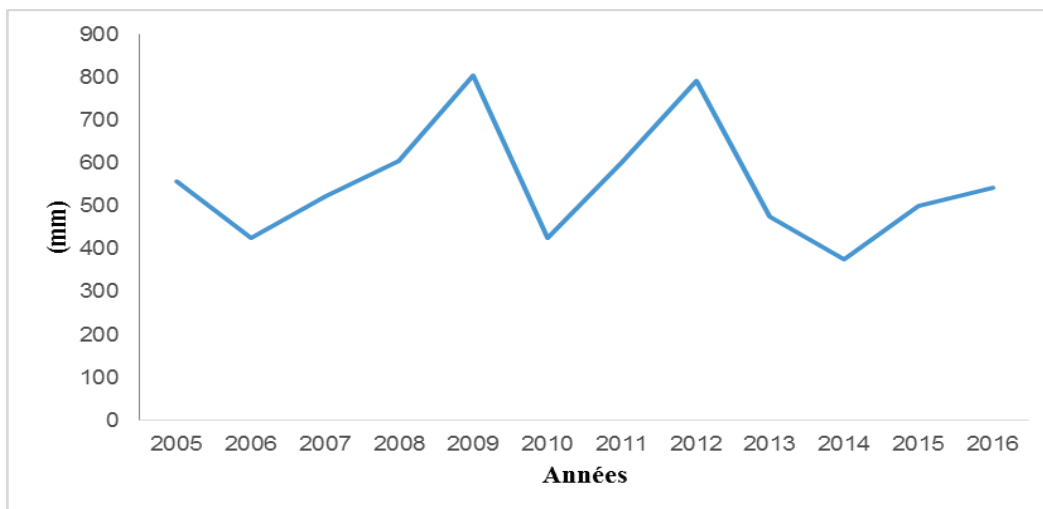


Figure 19: Variation des précipitations annuelles entre 2005 et 2016 (Source: calculs personnels d'après les données collectées d'ICARDA et de IRAL, 2017)

Au niveau de la distribution des précipitations dans chaque village, l'intensité des précipitations diffère d'une zone à une autre comme le montre la figure 20 ci-dessous.

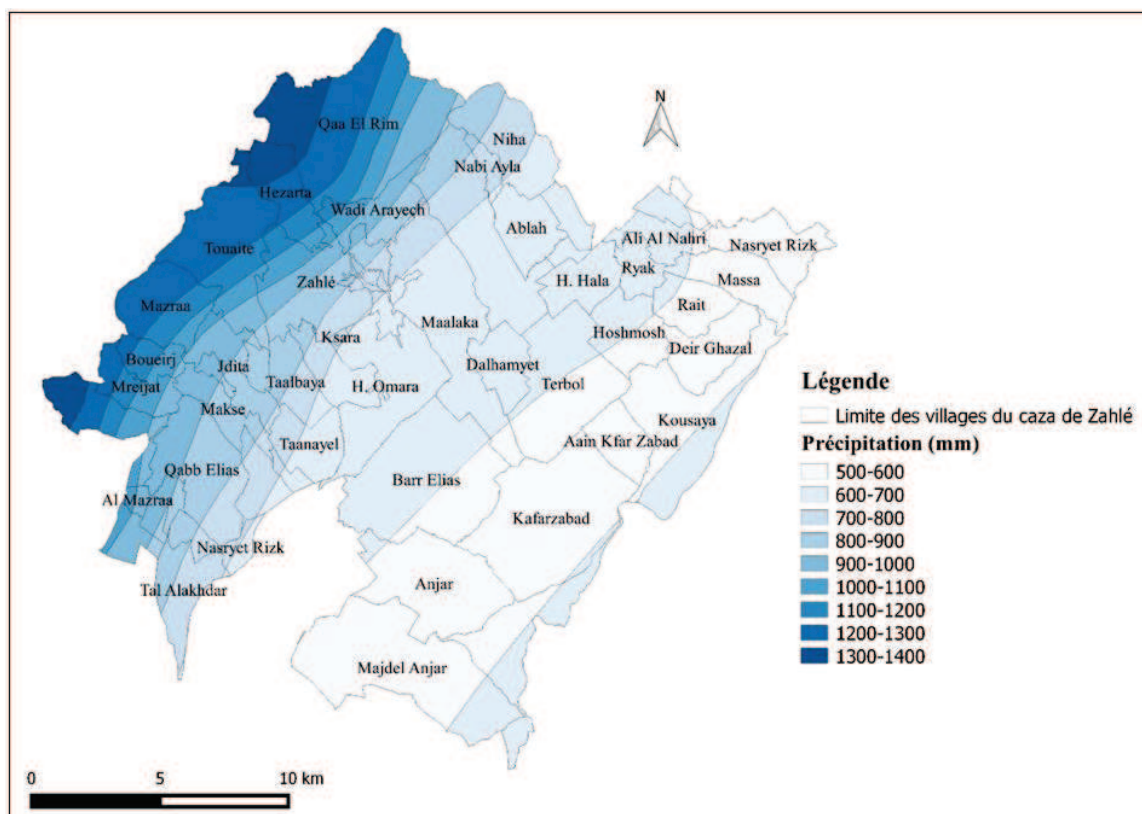


Figure 20: Distribution des précipitations au niveau de notre zone d'étude (Source: Données collectées du CNRS, F. Kanj, 2016-2017).

Selon les années, cette variation de précipitation va influencer les pratiques des agriculteurs. Avec une augmentation de température et une diminution des précipitations, il y aura apparition de nouveaux ravageurs. De ce fait, les agriculteurs ont tendance davantage à utiliser les produits phytosanitaires. Le facteur climat joue donc un rôle important dans la gestion d'utilisation des PP.

1.3. Relief

Le caza de Zahlé appartient en majeure partie à la plaine de la Béqaa. La partie médiane est une vaste plaine, dont l'altitude varie entre 950 mètres au nord et 850 mètres au sud, traversée par le fleuve Litani et ses affluents, dont le Ghouzail et le Berdawni. La côte ouest est une partie du Mont-Liban que la sépare des autres cazas du Mont-Liban, les montagnes de Sannine, Barouk et Kneisseh, dont l'altitude varie entre 2 091 mètres au sud et 2 700 mètres au nord.

Ces montagnes, qui s'élèvent rapidement, constituent une barrière entre ce caza et les autres cazas du Mont-Liban, ce qui rend la communication assez difficile, surtout en hiver, parce que la neige bloque la route qui mène à Beyrouth. A l'Est, le caza de Zahlé s'étend sur une partie de l'Anti-Liban, qui s'élève à 1,700 mètre environ et forme une barrière naturelle avec la Syrie ainsi que les lignes de démarcation internationales.

Au nord et au sud, la communication est facile avec le caza de Baalbeck et celui de la Béqaa-Ouest en raison de l'étendue de la plaine.

Le relief explique pourquoi le caza de Zahlé constitue un carrefour important dans la région de la Béqaa, entre le nord et le sud, car les montagnes forment une barrière naturelle à l'Est et à l'Ouest, sauf à travers les routes internationales.

1.4. Les ressources hydriques

L'eau constitue le second facteur déterminant de l'agriculture après le climat. Le bassin versant du Litani est le bassin principal de notre zone d'étude. Le Litani est le plus grand fleuve libanais. Plus de 300 000 personnes vivent dans le bassin avec une superficie de 2 468 Km², soit 25% de la surface du pays (Blanc, 2008).

D'après l'office du Litani, 80% du bassin se situe dans la Béqaa et 20% dans la région du Liban-Sud.

Il est desservi par plusieurs sources nommées « Yanabih Al Elleik » situées à 1000 mètres d'altitude, à 10 kilomètres à l'ouest de la ville de Baalbeck. Ensuite le Litani traverse la zone de la Béqaa du nord au sud à une altitude variant entre 800 et 1000 mètres pour se jeter dans la Méditerranée à 7 km au nord de Tyr (Liban sud).

Du point de vue géomorphologique, le bassin versant du Litani est divisé en deux sous-bassins: le bassin supérieur et le bassin inférieur (figure 21).

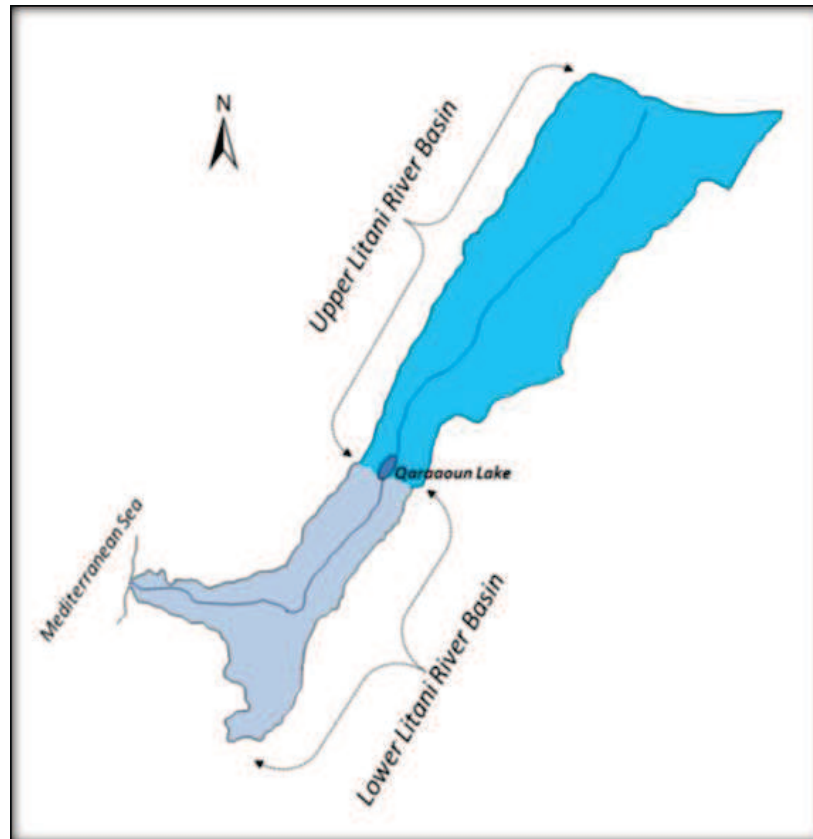


Figure 21: Présentation des sous-bassins supérieur et inférieur du bassin versant "Litani"
(Source : CNRS, 2014).

➤ *Caractéristiques générales du bassin supérieur du «Litani»*

Le bassin supérieur s'étendant des sources du caza de Baalbeck au barrage de Qarraoun qui a une longueur de 110 m et une hauteur de 61 m. Le lac peut stocker environ 220 millions de mètres cubes d'eau, dont 160 sont utilisés annuellement pour l'irrigation de 27 500 hectares et pour la production de l'hydroélectricité (60 GWh-3). Les autres 60 millions de mètres cubes sont consacrés à l'approvisionnement en eau domestique au cours de la saison sèche (Moussa-Haidar, 2014). Par ailleurs, le volume d'eau drainé par le bassin équivaut à 24% du volume net des précipitations tombant au niveau de l'ensemble du pays, et 40% du volume d'eau drainée par l'ensemble des fleuves libanais. Il est à noter qu'à lui seul, le bassin versant supérieur du Litani représente 15,3% de la surface du Liban.

D'après Rammal (2007), le bassin supérieur est subdivisé en 3 sous-unités majeures : la haute Béqaa, le Béqaa moyenne et la basse Béqaa. Les caractéristiques de ces 3 sous-unités figurent dans le tableau ci-dessous (tableau 12).

Tableau 12: Caractéristiques générales du Bassin supérieur (Source: Moussa-Haidar, 2014).

| Sous-unités du bassin supérieur | Haute Béqaa | Béqaa moyenne (Béqaa centrale) | Basse Béqaa (Ouest de la Béqaa) |
|---|-------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Superficie (km ²) | 683 | 568 | 377 |
| Direction et orientation | NNE-SSW | NNE-SSW | NNE-SSW |
| Débit (M.m ³ /an) | 295 | 411 | 641 |
| Pente (m/km) | 10 | 20 | 25 |
| Largeur/longueur ratio | 0.8 | 0.49 | 0.61 |
| Densité de drainage (km/km ²) | 0.81 | 0.75 | 0.71 |

➤ *Anthropisation au niveau du bassin supérieur*

Le nombre d'habitants du bassin versant du Litani est à peu près de 539 488 habitants répartis sur 286 villages et villes, avec seulement 16 villes ayant une population supérieure à 10 000 habitants (El Fadel *et al.*, 2003).

Le bassin supérieur du Litani, comprend 147 villages, qui sont répartis comme suit (tableau 13).

Tableau 13: Distribution des villages dans le bassin supérieur du "Litani" correspondant au département (caza) (Source: ONL, 2010 ; ACS, 1997).

| Département | Caza | Surface (en km ²) | Nombre de villages |
|-------------|-------------|-------------------------------|--------------------|
| Béqaa | Baalbeck | 614 | 44 |
| Béqaa | Rachaya | 57 | 1 |
| Béqaa | Béqaa ouest | 422 | 40 |
| Béqaa | Zahlé | 451 | 62 |

L'un des facteurs majeurs affectant les conditions de vie de l'environnement dans le bassin versant du « Litani » est la croissance urbaine rapide. L'évolution de la croissance démographique dans le bassin (tableau 14) aboutira à l'augmentation de la construction d'immeubles dans les zones susceptibles aux mouvements sans tenir en compte de l'effet néfaste sur l'environnement.

Tableau 14: Croissance de la population dans le bassin versant du Litani (LRB)

| Années | 1994 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 (estimation) |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| Population | 276 000 | 303 000 | 338 000 | 376 000 | 420 000 | 470 000 |

➤ **Les principaux affluents**

Au niveau du bassin versant supérieur du Litani, la géologie est principalement constituée par des strates de roches calcaires fortement perméables riches en eaux souterraines. La nappe phréatique est peu profonde et les réserves souterraines en eaux sont estimées à 104,6 millions de m³ (LRA, 2002).

Le Litani possède 16 affluents qui prennent leurs sources sur les versants Est du Mont- Liban et Ouest de l'Anti-Litani. Les deux affluents principaux du Litani sont le Ghouzaïel et le Berdawni.

Le Ghouzaïel prend sa source dans la région d'Anjar (versant Ouest de l'Anti-Liban) alors que le Berdawni prend ses sources au Jabel Sannine entre les villages Qaa El Rim et Hezarta (versant Est du Mont-Liban).

Les grandes sources permanentes de ses affluents, principalement celle du Ghouzaïel, maintiennent un écoulement important même pendant la période d'étiage.

Après avoir décrit les caractéristiques physiques de notre territoire nous passons maintenant à la description des caractéristiques socio-économiques afin de bien comprendre l'organisation de notre territoire du point de vue économique et social.

2. Les caractéristiques socioéconomiques de notre territoire

L'économie libanaise des années 2000 est une économie dominée par les services, essentiellement orientée vers le tourisme, l'intermédiation financière et le commerce. Notre zone d'étude est l'un des 25 cazas du Liban. D'après les chiffres de l'Administration Centrale de la statistique au Liban en 2005, la population résidente totale du caza de Zahlé est estimée à 144 500 habitants, soit 30.6% de la population résidente du mohafazat de la Béqaa, qui compte 471 209 habitants, et 3.84% de la population résidente du Liban, qui compte 3 755 034 habitants (Localiban, 2015).

En effet les seuls chiffres disponibles avant 2005 remontent à 1971. En comparant les pourcentages de 2005 à ceux de 1971, nous remarquons que la population du caza a gardé presque les mêmes pourcentages : en 1971, la population du caza de Zahlé représentait 33% de celle de la Béqaa et 3.46% de celle du Liban.

2.1. Population active

Concernant la population active, comme il a été indiqué précédemment, les chiffres remontent à 1975. D'après une étude faite par Khoury E. *et al* en 1975, la population active (comprise entre 15 et 64 ans) est estimée à 45 315 personnes soit 51% de la population résidente du caza. Et le taux de personnes occupées dans les grandes agglomérations est de 40.1% pour le sexe masculin et 6.7% pour le sexe féminin. Dans les autres localités il est de 42.1% pour le sexe masculin et 9% pour le sexe féminin. Ce même taux est au Liban de 43.8% pour le sexe masculin et 9.5% pour le sexe féminin. D'après ce taux, la population effectivement active du caza de Zahlé s'élève à 11 200

personnes, dont 9 450 hommes et 1 750 femmes. Le tableau ci-dessous montre la population active par secteur d'activité.

Tableau 15: Répartition de la population occupée par secteur d'activité (1975).

| Activité | Caza de Zahlé | | Liban |
|---------------------------|---------------|--------------|--------------|
| | Nombre | % | % |
| Agriculture | 3 200 | 28,5 | 18,9 |
| Industrie | 1 800 | 16,1 | 17,8 |
| Electricité et eau | 140 | 01,2 | 01,0 |
| Construction | 860 | 07,7 | 06,5 |
| Commerce | 2 200 | 19,6 | 17,0 |
| Autres services | 3 000 | 26,9 | 38,8 |
| Total | 11 200 | 100,0 | 100,0 |

2.2. La structure sociale: un Mix de communautés confessionnelles

D'après les données de l'atlas du Liban (2007), l'inscription géographique du fait confessionnel exprime par excellence la diversité et les cloisonnements de l'espace libanais. Les cartes présentées dans les figures 22 et 23 ci-dessous soulignent les forts contrastes d'implantation spatiale des différents groupes. Outre les spécialisations régionale affirmée de la plupart des groupes confessionnels, on peut distinguer des communautés qui sont localement dominantes, comme les sunnites, les maronites, les chiites ou, plus ponctuellement, les orthodoxes ou les druzes, et de groupes qui sont constamment minoritaires. Toutefois, selon les régions, une confession du premier groupe peut très bien se trouver en situation minoritaire.

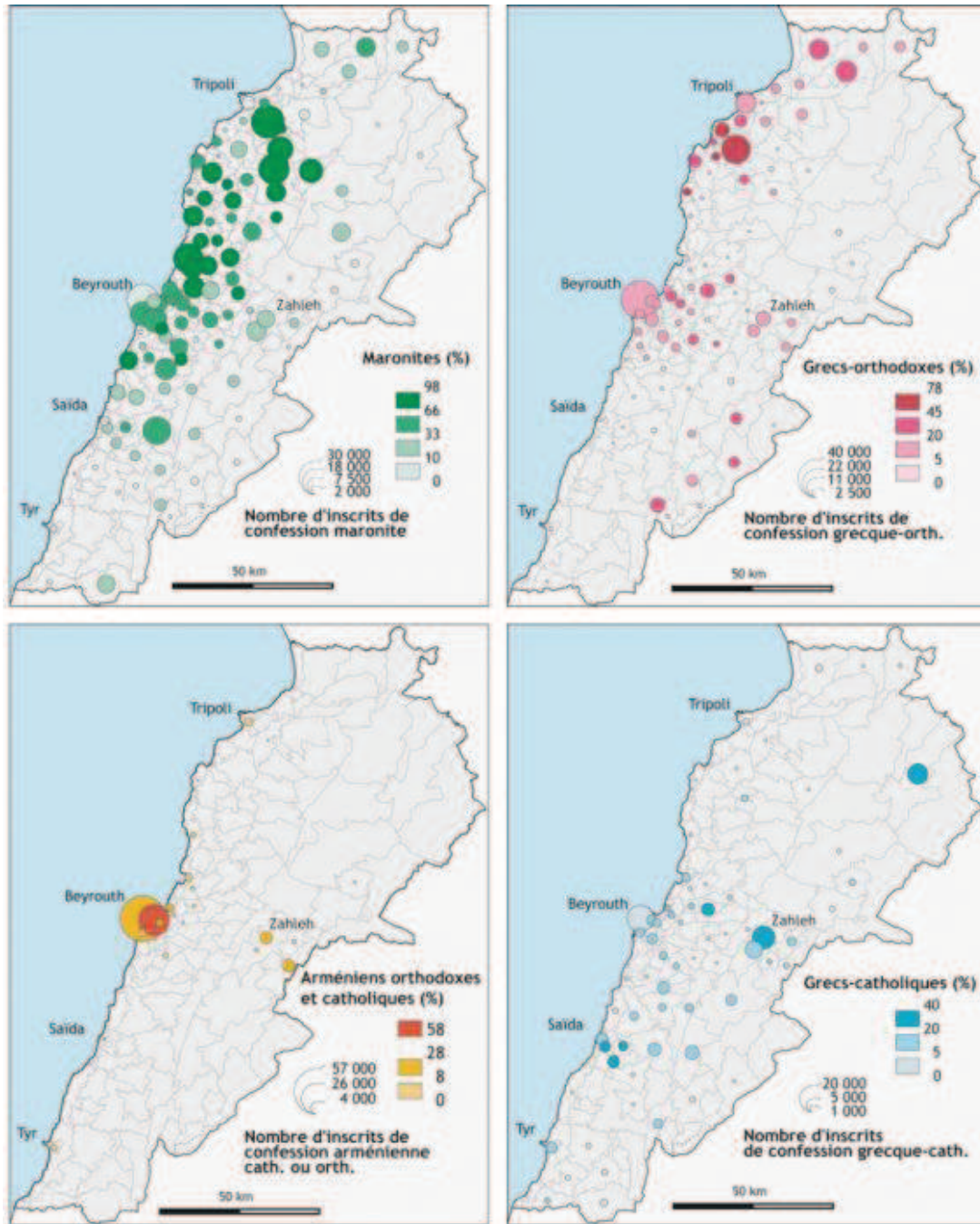


Figure 22: La répartition des confessions chrétiennes (Source: Atlas du Liban, 2007).

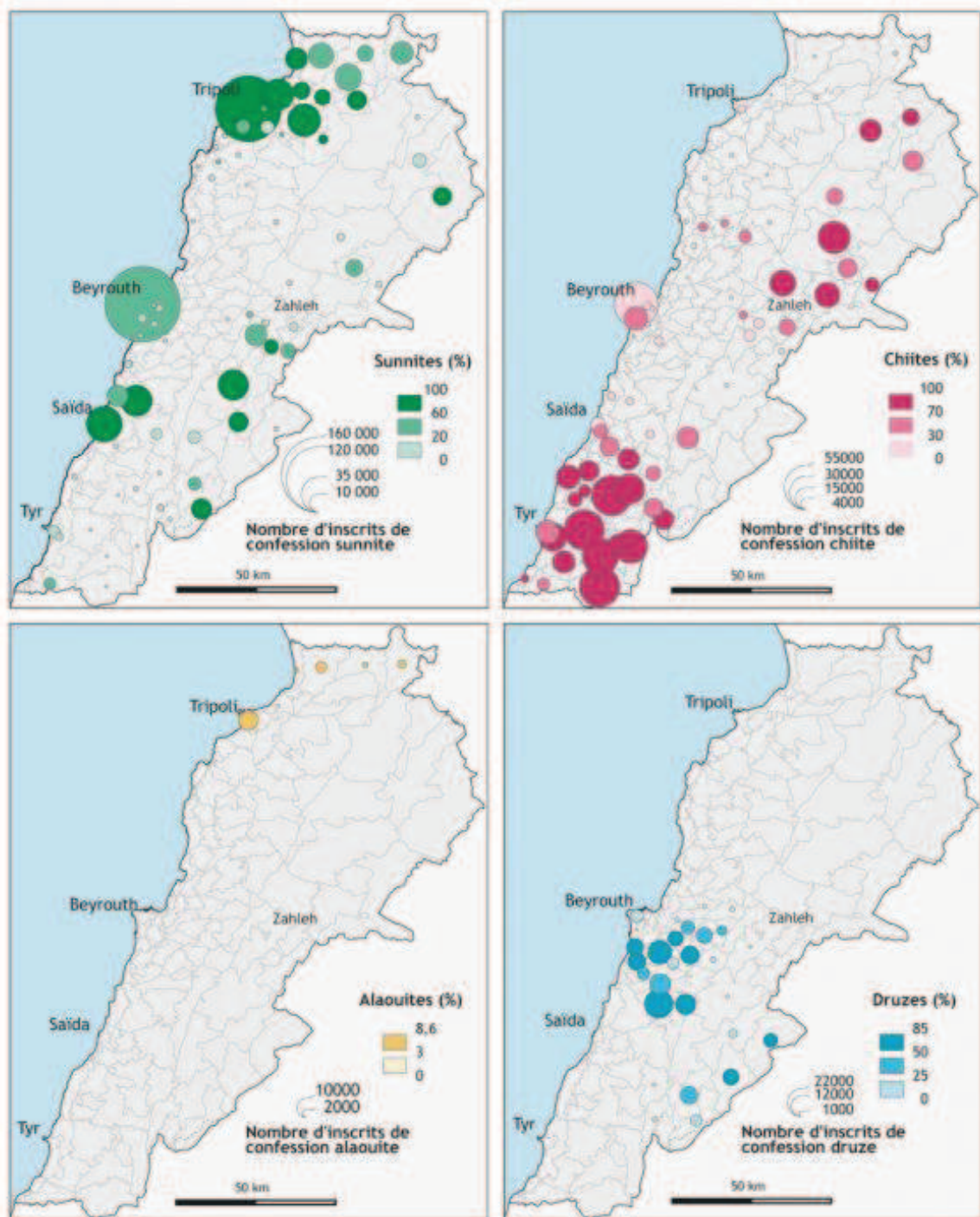


Figure 23: La répartition des confessions musulmanes
(Source: Atlas du Liban, 2007)

Afin d'approfondir notre analyse et de bien comprendre le contexte communautaire au niveau de notre zone d'étude, nous nous sommes référés aux travaux de Khoury *et al.* (1975), (Localiban, 2015). Selon Khoury *et al.*, le caza de Zahlé est une mosaïque de la société libanaise. On y trouve presque toutes les confessions reconnues officiellement au Liban. De ce fait, il s'apparente

beaucoup plus à la région côtière du pays, qui a connu, comme la plaine de la Béqaa, un brassage de peuples et de confessions, qu'à la montagne libanaise. Ces deux confessions appartiennent aux deux religions : musulmane et chrétienne.

Les confessions musulmanes

La première est celle des sunnites : ceux-ci semblent se concentrer plus au centre et au sud du caza. Ils vivent principalement de l'agriculture. Un nombre de plus en plus croissant parmi eux se livrent aux travaux de commerce et de services grâce à l'expansion du mouvement transitaire et touristique entre le Liban et les pays arabes voisins, par exemple : Chtoura, Barr Elias, Majdel Anjar.

La seconde est celle des chiïtes : ils vivent principalement au nord et au nord-ouest du caza. Avec une communauté qui s'est installée dans un quartier périphérique de la ville de Zahlé (Maalaka et Karak Nouh). De même, les chiïtes pratiquent surtout l'agriculture. Il est à noter qu'une petite minorité des chiïtes travaille dans le secteur tertiaire.

La troisième est celle des druzes, qui sont peu nombreux dans le caza. Ils y occupent une petite localité : le village de Mreijet. Chez eux, le secteur agricole est très peu traité, la plupart travaillent soit dans la fonction publique, soit dans le secteur privé dans la capitale.

Les communautés chrétiennes

Il existe trois grandes communautés chrétiennes dans le caza de Zahlé.

La **première** est constituée des grecs-catholiques. Ils se trouvent un peu partout. Ils sont localisés principalement dans la ville de Zahlé et le village voisin de Forzol. Généralement, ils pratiquent plusieurs activités, allant de l'agriculture, au commerce et aux services. Historiquement, c'est la confession la plus enracinée dans le travail politique au niveau de la région, et elle continue à tenir en main le leadership des élections législatives dans le caza de Zahlé. C'est aussi la confession la plus riche économiquement, soit par ses activités commerciales, soit par ses possessions foncières et agricoles.

La **deuxième** est composée par les maronites. Ils se répartissent un peu partout également. Ils se localisent spécialement dans la ville de Zahlé et un peu plus au nord. Économiquement, ils vivent surtout de l'agriculture.

La **troisième** est constituée des grecs-orthodoxes. Ils sont répartis surtout à l'est du caza de Zahlé. Leurs principales activités sont l'agriculture et le commerce.

Il est à noter qu'à côté de ces trois grandes communautés chrétiennes, il existe d'autres minorités confessionnelles chrétiennes comme les arméniens, qui vivent surtout à Anjar et à Zahlé dont le domaine principal d'activités est le secteur tertiaire. Les syriaques, les chaldéens et les assyriens, qui vivent à Zahlé et dont l'agriculture est la principale activité. Enfin, les protestants évangéliques qui vivent aussi à Zahlé et à Qabb Elias.

Il est remarquable que les grandes localités du caza sont multiconfessionnelles comme Zahlé, Qabb El Elias, Rayak, Taalabaya et Chtaura. Malgré cela, on retrouve aussi des localités mono-confessionnelles comme Forzol qui est seulement grecque-catholique, Anjar, arménienne, Majdel Anjar, sunnite et Nabi Ayla qui est chiite.

2.3. Les partis politiques

La représentation politique au Liban repose sur un système complexe destiné à garantir la représentation des groupes minoritaires. Depuis l'accord de Taëf, le parlement se compose d'un nombre égal de députés chrétiens et de députés musulmans. Il s'agit principalement de factions et de tendances tellement nombreuses que nous retrouvons ici la même mosaïque politique déjà signalée au niveau des confessions religieuses. En effet, toutes les idéologies politiques coexistent et traduisent une idéologie qui, de certains côtés, se superposent à l'idéologie confessionnelle. Sur la base d'une clé de répartitions confessionnelles en fonction du poids des principales confessions des électeurs inscrits dans le caza (figure 24). Dans le caza de Zahlé, la capitale chrétienne de la Béqaa – qui offre sept sièges répartis sur toutes les communautés comme suit : deux grecs-catholiques, un grec-orthodoxe, un maronite, un sunnite, un chiite et un arménien-orthodoxe (figure 25).

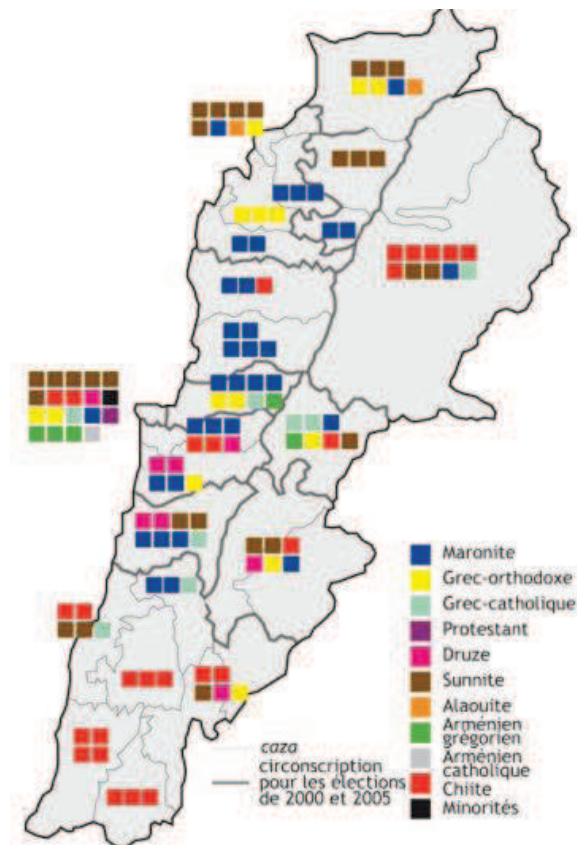


Figure 24: La répartition confessionnelle des sièges de députés au niveau du territoire libanais (Source: Atlas du Liban, 2007)

Les partis politiques dans la zone d'étude sont le socle d'une stabilité politique remarquable. Des alliances nommées à l'occasion des élections législatives, dont les dernières tenues en mai 2018, permettent d'assurer le pacte politique entre les points majoritaires dans la région (hezbollah et aoun).

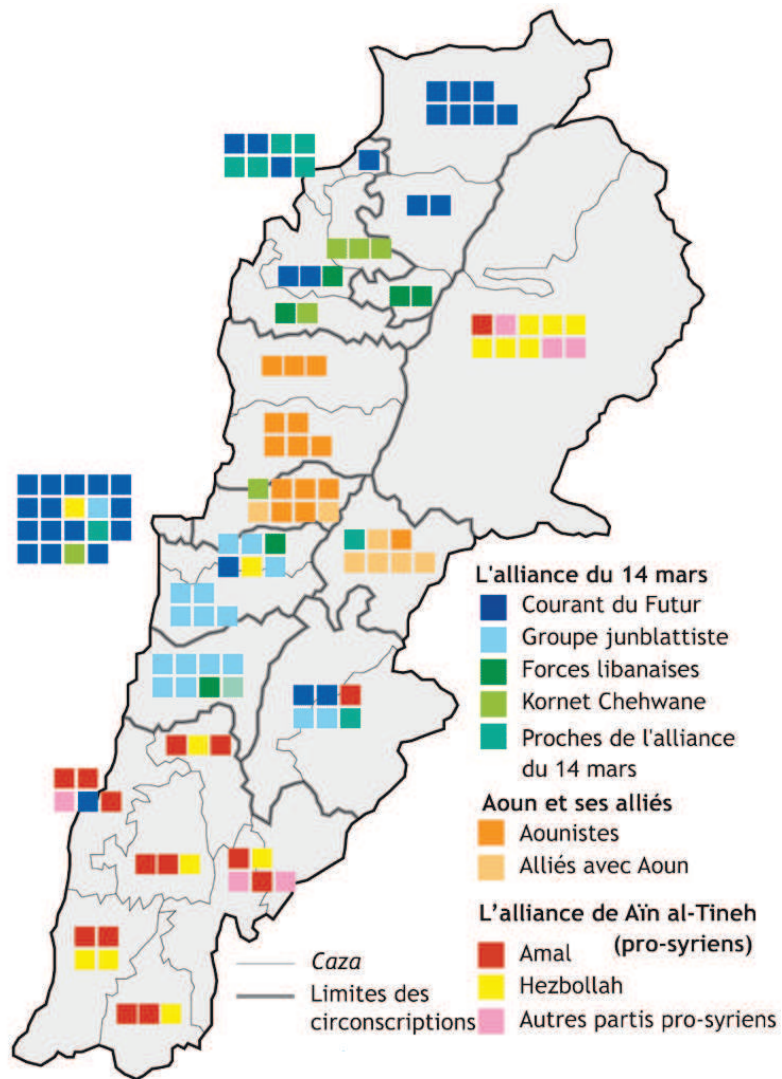


Figure 25: Les résultats des élections législatives de 2005 (source: Atlas du Liban, 2007).

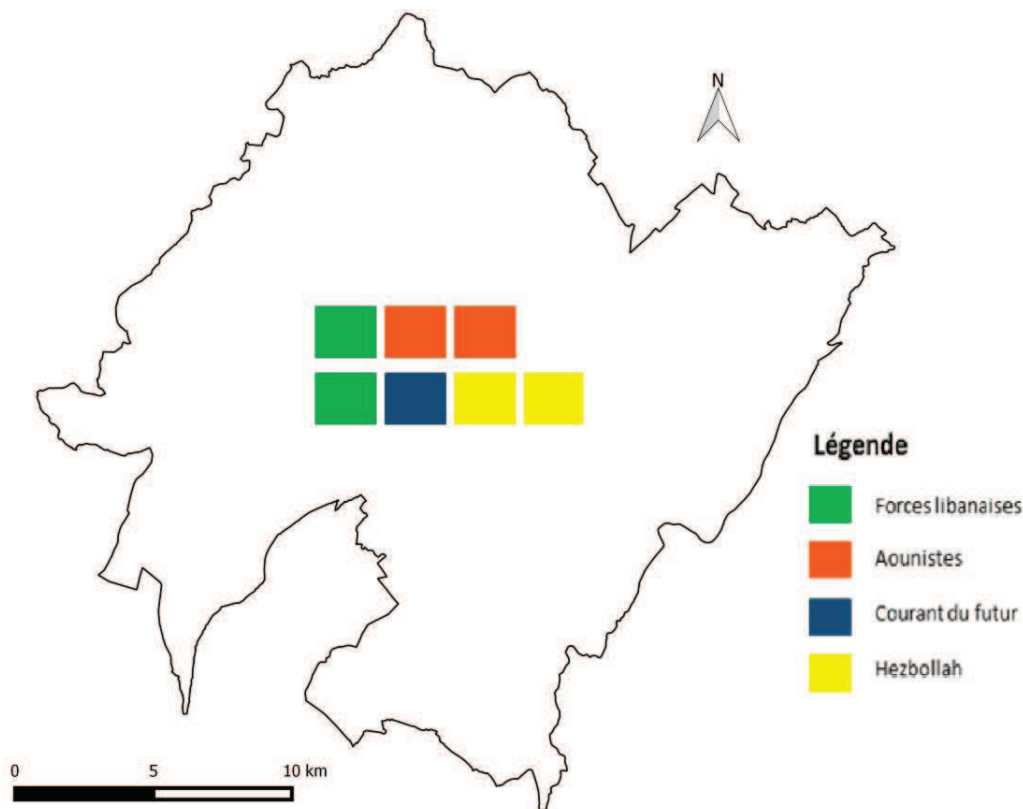


Figure 26: Les résultats des élections législatives de 2018 (source: réalisation personnelle d'après données des élections du mai 2018).

2.4. Les activités économiques et les infrastructures collectives

Le caza de Zahlé est relié à Beyrouth par une route principale qui passe à travers le Mont Liban par le col de Dahr-el-Baidar et se divise à Chtaura en deux branches essentielles : la première s'oriente, au nord, vers la ville de Homs (en Syrie) après avoir traversé la plaine de la Béqaa, en passant par la ville de Baalbeck, la seconde s'oriente vers le sud-est et atteint Damas à travers un passage naturel de l'Anti- Liban (Wadi-el-Harir).

A ces routes internationales sont reliées plusieurs routes secondaires dont les principales sont une route qui va de Chtaura vers le sud, passe par tous les villages du versant Est du Mont-Liban pour atteindre le mohafazat du Liban-Sud. Une route passe au milieu de la plaine et relie Zahlé à tous les villages de la Béqaa-Ouest. Une route se dirige à l'ouest, vers le Mont-Liban, puis vers Beyrouth. A ce réseau s'ajoute un ensemble de routes étroites et agricoles qui relient toutes les petites agglomérations du caza aux routes et villes principales, et en particulier Zahlé.

Il est à noter que les villages du caza de Zahlé ne sont pas trop éloignés des centres d'agglomérations humaines : 11-15 kilomètres. Cette distance peut être facilement parcourue, car les accès et les voies de communication sont en grande partie situés dans des régions de plaine.

L'économie du caza de Zahlé est importante surtout grâce à sa localisation géographique par rapport à la Béqaa. La Béqaa est aujourd'hui un espace en développement économique, visible

dans le paysage par de multiples constructions qui mitent la plaine et viennent se fixer principalement le long des axes routiers internationaux. La Béqaa est aussi un espace marqué par la reprise d'une activité agro-industrielle depuis la fin de la guerre civile au Liban. La production agricole de la Béqaa est essentiellement écoulee vers l'Egypte et les pays du Golfe. Or, les liens commerciaux entre les différents partenaires sont soumis aux aléas des fermetures de frontière dues aux tensions régionales, ce qui rend le développement économique de la région relativement fragile et instable. L'état des relations syro-libanaises a des conséquences sur la santé économique de la Béqaa.

La Béqaa est la principale région agricole au Liban où elle comprend 42.7% des terres cultivées et 40% des terres irriguées. Cette région est située autour d'un axe de communication reliant le Liban et les pays du Proche Orient.

Les superficies cultivées dans le caza de Zahlé étaient en 1969 de 24 300 hectares dont 8 950 hectares irrigués (36.8%). Ces superficies représentaient 14.5% des terres cultivées dans la Béqaa. En 1998, les superficies cultivées ont diminué de 21% pour atteindre 20 751.9³⁸ hectares. En 2010, elles ont atteint 20 844³⁹ hectares.

En outre, on distingue deux types d'entreprises industrielles dans le caza de Zahlé :

- Les entreprises modernes, de taille moyenne et grande, sont généralement localisées non loin de l'axe routier Beyrouth - Damas à titre d'exemple le montage des machines (ELBA), les conserves alimentaires, l'extraction de sucre à Anjar, les domaines viticoles telle que Ksara, deux industries de plastiques pour la production de caisse en plastiques pour fruits et légumes, production de cartons pour fruits et légumes (Mimosa localisé à Qaa El Rim), concentration forte d'industrie de production laitière (plus que vingtaine de petite, moyenne et grande industrie), concentration d'un centre frigorifique de stockage, de conditionnement et d'emballage des produits agricoles (medi-gardens à Forzol, Riachi à Ablah...), concentration d'une entreprise de jus de fruit à Chtaura (Kasatli chtaura) et une industrie de transformation de pomme de terre industrielle à Forzol (Master chips)
- Les petites entreprises et l'artisanat se concentrent principalement dans la ville de Zahlé et sur l'axe routier Beyrouth – Damas, à titre d'exemple, les entreprises pour la transformation de pomme de terre (frites surgelées...). Leur production est destinée au marché local et national.

Il est à noter aussi qu'au niveau du territoire d'étude, il y a la présence de deux marchés en gros de fruits et de légumes, à Forzole et à Qab Elias. Zahlé est le centre d'un ensemble d'activités tertiaires qui touchent à l'ensemble de la Békaa. En effet, ce sont les négociants ou les intermédiaires de Zahlé qui achètent la plus grande partie de la production agricole de la Békaa et qui fournissent aux cultivateurs de la Békaa les produits intermédiaires et services (engrais,

³⁸ Recensement général agricole, Ministère de l'agriculture, 1998.

³⁹ Recensement général agricole, Ministère de l'agriculture, 2010.

semences, produits phytosanitaires, engrais chimiques, sacs d'emballage, transport, etc.) nécessaires à leurs cultures.

Parallèlement à ces activités liées à l'agriculture, le secteur commercial de Zahlé fournit à la Békaa une bonne partie des produits manufacturés qui y sont vendus. Viennent s'ajouter des activités touristiques (hôtels, cafés et restaurants du Wadi Arayech et du Berdawni), administratives (dues à la présence des administrations régionales à Zahlé), éducatives (écoles secondaires et normales) et sanitaires (hôpital: un public et sept privés). La ville de Chtaura est un centre de services dont l'activité provient de sa situation sur les deux axes Beyrouth - Damas et Chtaura - Baalbeck - Homs.

D'après tous ce qui précède nous remarquons une diversité d'entreprise agricole, agroalimentaire et des fournisseurs de matières premières. Une grande partie de ces entreprises sont installés après 2000. Ceci montre bien l'importance de l'intensification de l'agriculture dans cette région afin de satisfaire d'une part les consommateurs et de l'autre part les entreprises cités ci-dessus.

3. Caractéristique agronomiques et impacts environnementaux

Notre région d'étude est une région agricole par excellence. D'après les données collectées du RGA du 2010, notre zone d'étude est caractérisée par une diversification des systèmes de productions. Elle rassemble 4 575 exploitations agricoles c'est-à-dire 4 575 exploitants avec une SAU de 20 844 ha dont 2.3% des terres en jachères. Ces 4 575 exploitants sont des exploitants hétérogènes dont 4 015 possèdent des surfaces agricoles et 307 d'entre eux pratiquent la production animale hors sol; le reste, 560 exploitants, ne possède pas de surface agricole mais uniquement de la production animale.

3.1. L'occupation du sol et la production agricole au niveau du territoire du caza de Zahlé

En ce qui concerne la répartition des cultures au niveau de notre zone d'étude, 68% des cultures sont saisonnières tandis que 32% sont des cultures permanentes. En terme d'occupation du sol, notre zone d'étude est caractérisée par la prééminence des cultures maraîchères (42%), suivie par les céréales (25%), les arbres fruitiers (15%), les vignes (8%), les autres cultures annuelles (à titre d'exemple: les légumineuses) (6%) et enfin les cultures fourragères (4%).

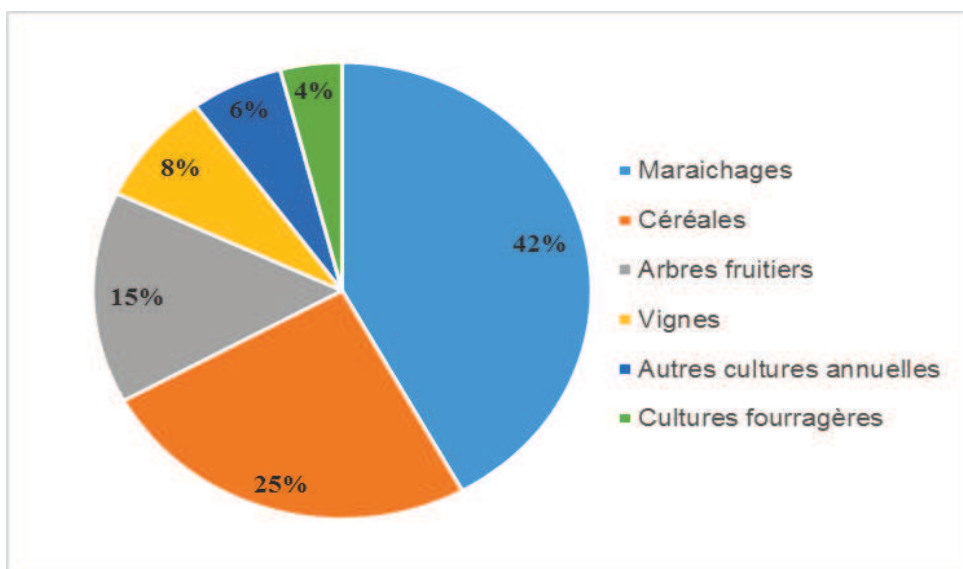


Figure 27: Répartition de l'occupation du sol dans notre zone d'étude (source: calculs d'après le RGA, 2010).

3.2. Les consommations de produits phytosanitaires au niveau du territoire libanais et du territoire du caza de Zahlé

En fait, l'organisation de l'utilisation des pesticides au Liban a commencé en 1982, quand le gouvernement a publié un décret concernant la création d'un comité scientifique pour ces produits. Ce comité avait pour rôle de définir et d'étudier l'utilisation des pesticides au niveau du territoire libanais et de fixer les conditions d'autorisation pour les importations, la vente, la préparation, l'étiquetage et l'utilisation des produits phytosanitaires (Gouvernement libanais, 1982).

Le marché des produits phytosanitaires au Liban est un marché diversifié et attractif. Comme preuve, toutes les entreprises multinationales les plus connues dans le domaine de l'agrobusiness sont présentes dans le pays, à travers des compagnies libanaises qui distribuent leurs produits à travers leurs filiales. C'est un marché exclusivement privé qui a un chiffre d'affaire de 43.105 millions de dollars soit 0.14% du marché mondial (Source: Trade map, Statistiques du commerce pour le développement international des entreprises, 2017).

Au niveau du territoire libanais, la plupart des produits phytosanitaires sont importés et prêts à l'emploi et la quantité minoritaire est formulée à base de pré-mix ou de concentré. Par contre, environ 20 à 25% de ce qui est importé est reconditionné en petits emballages adaptés pour satisfaire les besoins des petits agriculteurs (Trade map, 2017).

La consommation des produits phytosanitaires varie d'une année à l'autre. Ces variations peuvent être dues :

- aux aléas climatiques,
- A la pression des maladies et des insectes ravageurs,

- Mais aussi en fonction des régions, des pratiques agricoles et des spéculations. Selon les calculs CCI⁴⁰ sur la base des statistiques du ministère d'économie et du commerce (République libanaise, depuis Janvier 2015), les importations des produits phytosanitaires au Liban n'ont pas cessé de varier depuis 2007. La figure ci-dessous montre les statistiques des importations (Figure 28).

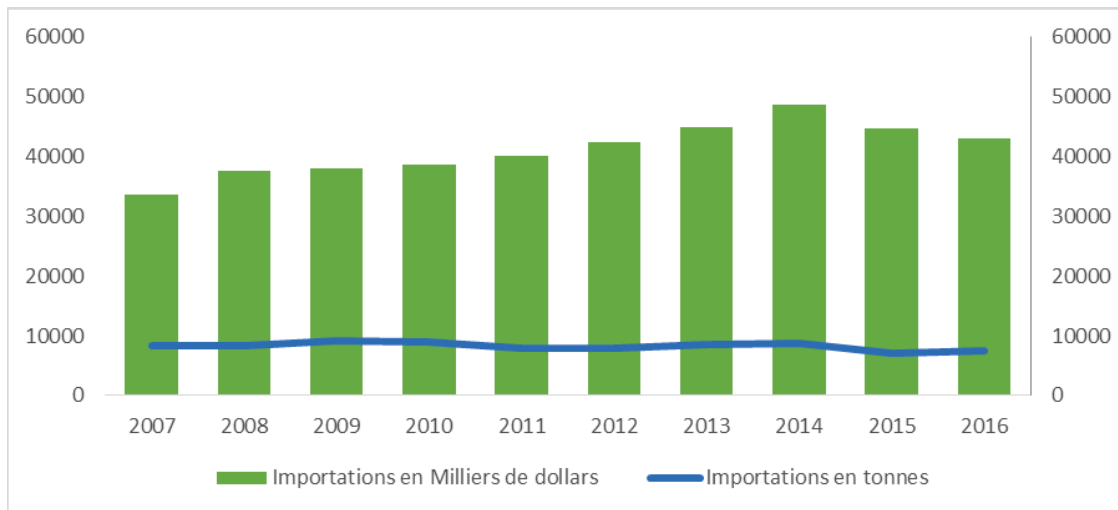


Figure 28: Statistiques des importations des produits phytosanitaires au Liban en quantité et en valeur (Source: Ministère d'économie et de commerce, 2015)

Comme nous pouvons le constater, la croissance des importations en valeur entre 2007 et 2016 montre des fluctuations importantes. Cependant, le taux de croissance des importations des produits phytosanitaires a chuté de 10 points entre 2007-2008 et 2008-2009. Les analyses des entretiens réalisés auprès des responsables du ministère de l'agriculture libanais montrent que ce dernier a validé l'entrée des PP de la Chine. Et étant donné que les PP d'origine chinoise sont beaucoup moins chers que leurs homologues européens et américains, ceci explique cette diminution en valeur mais aussi montre l'augmentation en quantité telle qu'elle est représentée dans la figure 29.

Les années suivantes le taux de croissance a augmenté pour atteindre les 8% en valeur puis en quantité en 2013-2014. A partir de 2014-2015, les importations en valeur et en quantité ont diminué brutalement et, toujours d'après nos entretiens, ceci est dû au fait que le désordre qui régnait en Syrie a favorisé le trafic illégal des PP en provenance de la Turquie et d'autres pays vers la Syrie puis le Liban. Quant à l'année 2015-2016, les diminutions des importations en valeur ont résulté du fait de l'interdiction de l'importation de 45 produits phytosanitaires. Cette décision a été prise conjointement par les deux ministres de l'agriculture et de la santé publique.

⁴⁰ Chambre de Commerce et d'Industrie

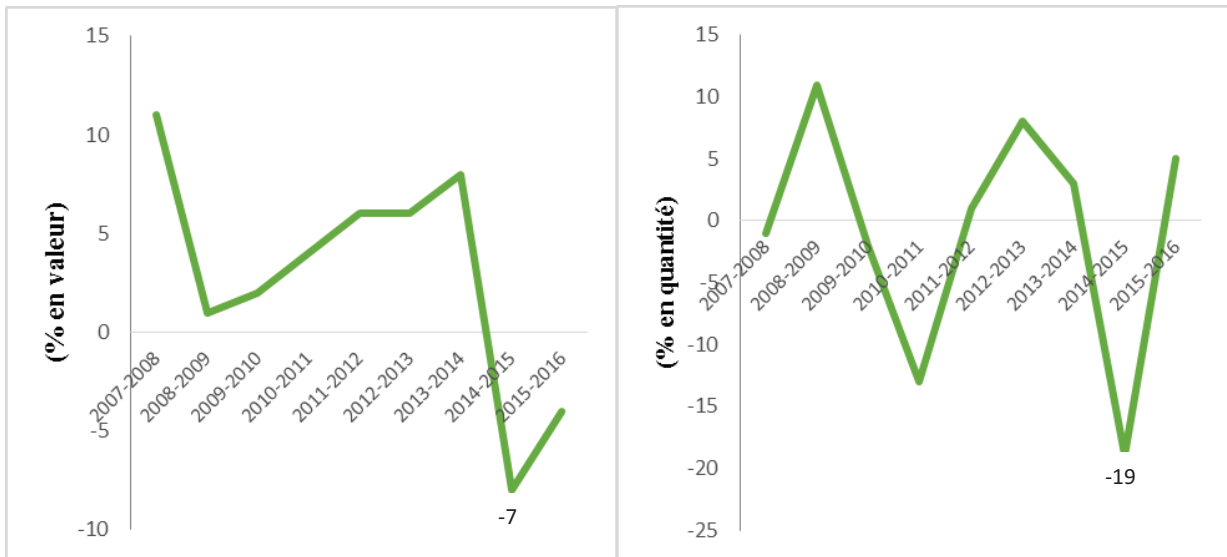


Figure 29: Taux de croissance des importations des produits phytosanitaires en valeur et en quantité (Source: Ministère d'économie et de commerce, 2016)

En partant des informations collectées par le Ministère de l'Agriculture et des chiffres provenant des douanes libanaises, toutes les catégories des produits phytosanitaires sont utilisées au niveau du territoire libanais: les insecticides occupent la part du lion avec un pourcentage de 42% des produits, suivis par les fongicides avec 35%, ensuite viennent les herbicides avec 16% (figure 30).

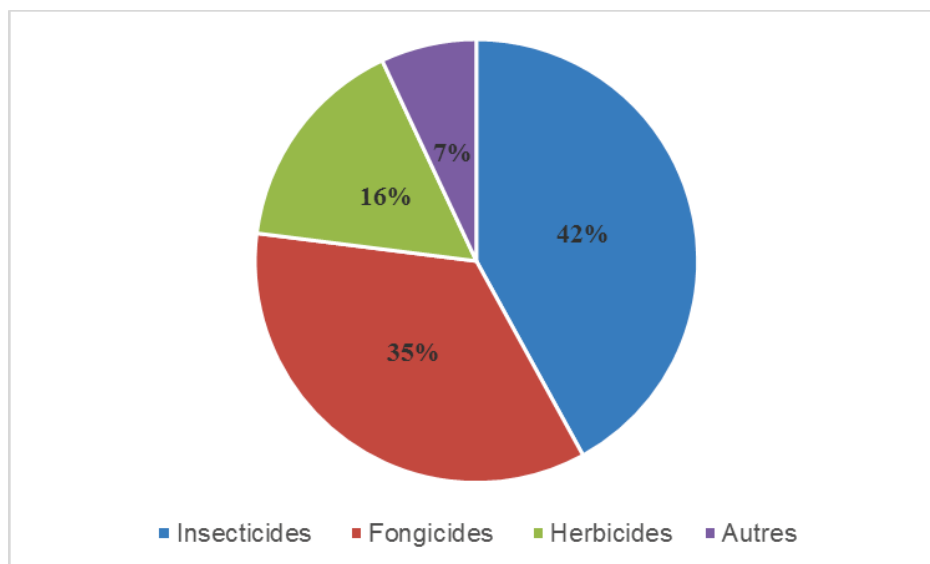


Figure 30: Répartition des produits phytosanitaires par catégorie (Source : MOA et Customs, www.customs.gov.lb, 2016).

Les entreprises des produits phytosanitaires au Liban

Actuellement, au Liban, on compte 534 entreprises de produits phytosanitaires. D'après le département de protection au sein du ministère de l'agriculture libanais, 462 de ces entreprises sont certifiées et 72 sont en cours de certification et sont distribuées par Mohafaza⁴¹. Le tableau 16 ci-dessous montre la distribution des entreprises par Mohafaza.

Tableau 16: Distribution du nombre d'entreprises des produits phytosanitaires certifiées et en cours de certification par Mohafaza (Source : MOA, département de protection, 2016).

| Mohafazas | Entreprise de vente et d'importation certifiée | Entreprise de vente et d'importation en cours de certification |
|-----------------|--|--|
| Béqaa | 57 | 15 |
| Baalbeck Hermel | 31 | 8 |
| Sud | 70 | 5 |
| Nord | 94 | 21 |
| Nabatye | 78 | 6 |
| Beyrouth | 3 | 0 |
| Mont Liban | 129 | 17 |
| Total | 462 | 72 |

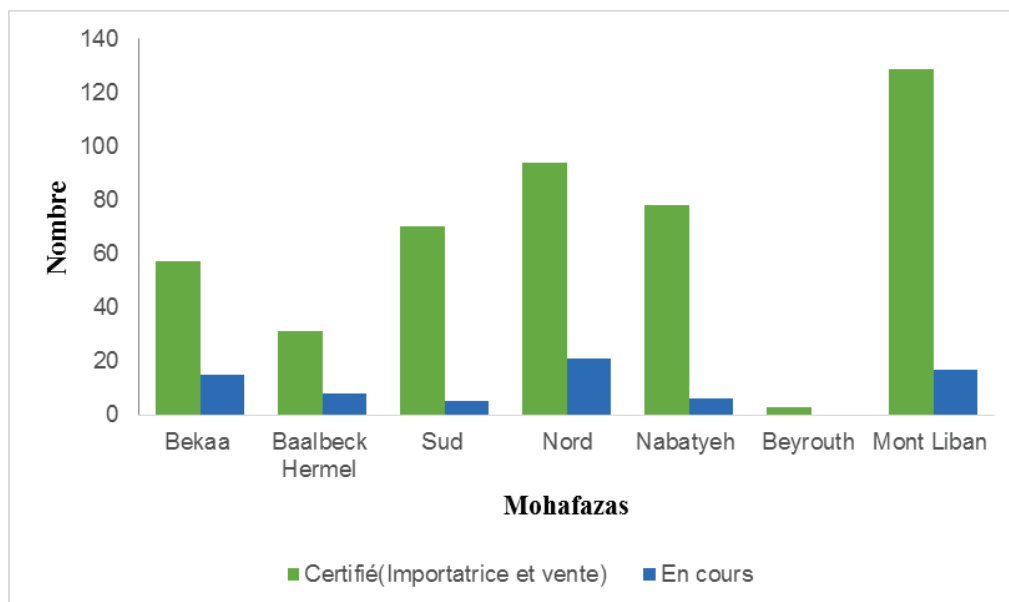


Figure 31: Répartition du nombre d'entreprises des produits phytosanitaires par Mohafaza (Source : MOA, département de protection, 2016)

⁴¹ Mohafaza est équivalent à un département en France.

Parmi les 462 entreprises phytosanitaires certifiées, 138 entreprises sont des entreprises importatrices de produits phytosanitaires qui représentent 30% environ du total (département de protection, MOA, 2016). Ces spécialités commerciales sont réparties au niveau du marché libanais en fonction du type de produits phytosanitaires importés comme suit (figure 32).

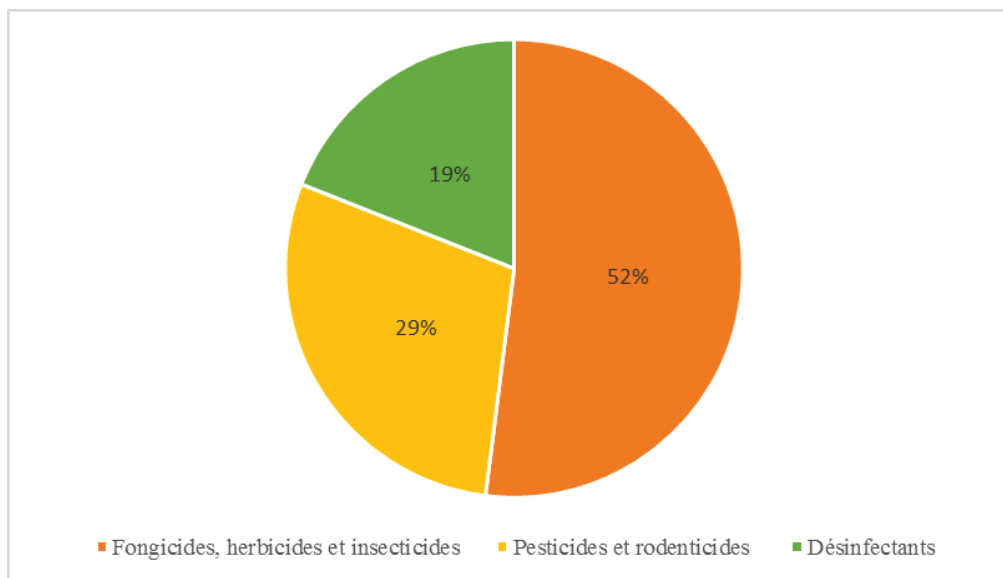


Figure 32: Répartition des entreprises importatrices en fonction du type des produits phytosanitaires importés (Source : Calculs du CCI sur la base des statistiques du ministère de l'économie et de commerce, république libanaise, 2016).

Nous remarquons que les entreprises importatrices des produits phytosanitaires (fongicides, herbicides et insecticides) sont les plus nombreuses et représentent 52% du total des entreprises des produits phytosanitaires.

D'après ce qui précède et pour une étude plus fine, il est très difficile de déterminer l'origine exacte de l'ensemble des produits phytosanitaires utilisés au niveau du territoire de caza de Zahlé pour deux raisons : d'une part ils sont d'origines multiples (importés de plusieurs pays) et d'autre part il y a des produits qui ne sont pas déclarés à leur arrivée dans le pays et donc on ne connaît pas précisément le contenu de ces produits phytosanitaires. Etant donné que les cultures maraîchères, les céréales et les arbres fruitiers sont largement présents dans notre zone d'étude, elles sont fortement consommatrices de PP. Les pratiques agricoles jouent un rôle très important dans le devenir des pesticides dans l'environnement. Généralement au Liban et spécifiquement au niveau de notre zone d'étude, la majorité des aménagements des terrains agricoles sont effectués par l'agriculteur lui-même.

Une enquête réalisée en 2014 par Moussa-Haidar C. qui portait sur «l'évaluation de la qualité de l'eau du Bassin Supérieur de la rivière du Litani, Liban: approche hydrogéochimique», a montré que différentes formes et genres de pesticides ont été utilisés tout le long de la partie

supérieure, parmi eux: sulfate d'ammonium, nitrate d'ammonium et pesticides composés. De plus, différentes matières actives utilisées au niveau de cette région figurent dans le tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17: Les matières actives les plus utilisées dans la région du bassin supérieur du Litani (Source : Moussa-Haidar, 2014)

| Herbicides | Acaricides | Insecticides | Fongicides | Nematicides | Engrais chimiques |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Glyphosate (41% SL) | Abamectine (1.8% EC) | Methomyl (90% SP) | Triadimenol | Carbofuren | Potassium sulfate |
| Paraquat dichloride (27.6% EC) | Bromopropylate (50% EC) | Methomyl (20% SL) | Hexaconazole (5% SC) | Oxamyl (24% SL) | 42-00 liquid |
| Trifularin (48% EC) | Fenbutamin oxide | Dimethoate (40% EC) | Carbendzim (50% WP) | Oxamyl (24% 1 litre) | Potassium nitrate |
| Metribuzin (70% Wp) | Pyridaben (20% WP) | Cypermethrine (25% EC) | Cymoxanil +Mancozeb (8%+64% WP) | | |

Notre territoire se caractérise par un nombre assez important d'entreprises phytosanitaires comparé à d'autres terriottes ayant les mêmes caractéristiques. Il existe 54 entreprises phytosanitaires distribuées sur le tout le caza dont 44 sont certifiées et 10 en cours de certification. La distribution spatiale des points de vente au niveau de notre zone d'étude figure dans la carte 8 ci après.

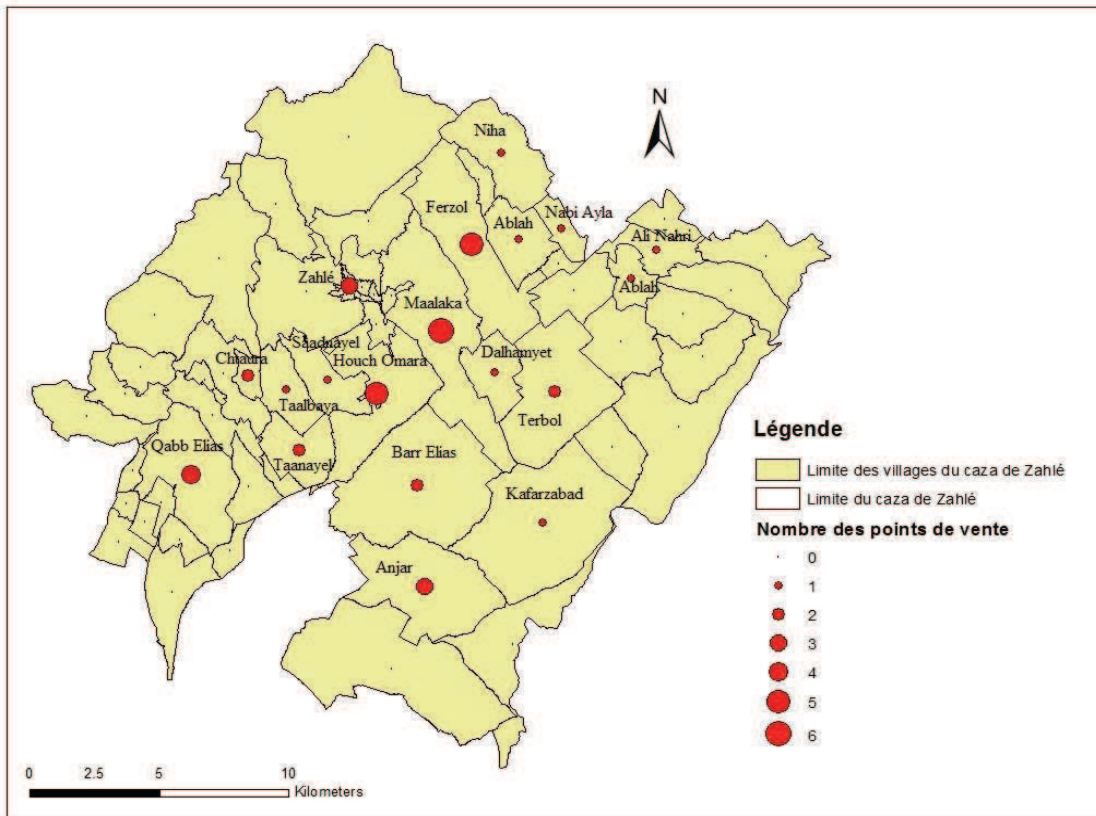


Figure 33: Distribution spatiale des points de vente des produits phytosanitaires (Source: F. Kanj 2016-2017).

3.3. Contamination des eaux souterraines par les pesticides

Au Liban, des milliers de tonnes d’engrais et de pesticides sont utilisés annuellement par les agriculteurs. A côté de ces derniers, certaines institutions publiques et les collectivités locales (municipalités) utilisent aussi les engrais chimiques et les produits phytosanitaires pour des entretiens des espaces verts. Un certain nombre de ces pesticides et de ces engrais sont à l’origine de la contamination des eaux souterraines. Ceci est dû aux utilisations massives et successives de ces derniers, comme il a été souligné dans la partie I. Il est à noter que certains résidus de pesticides restent dans le sol et dans l’eau pour des périodes allant de plusieurs mois à plusieurs années.

Entre 1985 et 1992, une enquête nationale sur les pesticides a été menée par le bureau des pesticides et des substances toxiques de l’EPA et des établissements de l’eau afin d’identifier le nombre des puits d’eau potable qui contiennent des pesticides et des nitrates d’une part, et d’analyser la concentration de ces substances d’autre part.

L’enquête, qui comprenait des échantillons provenant de plus de 1300 services publics de l’approvisionnement en eau domestique rurale, a révélé qu’environ 3.6% des puits contenaient des concentrations de nitrates supérieures au niveau fédéral de confinement, tandis que plus de la

moitié des puits contenait des nitrates supérieurs au minimum requis « limite de déclaration pour les nitrates (0.15 mg/L) » (EPA, 1991).

Les enquêtes ont également révélées qu'environ 0.8% des puits testés contenaient des pesticides à un niveau supérieur au niveau maximal des contaminants fédéraux ou aux niveaux des consultations sanitaires. Seulement 10% des puits classés comme ruraux étaient en fait situés dans les fermes. Après une analyse approfondie, l'EPA a estimé que, pour les puits qui contiennent des pesticides, un pourcentage significatif contient probablement des concentrations chimiques qui dépassent les limites fédérales autorisé pour la santé. Environ 14.6% des puits testés contenaient des niveaux d'un ou plusieurs pesticides au-dessus de la limite minimale de déclaration fixée dans l'enquête (EPA, 1991).

Au niveau de notre zone d'étude et en se référant aux informations collectées du CNRS libanais, il existe de nombreux puits distribués sur tout le territoire de notre zone d'étude comme le montre la figure 34 ci-dessous.

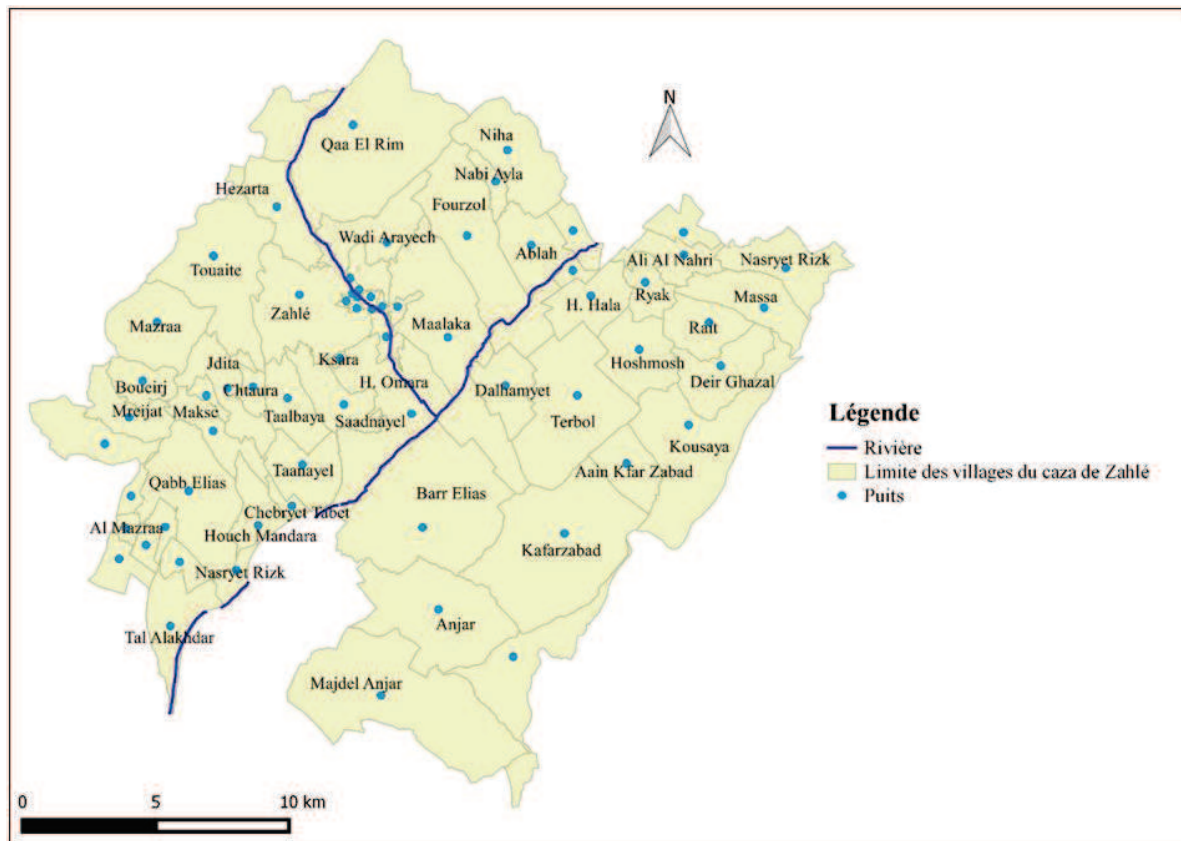


Figure 34: Distribution des puits au niveau de notre zone d'étude - caza de Zahré (Source: F. Kanj 2016-2017).

Conclusion du chapitre 4

Pour justifier le choix de notre territoire, il est indispensable de remonter à l'époque des Romains, où ces derniers avaient considéré la plaine de la Beqaa comme le « grenier de Rome » (Blanc, 2007). Dans un rapport publié par le Plan Bleu en 2000 (Plan Bleu, 2000) « la plaine allongée de la Béqaa, avec une altitude moyenne de 900 m, autrefois appelée “les greniers à blé de l'Empire Romain”, sépare les deux chaînes de montagnes ».

Donc historiquement, la plaine de la Béqaa est réputée pour sa vocation agricole. Cette plaine qui représente à peu près 42% du territoire libanais (4 429km²) est divisée en trois grandes régions : la partie nord qui est en grande partie une zone semi-aride où la monoculture est fortement pratiquée, puis la partie centre qui est une zone méditerranéenne par excellence avec une agriculture intensive et enfin la partie ouest qui est aussi une région méditerranéenne mais avec une agriculture se basant sur des systèmes de rotation biennale.

La Béqaa centrale a été choisie comme zone d'étude après avoir analysé les trois zones citées ci-dessus. En effet, étant donné que notre recherche porte sur la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole et pour que l'analyse soit pertinente, la diversification des cultures et l'intensification sont les facteurs déterminants du choix de la zone de la Béqaa Centrale.

Vu les caractéristiques agricoles des trois zones, nous avons trouvé que la diversification et l'intensification de l'agriculture sont les facteurs les plus importants de notre recherche. Dans cette zone sont pratiquées d'une part les cultures céréalières en tête d'assolement à grande échelle, suivies par la pomme de terre et les cultures maraîchères, et d'autre part les vignobles et l'arboriculture fruitière.

La concentration forte des cultures citées mène obligatoirement à la question des pratiques agricoles mises en œuvre par les agriculteurs de la région et surtout à la manière dont sont utilisés les fertilisants et les produits phytosanitaires.

Ce choix sera argumenté avec les résultats de nos enquêtes dans le chapitre 7, partie III.

CHAPITRE V

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE ADOPTÉE

Après avoir déterminé les caractéristiques et les enjeux de notre zone d'étude, nous nous intéressons dans ce chapitre aux pratiques agricoles utilisées par les agriculteurs et spécifiquement les pratiques phytosanitaires qui constituent un des principaux facteurs favorisant l'augmentation de la pollution diffuse d'origine agricole. Comme notre zone d'étude est confrontée à des problèmes d'utilisation anarchique et non contrôlée des intrants agricoles et d'intensification de cultures, ces pratiques accélèrent et amplifient les dégradations des ressources naturelles et spécifiquement les sols et les eaux. Cette dégradation est la conséquence principale de la pollution diffuse d'origine agricole induisant des problèmes de gestion : i) des eaux destinées à la consommation et à l'irrigation, ii) de la qualité des produits agricoles et iii) des écosystèmes.

Cette dégradation croissante nous a conduit à approfondir nos recherches sur ce thème pour analyser la situation actuelle, et aussi pour identifier les résultats et les conséquences de cette dégradation afin d'élaborer une politique de gestion de la pollution diffuse sur ce territoire, en utilisant une démarche de modélisation pour évaluer le risque de transfert des pesticides au niveau spatial.

1. Méthode de travail

La base de données a été établie à partir d'une recherche bibliographique sur les activités agricoles qui caractérisent notre zone d'étude, des études déjà faites sur la zone du caza de Zahlé (Houry *et al.*, 1975), des entretiens auprès des experts et des acteurs locaux (ingénieurs agronomes, conseillers agricoles, chef du centre agricole...) et enfin des enquêtes directes auprès des agriculteurs (**Figure 34**).

Pour traiter les données, les exploitations agricoles ont été classées selon une typologie structurelle en fonction du système de production stratifié et de la distribution spatiale.. Après avoir sélectionné les exploitations, nous avons identifié les zones où la pression phytosanitaire est élevée en calculant l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) par culture, par hectare et à l'échelle territoriale.

Ensuite les cultures les plus consommatrices des PP ont été identifiées, en se basant sur les calculs des quartiles des IFT par ha et par territoire, ainsi que les PP les plus utilisées pour faire ressortir les matières actives (MA) les plus utilisées par les cultures les plus consommatrices des PP au niveau de notre territoire.

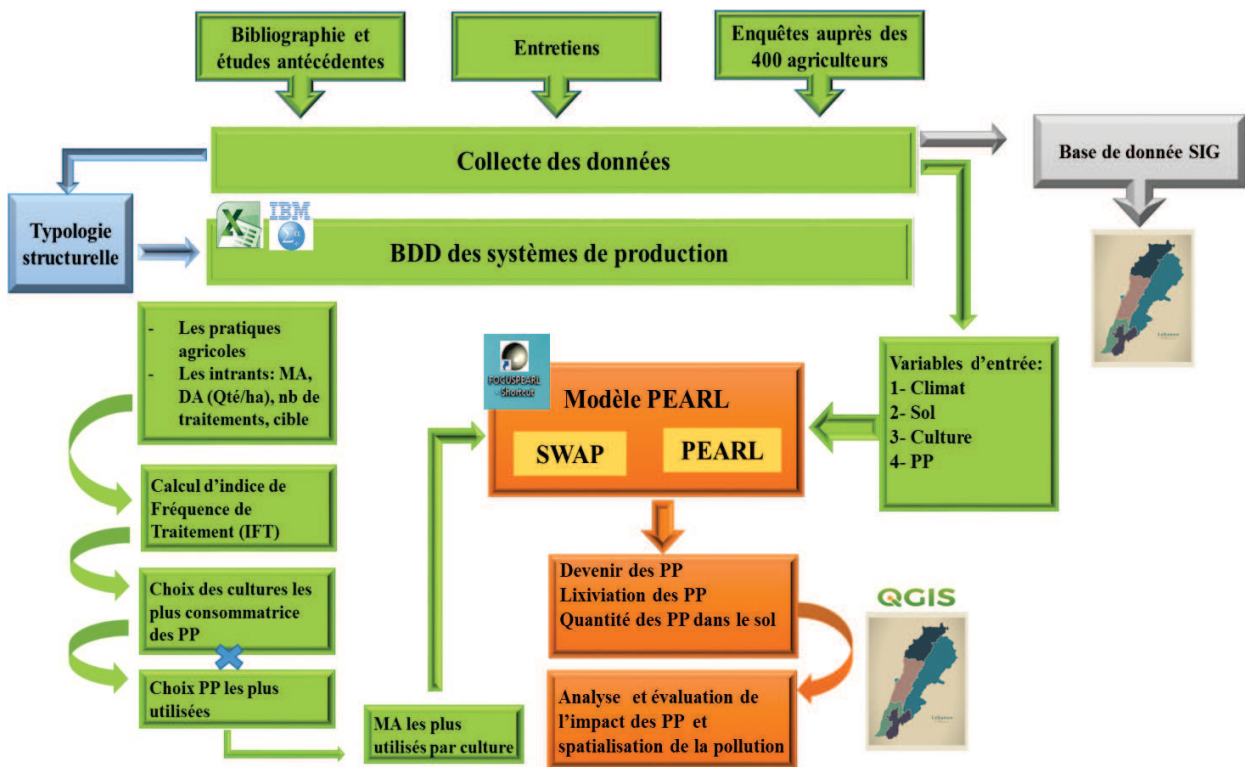


Figure 35: Schéma conceptuel de la méthodologie (Réalisation: Kanj, 2016).

Une fois les MA identifiées, nous avons procédé à la collecte de données concernant les cultures les plus consommatrices des PP et les MA les plus utilisées pour alimenter le modèle PEARL afin de connaître les impacts de ces PP tout en prenant en considération les facteurs physiques et spatiaux du territoire sur les composantes de l'environnement et spécifiquement sur la pollution des eaux souterraines.

Ces résultats seront spatialisés dans un SIG et analysés à l'échelle du territoire du caza de Zahlé afin d'évaluer les impacts de la pollution phytosanitaire diffuse sur l'environnement et quelle est la stratégie à élaborer pour diminuer cette pollution.

Pour bien mener notre recherche, il fallait que les données et les informations statistiques de base soient récentes et exactes. En fait, le non disponibilité des données statistiques au Liban, comme dans tous les pays en voie de développement, est un handicap majeur. Elles sont difficiles à obtenir, et en cas d'accès, elles ne sont pas toujours très fiables.

Dans notre cas, nous avons eu recours aux données du dernier recensement agricole de 2010 qui a été réalisé par le Ministère de l'Agriculture Libanais et la FAO.

Comme nous venons de le signaler, une fois acquis les résultats du recensement agricole, nous avons commencé, à partir de Janvier 2016 à analyser les données du RGA afin d'élaborer une typologie des exploitations agricoles. Cette typologie a servi de base pour réaliser un échantillon

représentatif de notre zone d'étude et qui répond à notre problématique. En ce qui concerne les éléments constitutifs de la base de données, ils représentent plusieurs types d'informations :

- 1- Le numéro, le nom de la localité ;
- 2- La surface totale, la SAU totale, SAU irriguée et non irriguée, SAU par type de cultures, surfaces en jachères, en forêts, en pâturages ;
- 3- Le pourcentage de chacune des 4 premières cultures afin de déterminer l'assolement des cultures. Ces informations ont aussi été indispensables pour la classification des zones ;

En même temps, des entretiens ont été réalisés d'une part auprès des responsables des administrations publiques dans le but d'avoir des informations pour comprendre la situation actuelle et analyser les relations entre les acteurs publics, notamment :

- 1- Le Ministère de l'Agriculture⁴² : afin de connaître les défis et menaces qui pèsent sur le secteur agricole et de confirmer ou infirmer l'exactitude des résultats de l'enquête village;
- 2- L'Institut de Recherches Agronomiques Libanais (IRAL) ;
- 3- le Ministère de l'Economie pour connaître les surfaces des cultures subventionnées ;
- 4- Le Ministère de la Santé concernant les données liées aux risques des produits phytosanitaires sur la santé humaine.

Et d'autre part, auprès :

- 1- Des responsables des départements agro-économiques de l'Institut de Recherches Agronomiques Libanais (IRAL);
- 2- Des représentants des fournisseurs d'intrants dans notre zone d'étude;
- 3- Des personnes clés à titre d'expert;
- 4- Des mokhtars et des maires de quelques localités.

2. Typologie des systèmes de production agricoles et caractérisation spatiale

Après avoir complété la base de données, nous avons procédé à la classification de la région d'étude en zones homogènes en termes de système de production stratifié. Les éléments de cette base dans chaque zone seront explicités dans la Partie III, Chapitre 7.

En fait, et comme nous avons signalé dans le chapitre précédent, cette région est caractérisée par une diversité de climats (micro-climats), de sols, d'altitude, de systèmes de production, de facteurs socio-économiques (religion, démographie, anthropologie, etc.) ce qui la rend assez diversifié. Pour que notre démarche empirique soit fiable et cohérente, nous avons divisé notre région en plusieurs zones homogènes en prenant en considération les variables de production, de taille, et de caractérisation spatiale.

⁴²Il s'agit des chefs des départements de la vulgarisation, du développement rural et des forêts, de la production animale et des bureaux du Ministère à la frontière Libano-Syrienne.

En effet, l'utilisation simultanée de ces variables produit des résultats typologiques très difficiles à interpréter. Le caractère spatial, réduit à la seule notion disponible, est également problématique dans la mesure où la caractérisation spatiale des enquêtes dépend du lieu du siège de l'exploitation agricole et de l'emplacement des terres qui peuvent également être dispersées.

Il était alors indispensable de trouver une méthode de caractérisation des entités spatiales pertinentes permettant de combiner systèmes de production et structures d'exploitation afin de construire notre typologie et d'identifier les zones homogènes.

Pour atteindre cet objectif, notre travail a été effectué pas à pas, en commençant par une typologie des systèmes de productions, suivie d'une stratification et enfin de l'intégration du critère spatial.

L'analyse a été effectuée avec des méthodes de la statistique descriptive multidimensionnelle. Ces méthodes permettent de traiter simultanément les relations entre un grand nombre de variables qualitatives et/ou quantitatives.

Les deux méthodes d'analyses factorielles retenues sont l'ACP (Analyse des Composantes Principales) et l'AFC (Analyse Factorielle des Correspondances).

Dans **un premier temps** une ACP a été réalisée avec comme objectif principal d'évaluer les convergences et les oppositions entre variables pour construire des facteurs de différenciation multicritères qui, utilisés comme des variables d'entrée de méthodes de classification, permettent de définir des groupes d'individus homogènes et de mettre en évidence une typologie d'individus (Kaouani A. *et al.*, 2007). Dans notre cas, l'application de l'ACP va nous permettre d'obtenir des groupes homogènes et d'avoir une typologie des systèmes de production qui sera ensuite stratifiée par classe de taille.

L'ACP est une méthode très efficace pour l'analyse des données quantitatives (continues). Elle a plusieurs objectifs :

1. Elle est présentée sous forme de tableaux à M observations / N variables. Elle permet de visualiser et d'analyser rapidement les corrélations entre les N variables et les M observations initialement décrites par N variables sur un graphique à deux ou trois dimensions construit de manière à ce que la dispersion entre les données soit aussi bien préservée que possible.
2. C'est une méthode qui permet de définir la manière dont se structurent les variables (association ou opposition). Ces associations sont représentées sur des axes factoriels.
3. Elle permet encore de faire une synthèse de corrélation entre deux variables dans un nuage de points. L'ajustement de la droite de régression donne une meilleure représentation entre les deux variables. Dans un autre sens, les deux variables ont été réduites à un seul facteur qui est la combinaison des deux. L'idée de base de l'analyse en composantes principales illustre la possibilité de combinaison des deux variables corrélées dans un seul axe « facteur ». Le calcul des coefficients de corrélations « r » où ces derniers peuvent varier de -1 à +1, nous permet d'avoir un premier résultat qui se traduit par la matrice des

corrélations. Lorsque les données sont caractérisées par des unités différentes, les valeurs qui en résultent sont centrées et réduites.

L'ACP recherche la **première composante principale** (ou premier axe principal). Ce premier axe est la combinaison linéaire des variables initiales (c'est-à-dire les colonnes) pour laquelle la variance des individus est maximale. C'est donc l'axe sur lequel sera projeté le nuage des individus et qui le déformera le moins. Cet axe représente une certaine proportion (maximale) de la variation totale des individus.

On recherche ensuite une **seconde composante** qui va présenter elle-même une part de la variation non expliquée par le 1^{er} axe. Cette seconde composante, non corrélée avec la première, est aussi une combinaison linéaire des variables initiales. Le processus se déroule jusqu'à représenter la totalité de la variation du nuage. Ce qui est obtenu en fait à la n^{ième} composante si n est le nombre de variables ou colonnes.

Des **valeurs propres** sont calculées, qui sont liées à un concept très simple : la qualité de la projection lorsque l'on passe à N dimensions (N étant le nombre de variables). A chaque valeur propre correspond un facteur ou axe. Chaque facteur est en fait une combinaison linéaire des variables de départ. Les facteurs ont la particularité de ne pas être corrélés entre eux. Les valeurs propres et les facteurs sont triés par ordre décroissant de variabilité représentée.

Le graphique découlant de cette méthode s'appelle le **cercle des corrélations** (cercle sur les axes F1 et F2). Il correspond à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions constitué par les deux premiers facteurs. Cette représentation graphique est utile pour interpréter la signification des axes. L'ACP conduit à la réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des individus et des caractères (variables) dans un espace de dimension réduite. Les variables analysées sont de types quantitatifs «continus».

Pour résumer, l'ACP, par le calcul de composantes principales, permet de produire des axes de différenciation indépendants construits par combinaison linéaire des variables initiales. Le premier axe ou axe principal est la combinaison linéaire des variables initiales pour laquelle la variance expliquée des variables est maximale. C'est donc l'axe sur lequel sera projeté le nuage des individus et qui le déformera le moins. Cet axe représente une certaine proportion (maximale) de la variation totale des individus. On regardera ensuite les composantes principales suivantes qui vont représenter elle-même une part de la variation non expliquée par le 1^{er} axe. Le processus se déroule jusqu'à la totalité de la variation du nuage.

L'analyse retiendra les axes significatifs.

Dans notre cas et pour les 4 575 exploitations « individus », 20 variables quantitatives ont été choisies et calculées à partir d'un ensemble de variables brutes issues du recensement agricole.

Elles concernent :

- Les ressources de l'exploitation,
- Les surfaces des cultures dans les exploitations,

- Les ratios des surfaces pour caractériser l'orientation des exploitations (Tableau 18).

Les variables actives pour l'analyse factorielle sont des ratios des variables initiales.

Tableau 18: Variables quantitatives utilisées pour caractériser les exploitations par analyse ACP par strate de taille (Source : Travail de Kanj F., Tanagra, 2015)

| Code de la variable initiale | Description |
|-------------------------------------|---|
| Village_1 | Nom des villages de notre zone d'étude |
| Irrig | Surface irriguée ou non |
| SURFTOT | Surface totale par exploitation |
| SAUc | Surface Agricole Utile contrôlée |
| SCC | Surface des céréales |
| SCF | Surface des Cultures Fourragères |
| SCMAR | Surface des Cultures Maraîchères |
| SCLEG | Surface des Légumineuses |
| SAF | Surface des Arbres Fruitiers |
| SOLIV | Surface en Olivier |
| SVIG | Surface en Vigne |
| Variables actives | Description |
| SCC/SAUc | Ratio des Surfaces des céréales par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SCF/SAUc | Ratio des Surface des Cultures Fourragères par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SCMAR/SAUc | Ratio des Surfaces des Cultures Maraîchères par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SCLEG/SAUc | Ratio des Surfaces des Légumineuses par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SAF/SAUc | Ratio des Surfaces des Arbres Fruitiers par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SOLIV/SAUc | Ratio des Surfaces en Olive par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SVIG/SAUc | Ratio des Surfaces en Vigne par Surface Agricole Utile contrôlée |
| SCS/SAUc | Ratio des surfaces des cultures saisonnières par Surface agricole utile contrôlée |
| SCP/SAUc | Ratio des surfaces des cultures permanentes par Surface agricole utile contrôlée |

Ces variables sont calculées sur Excel puis elles sont importées dans le logiciel Tanagra. Le logiciel Tanagra est un logiciel d'exploration de données (data mining) destiné à l'enseignement et à la recherche. Il a été créé en 2003. Il implémente une série de méthodes de fouille de données

issues du domaine de la statistique exploratoire, de l'analyse de données, de l'apprentissage automatique et des bases de données (Rakotomalala, 2005). Nous avons choisi ce logiciel car il est gratuit, les méthodes statistiques et leurs résultats respectifs sont clairement nommés selon l'usage le plus important. Il est caractérisé par une rapidité de traitement d'une importante masse de données.

Une fois les variables importées dans Tanagra, l'étape suivante consiste à définir le rôle de ces variables. C'est le rôle de la composante DEFINE STATUS accessible dans la barre d'outils. Nous mettons en INPUT les variables actives.

Pour effectuer l'analyse en composantes principales, nous plaçons la « **Principal Component Analysis** » dans le diagramme de traitement qui réalise les calculs souhaités.

L'étape suivante est le paramétrage de la méthode ACP : nous sélectionnons les variables actives de l'analyse et nous spécifions que les résultats seront pour tous les individus « exploitations » afin de définir le nombre d'axes à produire. Puis nous activons l'option qui permet de calculer les « \cos^2 » et les contributions pour chaque individu. Les **résultats** de l'analyse apparaissent et ce sera soit des **résultats listages** « sous forme de tableaux » ou des **résultats graphiques** « cercles de corrélations à définir ».

Une fois les résultats d'ACP obtenus, une classification ascendante hiérarchique est réalisée permettant de définir une typologie des structures de production, par agrégation successive des individus les plus proches.

Le principe de l'algorithme consiste à créer, à chaque étape, une partition en agréant deux à deux les éléments les plus proches (Lebart *et al.* 1995). Nous désignerons alors par élément à la fois les individus ou les objets classés et les regroupements d'individus générés par l'algorithme. Il y a différentes manières de considérer le nouveau couple d'éléments agrégés, d'où un nombre important de variantes de cette technique. L'algorithme ne fournit pas une partition en q classes d'un ensemble de n objets mais une hiérarchie de partitions, se présentant sous la forme d'arbres appelés également dendrogrammes contenant $n-1$ partitions. L'intérêt de ces arbres est qu'ils peuvent donner une idée du nombre de classes possibles de partition de la population.

Dans **un deuxième temps** un croisement des résultats de la typologie des systèmes de production issus de l'ACP et de la classification est réalisé avec une stratification par classe de taille. Cette typologie stratifiée est alors croisée avec les communes d'appartenance en termes d'effectifs ; une AFC (Analyse Factorielle des correspondances simples) sera ensuite réalisée sur ce tableau de contingence.

L'AFC constitue une technique d'analyse statistique d'un ou de plusieurs tableaux de contingences permettant une représentation graphique des attractions et des distances entre les modalités des variables choisies.

Cette méthode est basée sur le traitement d'un tableau de fréquence entre deux variables. Elle est particulièrement adaptée à l'analyse d'enquêtes pour lesquelles seront croisées deux modalités de variables qualitatives.

Dans notre cas, l'objectif est de croiser le nombre de systèmes de production stratifiés par classe de taille et par commune pour obtenir un tableau de fréquence.

A l'issue de la première analyse en ACP, les deux premiers axes de cette analyse expliquaient 56.02% de la variabilité totale. Ils ont été interprétés comme suit :

L'axe 1 explique 35.18% de la variance totale et permet de discriminer le système de production de grande taille orienté en arboriculture par rapport aux autres systèmes présents dans la région.

L'axe 2 explique 20.84% de la variance totale et permet d'opposer les systèmes de production de vignes, d'arbres fruitiers, de maraîchage, d'arbres exotiques et d'oliviers aux systèmes de production de cultures céréalières, de cultures fourragères et de cultures maraîchères.

Eigen values

| | |
|--------------|----------|
| Matrix trace | 5.000000 |
| Average | 1.000000 |

| Axis | Eigen value | Difference | Proportion (%) | Histogram | Cumulative (%) |
|------|-------------|------------|----------------|-----------|----------------|
| 1 | 1.759222 | 0.717261 | 35.18 % | | 35.18 % |
| 2 | 1.041960 | 0.055539 | 20.84 % | | 56.02 % |
| 3 | 0.986421 | 0.143318 | 19.73 % | | 75.75 % |
| 4 | 0.843103 | 0.473809 | 16.86 % | | 92.61 % |
| 5 | 0.369294 | - | 7.39 % | | 100.00 % |
| Tot. | 5.000000 | - | - | - | - |

Figure 36: Résultats d'ACP retenus sur Tanagra (Source : Calculs F. Kanj à travers Tanagra).

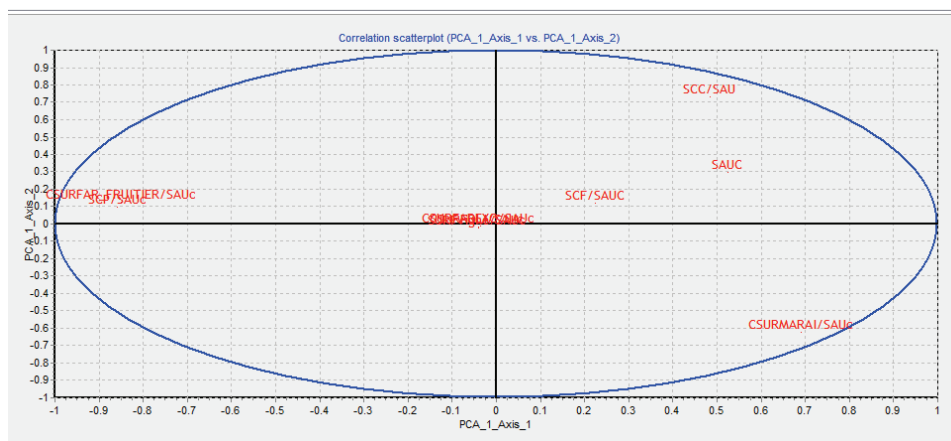


Figure 37: Cercle de corrélation entre les axes 1 et 2 (Source : Calculs F. Kanj à travers Tanagra).

Une classification par la méthode des nuées dynamiques a été ensuite réalisée à partir des résultats de l'ACP en utilisant les coordonnées des individus sur les axes factoriels. Le croisement par strate de taille nous a permis d'obtenir des systèmes de production dont 21 types ont été retenus selon les classes de tailles (tableaux 19 et 20). Ces 21 types sont stratifiés selon 7 catégories de taille de l'exploitation.

Tableau 19: Variables quantitatives utilisées pour caractériser les exploitations par analyse AFC
(Source : travail Kanj F., 2015, analyse dans Tanagra).

| Variables actives | Description |
|--------------------------|--|
| AFS1 | Arbres fruitiers de classe de taille 1 |
| MS1 | Maraîchage de classe de taille 1 |
| VIGOLIS1 | Vignoble et olivier de classe de taille 1 |
| CERS2 | Céréaliculture de classe de taille 2 |
| MARFOUS2 | Maraîchage et fourrage de classe de taille 2 |
| MS2 | Maraîchage de classe de taille 2 |
| MCEXOS3 | Maraîchage et exotique de classe de taille 3 |
| AFS3 | Arbres Fruitiers de classe de taille 3 |
| VIGS3 | Vignoble de classe de taille 3 |
| VIGCERS4 | Vignoble et céréaliculture de classe de taille 4 |
| AFS4 | Arbres Fruitiers de classe de taille 4 |
| MS4 | Maraîchage de classe de taille 4 |
| CERFOURS5 | Céréaliculture et fourrage de classe de taille 5 |
| AFVIGS5 | Arbres fruitiers et vignoble de classe de taille 5 |
| MARCIS5 | Maraîchage et cultures industrielles de classe de taille 5 |
| CERS6 | Céréaliculture de classe de taille 6 |
| AFVIGS6 | Arbres fruitiers de classe de taille 6 |
| MS6 | Maraîchage de classe de taille 6 |
| CERS7 | Céréaliculture de classe de taille 7 |
| AFS7 | Arbres fruitiers de classe de taille 7 |
| MARCIS7 | Maraîchage et cultures industrielles de classe de taille 7 |

Tableau 20: Types des systèmes de productions stratifiés par classe de taille retenue après la réalisation de l'ACP (Source : travail Kanj F., 2015, analyse dans Tanagra)

| | Taille de l'exploitation (Strate, dn (1 dn= 0.1 ha)) | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|--|--|---|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 |
| | 0.1-6.1 | 6.1-10.1 | 10.1-20.1 | 20.1-50.1 | 50.1-100.1 | 100.1-300.1 | <300.1 |
| Système de production | Arboriculture AF_S1 (17.5 ; 0.9) | Céréaliculture CER_S2 (1 ; 0.5) | Cultures maraîchères et cultures exotiques MarCer_S3 (1.6 ; 0.5) | Viticulture et oléiculture VigCer_S4 (6.5 ; 3.3) | Céréaliculture et cultures fourragères CerFou_S5 (3.1 ; 3.2) | Céréaliculture Cer_S6 (3.2 ; 7.9) | Arboriculture AF_S7 (1.1 ; 27) |
| | Cultures maraîchères Mar_S1 (4.2 ; 0.2) | Cultures maraîchères et cultures fourragères MarFou_S2 (1.5 ; 0.8) | Arboriculture AF_S3 (10.4 ; 3.1) | Arboriculture AF_S4 (8.3 ; 4.3) | Arboriculture et viticulture AFVIG_S5 (4 ; 4.2) | Arboricultures et viticultures AFVig_S6 (1.6 ; 4) | Cultures maraîchères et cultures industrielles MarCI_S7 (1.5 ; 14.2) |
| | Viticulture et oléiculture VigOl_S1 (12 ; 0.6) | Cultures maraîchères Mar_S2 (1.5 ; 0.8) | Viticulture VIG_S3 (4.2 ; 1.2) | Cultures maraîchères Mar_S4 (6.1 ; 4.4) | Cultures maraîchères et cultures industrielles MarCI_S5 (4.3 ; 4.5) | Cultures maraîchères Mar_S6 (5.1 ; 12.8) | Céréaliculture Cer_S7 (1.4 ; 1.3) |

Les résultats montrent qu'il y a une très grande hétérogénéité au niveau des types des systèmes de production stratifié par classe de taille. Cela est très clair en observant les pourcentages existants dans le tableau. Les valeurs existantes présentent d'une part les pourcentages du nombre d'exploitations par classe de taille et par système de production et d'autre part les pourcentages des surfaces agricoles utiles par classe de taille et par système de production.

La surface moyenne de l'exploitation arboricole dans la classe AF_S1 est de l'ordre de 0.3 ha et elle dépasse les 4.40 ha au niveau de la classe AF_S7.

Pour atteindre notre objectif, nous avons construit un tableau de fréquence croisant les systèmes stratifiés avec les communes. Pour les 43 villages « individus », 21 variables de fréquence ont été retenues caractérisant les systèmes de production par classe de taille (Tableau 21).

Tableau 21: Tableau de fréquence des variables pour l'AFC (travail Kanj F., 2015, analyse sur Tanagra)

| Commune | AFS1 | MS1 | VIGOLI S1 | CER S2 | MAR FOU S2 | MS2 | MCE XOS 3 | AF S3 | VIG S3 | VIG CER S4 | AF S4 | MS4 | CERF OUS5 | AFV IGS 5 | MAR CIS5 | CER S6 | AF VIG S6 | MS6 | CER S7 | AF S7 | MAR CIS7 |
|----------------------|------|-----|--------------|-----------|------------------|-----|-----------------|----------|-----------|------------------|----------|-----|--------------|-----------------|-------------|-----------|-----------------|-----|-----------|----------|-------------|
| AALI EN NAHRI | 11 | 20 | 51 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 6 | 3 | 0 | 4 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 |
| AANJAR | 30 | 5 | 5 | 0 | 3 | 12 | 4 | 61 | 0 | 6 | 41 | 15 | 6 | 8 | 9 | 7 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| ABLAH | 0 | 2 | 15 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 25 | 11 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AIN KFAR ZABAD | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 11 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BARR ELIAS | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6 | 0 | 26 | 2 | 0 | 26 | 1 | 8 | 43 | 1 | 16 | 9 | 0 | 14 |
| BOUAREJ | 45 | 8 | 20 | 2 | 0 | 0 | 1 | 9 | 0 | 2 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| CHOU BROUQIYET TABET | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| CHTOURA | 2 | 6 | 5 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| DALHAMIYET ZAHLE | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 1 | 0 | 6 | 4 | 6 | 8 | 0 | 7 | 4 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| DEIR EL GHAZAL | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 1 | 0 | 16 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FOURZOL | 2 | 0 | 22 | 0 | 0 | 0 | 3 | 9 | 67 | 68 | 7 | 1 | 0 | 21 | 1 | 0 | 11 | 2 | 0 | 1 | 3 |
| HAOUCH MANDRA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 |
| HAOUCH QAYSSAR | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 2 | 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| HAZERTA | 88 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| HOSHMOH | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 4 | 5 | 0 | 3 |
| HOUCH EL GHANAM | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| HOUCH HALA | 0 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 7 | 0 | 1 | 8 | 2 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 |
| JDITA | 5 | 9 | 4 | 0 | 8 | 2 | 1 | 7 | 0 | 0 | 10 | 24 | 4 | 5 | 7 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| KFARZABAD | 20 | 1 | 5 | 1 | 4 | 0 | 5 | 26 | 0 | 10 | 21 | 11 | 4 | 11 | 19 | 10 | 5 | 65 | 1 | 0 | 16 |
| KSARA | 10 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MAJDEL AANJAR | 54 | 6 | 124 | 13 | 2 | 3 | 5 | 2 | 2 | 16 | 1 | 7 | 6 | 1 | 1 | 4 | 0 | 11 | 0 | 0 | 1 |
| MAKSE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 5 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 |
| MASSA | 4 | 0 | 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 4 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| MREIJAT ZAHLE | 4 | 2 | 10 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| NABI AYL | 2 | 2 | 12 | 0 | 0 | 1 | 2 | 7 | 8 | 8 | 3 | 3 | 1 | 7 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| NASRIYET RIZQ | 1 | 7 | 25 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| NASRIYET ZAHLE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| NIHA ZAHLE | 22 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 4 | 15 | 16 | 6 | 26 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 7 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| OUADI EL AARAYECH | 36 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 | 0 | 1 | 15 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QAA ER RIM | 39 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45 | 1 | 0 | 34 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QABB ELIAS | 67 | 22 | 5 | 2 | 10 | 7 | 2 | 32 | 0 | 5 | 16 | 38 | 3 | 5 | 14 | 3 | 3 | 4 | 5 | 0 | 3 |
| QOUSSAYA | 16 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 19 | 0 | 2 | 12 | 0 | 1 | 7 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RAAIT | 29 | 0 | 5 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RIYaq | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| SAADNAYEL | 11 | 31 | 8 | 12 | 10 | 11 | 6 | 2 | 0 | 14 | 1 | 33 | 5 | 0 | 16 | 2 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| TAALABAYA | 21 | 4 | 11 | 0 | 1 | 3 | 7 | 12 | 0 | 1 | 16 | 10 | 2 | 3 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TAANAYEL | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 | 1 | 4 | 8 | 1 | 7 | 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| TCHFLIK QIQANO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 2 | 1 | 7 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| TELL EL AKHDAR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| TERBOL ZAHLE | 4 | 6 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 10 | 8 | 3 | 8 | 5 | 0 | 17 | 5 | 0 | 13 |
| TOUAITE | 23 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 14 | 0 | 1 | 3 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ZAHLE | 8 | 0 | 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 4 |
| ZAHLE ARADI | 3 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 5 | 0 | 3 | 7 | 0 | 7 |
| ZAHLE KARAK NOUH | 22 | 1 | 42 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 18 | 17 | 10 | 4 | 10 | 6 | 6 | 7 | 4 | 10 | 1 | 1 | 7 |

*Les différentes couleurs correspondent aux différents systèmes de production stratifiée.

Nous avons utilisé une AFC simple puis une classification hiérarchique pour pouvoir réaliser une typologie des communes afin de caractériser des spécialisations de territoires et/ou des caractéristiques structurelles spatiales à un niveau d'agrégation supérieur à la commune.

Eigen values

Matrix trace = 1.2352

SQRT(Matrix trace) = 1.1114



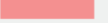





| Axis | Eigen value | % explained | Histogram | % cumulated |
|------|-------------|-------------|---|-------------|
| 1 | 0.407402 | 32.98% |  | 32.98% |
| 2 | 0.357686 | 28.96% |  | 61.94% |
| 3 | 0.221605 | 17.94% |  | 79.88% |
| 4 | 0.128897 | 10.44% |  | 90.32% |
| 5 | 0.034913 | 2.83% |  | 93.14% |
| 6 | 0.033060 | 2.68% |  | 95.82% |
| 7 | 0.020359 | 1.65% |  | 97.47% |
| 8 | 0.016068 | 1.30% |  | 98.77% |
| 9 | 0.009754 | 0.79% | | 99.56% |
| 10 | 0.005467 | 0.44% | | 100.00% |
| Tot. | 1.235211 | - | - | - |

Figure 38: Résultats de l'AFC retenus sur Tanagra (Source : calculs F. Kanj à travers Tanagra)

Les résultats de cette analyse montrent qu'il existe 5 classes (figure 21). Cette classification prend en compte 80% de l'inertie du nuage de points pour une partition en 5 classes.

Les cinq classes seront décrites dans la Partie III, Chapitre 7.

3. Echantillonnage, acquisition et traitement des données

Après avoir obtenu les groupes homogènes, nous avons distribué ces groupes spatialement selon les villages de notre zone d'étude afin d'avoir des grandes zones représentatives. Nous avons procédé à réaliser l'échantillonnage pour faire les enquêtes.

Pour que les enquêtes soient représentatives et cohérentes, l'échantillon a été conçu de façon très stricte. En effet, en mars 2016, nous nous sommes rendus à Montpellier pour préparer l'échantillonnage avec nos encadreurs. Pour élaborer notre échantillon, nous avons bénéficié des données toutes récentes du recensement agricole qui a été réalisé par le Ministère de l'Agriculture et la FAO.

3.1. Plan de l'échantillonnage

Après avoir eu les données nécessaires sur la population ciblée pour la réalisation de notre travail, et afin d'établir notre modèle de gestion des risques des produits phytosanitaires, il a fallu procéder à l'échantillonnage. Pour que l'échantillon soit représentatif, il est indispensable de déterminer les classes de SAU de chaque zone. Or, avant le tirage de l'échantillon et afin d'assurer un maximum de représentativité, il était nécessaire de déterminer les variables les plus importantes pour

atteindre l'objectif de notre recherche. En effet, d'après la base de données dont nous disposons, les variables prises en compte ont été les suivantes:

- les systèmes de production dominants;
- la superficie agricole utile (SAU), la SAU par groupe;
- la distribution spatiale.

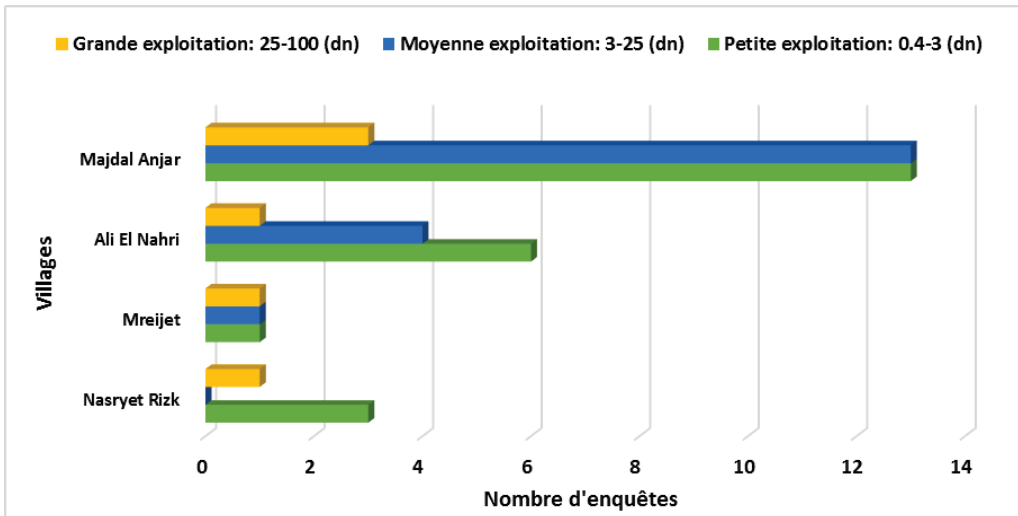
Le croisement de ces trois variables nous a paru indispensable pour définir notre échantillon. Mais, pour qu'il soit représentatif au niveau de l'espace et de la typologie des systèmes de production spatialisés, l'échantillon doit, d'une part, contenir un nombre significatif d'exploitations enquêtées et, d'autre part, refléter les différents types d'exploitations distribuées spatialement.

Partant de 4 575 exploitations, nous avons pu calculer le poids du nombre des exploitations dans chaque groupe et par grande zone ce qui nous a permis de déterminer le nombre d'enquêtes selon le poids de chaque groupe par rapport au nombre total (Tableau 22).

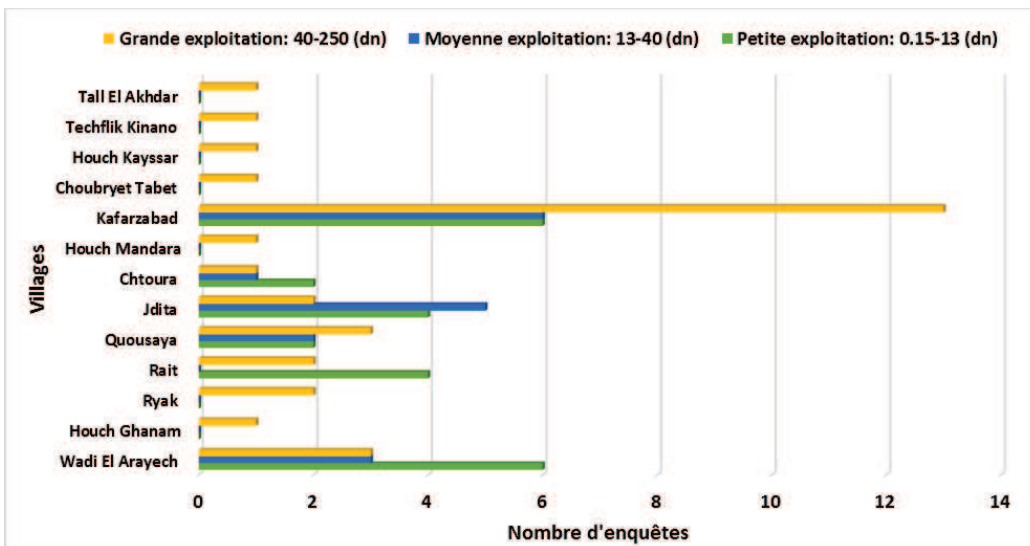
Tableau 22: Répartition des enquêtes selon le poids de chaque groupe par rapport au total (Source: travail Kanj F. 2015)

| Système agricole | Nombre d'exploitations | Pourcentage (%) | Nombre d'enquêtes réalisées |
|---|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Viticulture et oléiculture (G1) | 435 | 11 | 44 |
| Maraichage et Cultures industrielles (G2) | 1133 | 28 | 112 |
| Céréaliculture (G3) | 389 | 10 | 40 |
| Arboriculture (G4) | 1203 | 30 | 120 |
| Viticulture (G5) | 822 | 21 | 84 |

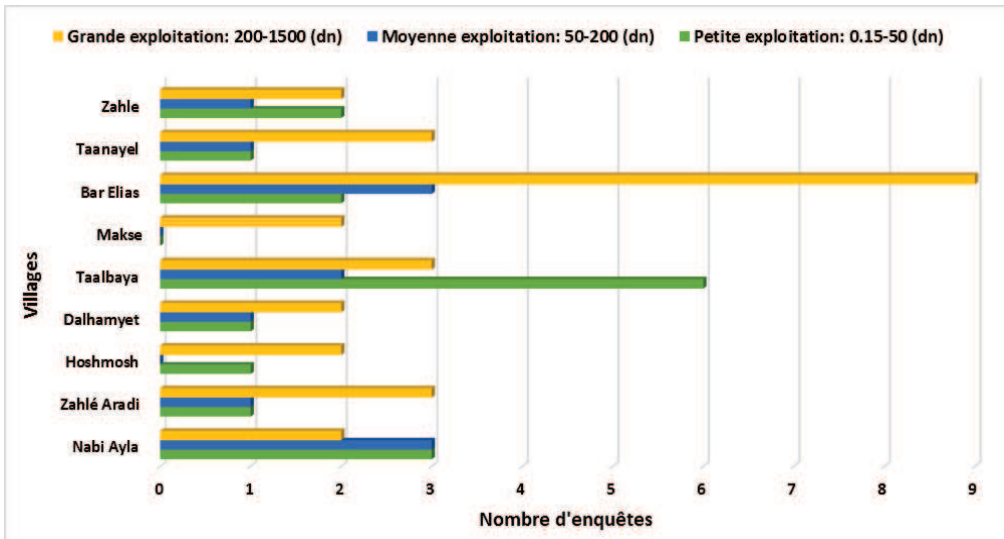
Après avoir précisé le nombre d'enquêtes par système de production, nous avons recalculé le poids du nombre des exploitations mais cette fois-ci en prenant en considération la stratification des systèmes de production et la distribution spatiale des résultats obtenus de l'analyse factorielle effectuée. Le nombre d'enquêtes à réaliser par système de production, par classe de taille et par commune figure dans les histogrammes ci-dessous.



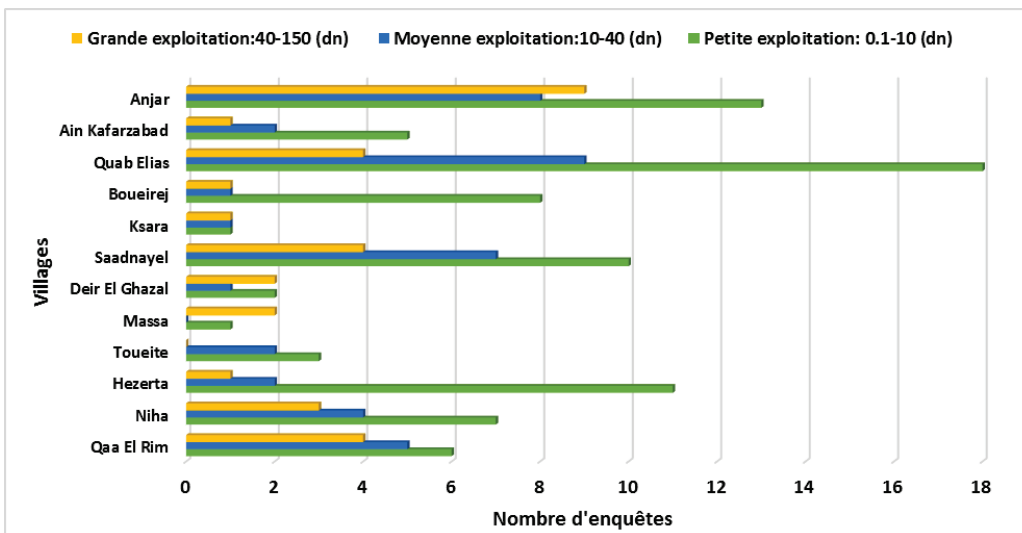
Groupe 1: Viticulture et Oléiculture (Source : Résultats des analyses de F. Kanj)



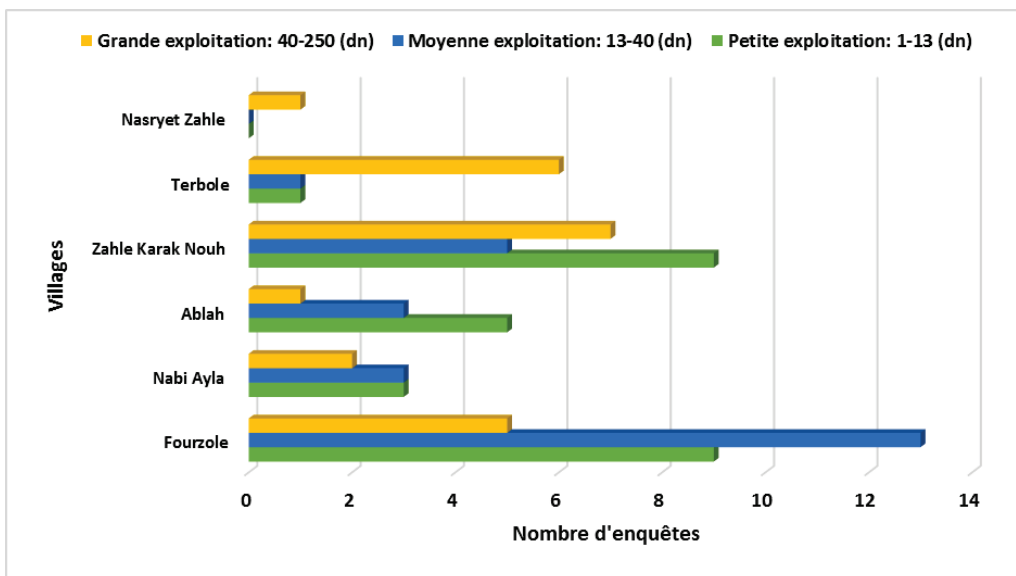
Groupe 2: Cultures maraîchères et Cultures industrielles (Source : Résultats des analyses de F. Kanj)



Groupe 3: Céréaliculture (Source : Résultats des analyses de F. Kanj)



Groupe 4: Arboriculture (Source : Résultats des analyses de F. Kanj)



Groupe 5: Viticulture (Source : Résultats des analyses de F. Kanj)

Tableau 23: Répartition des agriculteurs enquêtés entre les 5 zones (Source : travail Kanj F., 2015)

| Zone (Groupe de communes) | Nombre d'agriculteurs | Nombre d'enquêtes réalisées |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Zone 1 | 435 | 44 |
| Zone 2 | 1133 | 112 |
| Zone 3 | 389 | 40 |
| Zone 4 | 1203 | 120 |
| Zone 5 | 822 | 84 |

La méthode d'échantillonnage la mieux adaptée à notre cas et à notre situation compte tenu du coût et de la qualité de l'information, était la **méthode d'échantillonnage aléatoire simple** : « elle consiste à choisir n unités parmi les N de la population de sorte que chacun des échantillons possibles ait la même probabilité d'être sélectionné » (Monino, 2000).

Le choix des individus à enquêter s'est fait par un tirage aléatoire simple à partir des listes des exploitants disponibles du recensement agricole, tout en veillant au respect d'une certaine représentativité de la diversité des facteurs agricoles et socio-économiques à travers la couverture de l'ensemble des zones de la région de Zahlé .

Deux variables permettent de contrôler notre échantillon

- 1- La variable de la localisation géographique des exploitations selon les zones ;
- 2- La variable de la SAU.

3.2. La réalisation de l'enquête

Couvrant l'ensemble du territoire du Caza de Zahlé, deux enquêtes ont été réalisées durant 2016-2017. La première enquête a eu lieu entre août et septembre 2016 et a porté sur un échantillon de 100 agriculteurs. L'objectif de cette enquête était de connaître le comportement des agriculteurs vis-à-vis de l'utilisation des produits phytosanitaires. Tandis que la deuxième enquête a porté sur un échantillon de 400 agriculteurs. Elle a été réalisée entre novembre 2016 et mars 2017. Cette méthode nous a permis, au-delà de la collecte des données quantitatives qui figurent dans chaque questionnaire, d'avoir un entretien avec chaque agriculteur. Nous avons pu ainsi recueillir toute une série de données qualitatives qui permettent d'expliquer certains des phénomènes observés.



Figure 39: Réalisation d'enquêtes auprès des deux agriculteurs à Jdita (source: travail de terrain, 2015-2016).

Le questionnaire lié au comportement des agriculteurs comporte 15 pages et une centaine de questions. Il figure dans l'annexe 2.



Figure 40: Exploitation viticole à Forzol (source: travail de terrain, 2015-2016).

Tableau 24: Comparaison entre la SAU moyenne / agriculteur et SAU moyenne / agriculteur enquêté dans les 5 zones (Source : travail de Kanj F., 2015)

| | SAU Moyenne/Agriculteur | SAU Moyenne /Agriculteur enquêté | Ecart type |
|---------------|----------------------------|-------------------------------------|------------|
| Zone 1 | 4,09 | 2,32 | 0,25 |
| Zone 2 | 7,18 | 11,2 | 2,84 |
| Zone 3 | 16,8 | 14,25 | 1,80 |
| Zone 4 | 6,7 | 3,19 | 2,4 |
| Zone 5 | 4,1 | 6,8 | 1,90 |

3.3. Le questionnaire

La préparation du questionnaire est importante. En effet, tous les résultats de notre recherche en dépendaient. A partir des recherches bibliographiques et de l'analyse des modèles de questionnaires utilisés dans des études de terrain sur les pratiques agricoles au niveau d'un territoire donné, nous avons construit un questionnaire adapté à notre sujet et notre terrain d'études. Les questions, formulées en français, ont été conçues de manière à faciliter la collecte et l'exploitation des données.

Conformément aux objectifs assignés à cette enquête qui devait nous renseigner sur les pratiques agricoles des agriculteurs dans notre zone d'étude et les types de fonctionnement des unités de production et sur les produits phytosanitaires utilisés avec les quantités appliquées, le questionnaire est **composé de cinq parties** : la première identifie **les structures des exploitations** (localisation de l'exploitation, chef d'exploitation, la famille et la pluriactivité), la deuxième évoque **les structures foncières**(SAT, SAU, mode de faire valoir, statut juridique, surfaces des différentes culture), la troisième concerne **les productions végétales et animales et leur charges** (type de production, surface de chaque production, rotation, date d'installation, date de récolte, les charges, les intrants), la quatrième décrit **les moyens de production** (nombre de tracteurs, machines de traite, main-d'œuvre, valeur d'achat, quantités utilisées, prix d'achat, etc.), alors que la cinquième partie analyse **la question des produits phytosanitaires** au niveau de notre zone d'étude.

3.4. La saisie et le traitement des données

Compte tenu de l'abondance de l'information collectée au cours de nos enquêtes, nous avons été amenés à entreprendre un traitement des données à deux niveaux. Dans un premier temps, nous avons sélectionné et trié les questionnaires dans le but d'éliminer le maximum d'erreurs, ainsi que pour faciliter notre dépouillement et pour ne pas travailler avec des es données erronées susceptibles d'impacter les résultats de notre analyse. Dans un deuxième temps, nous avons séparé les questions quantitatives et qualitatives, nous avons saisi les données sur Excel et utiliser le au logiciel **SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)**.

Une fois la saisie et la vérification des données terminées, ces dernières ont été transformées en tableaux croisés dynamiques dans le but de répondre aux questions posées dans notre problématique.

Ensuite, les données ont été transformées avec **le logiciel SPSS**, afin d'avoir une analyse descriptive des données.

Une deuxième base de données spécifique a été établie à partir des données collectées de nos enquêtes (400 questionnaires) qui traitent les pratiques agricoles, les noms des produits phytosanitaires utilisés dans notre zone d'étude, les doses appliquées par culture, les dates d'application de traitement et les cibles (voir questionnaire annexe 1).

Cette base de données spécifique a été complétée par des variables supplémentaires provenant du logiciel ETOPHY⁴³ (dose homologuée, concentration de la matière active pour chaque produit). Etant donné qu'il existe sur le marché libanais des produits non homologués, il est apparu nécessaire de conduire une enquête à dire d'expert en interviewant des personnes –ressources, afin de vérifier et valider les doses homologuées, la concentration de la matière active pour chaque produit.

⁴³ EToPhy est un logiciel qui permet le calcul de deux indicateurs de risque liés à l'utilisation des produits phytosanitaires :
- Un indicateur de risque pour la santé de l'applicateur
- Un indicateur de risque environnemental

Cette base spécifique va nous permettre au niveau de notre zone d'étude d'identifier i) les zones où la pression phytosanitaire est la plus élevée, ii) les cultures les plus consommatrices de produits phytosanitaires et iii) enfin les produits les plus utilisés.

4. Calcul d'Indicateur de Fréquence de Traitement, identification des cultures les plus consommatrice de pesticides avec les produits les plus utilisés à l'échelle de notre territoire

4.1. Calcul d'indicateur de pression IFT⁴⁴

Après avoir finalisé la base de données, nous avons procédé au calcul de l'indicateur de pression qui est l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT). Cet indicateur permet d'évaluer la pression des produits phytosanitaires exercée sur chaque parcelle (Champeaux *et al.*, 2006). Il est exprimé en nombre de doses homologuées par hectare appliqué sur la parcelle pendant une campagne culturale. Pour chaque traitement réalisé sur la parcelle, la quantité normalisée est obtenue en divisant la dose réellement appliquée par hectare issue de l'enquête par la dose homologuée à l'hectare du produit et de la culture concernée :

$$IFT_{\text{traitement}} = \text{Dose appliquée} / \text{Dose homologuée} * \text{proportion de la parcelle traitée}$$

$$IFT_{\text{parcelle}} = \sum \text{Dose appliquée} / \text{Dose homologuée}$$

L'IFT pour un ensemble de parcelles est égal à la moyenne IFT des parcelles correspondantes, pondérée par la surface de ces parcelles. Aussi, l'IFT peut être calculé à l'échelle d'une exploitation, d'un territoire ou d'une région.

Le calcul d'IFT a été réalisé au niveau de la commune, puis par hectare et enfin par culture. Ce calcul nous a permis d'identifier

- les zones où la pression phytosanitaire est élevée ;
- l'IFT moyen par hectare et par culture.

Tableau 25: IFT moyen (par hectare) au niveau du territoire et par culture (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Culture | IFTm/ha | IFT tot (Σ /territoire de notre zone d'étude "Zahlé") | Culture | IFTm/ha | IFT tot (Σ /territoire de notre zone d'étude "Zahlé") |
|---------|---------|--|-------------------|---------|--|
| Pomme | 34,22 | 17656,34 | Cerise | 8,31 | 8384,54 |
| Vigne | 19,3 | 32429,58 | Melon et Pastèque | 7,93 | 842,36 |

⁴⁴ Indicateur de Fréquence de Traitement

| | | | | | |
|----------------|-------|----------|---------------|------|----------|
| Pomme de terre | 16,07 | 55144,79 | Amande Vert | 6,76 | 2499,38 |
| Pêche | 14,2 | 7915,6 | Salade | 4,98 | 11927,08 |
| Concombre | 13,7 | 2553,84 | Lentille Vert | 4,55 | 138,75 |
| Tomate | 13,43 | 5026,98 | Olive | 4,27 | 407,89 |
| Abricot | 11,83 | 275,07 | Poix Vert | 4,18 | 219,34 |
| Prune | 11,71 | 2583,62 | Orge | 2,29 | 640,35 |
| Ail | 9,77 | 1844,03 | Maïs | 2,19 | 717,8 |
| Carotte | 9,35 | 1282,63 | Blé | 2,1 | 10226,25 |
| Oignon | 9,24 | 7100,3 | Avoine | 1,25 | 16,81 |

Afin d'arriver à avoir un IFT moyen par hectare et par culture couvrant toute la zone d'étude, il a fallu calculer le coefficient de variance⁴⁵. Afin que l'IFT moyen soit significatif, les références bibliographiques affirment que ce taux ne doit pas dépasser les 0.25 (25%).

Tableau 26: Calcul du coefficient de variance (CV) par culture (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Culture | Moyenne IFT/ha | Ecartype | Coefficient de variance (CV) | Culture | Moyenne IFT/ha | Ecartype | Coefficient de variance (CV) |
|-------------------|----------------|----------|------------------------------|-------------|----------------|----------|------------------------------|
| Pomme | 34,22 | 4,59 | 0,13 | Amande vert | 6,76 | 0,38 | 0,06 |
| Pêche | 14,2 | 2,19 | 0,15 | Abricot | 11,83 | 0,44 | 0,04 |
| Lentille verte | 4,55 | 0,98 | 0,22 | Olive | 4,27 | 0,34 | 0,08 |
| Laitue | 5,72 | 1,69 | 0,3 | Cerise | 8,31 | 0,76 | 0,09 |
| Choux | 6,05 | 1,35 | 0,22 | Ail | 9,77 | 0,65 | 0,07 |
| Persil | 2,31 | 0,36 | 0,16 | Maïs | 2,19 | 0,22 | 0,1 |
| Tomate | 13,43 | 2,39 | 0,18 | Oignon | 9,24 | 0,8 | 0,09 |
| Concombre | 13,7 | 2,59 | 0,19 | Orge | 2,29 | 0,21 | 0,09 |
| Melon et Pastèque | 7,93 | 1,98 | 0,25 | Blé | 2,1 | 0,22 | 0,1 |
| Pomme de terre | 16,07 | 3,19 | 0,2 | Salade | 4,98 | 0,8 | 0,16 |
| Avoine | 1,25 | 0,06 | 0,05 | Prune | 11,71 | 0,41 | 0,04 |
| Carotte | 9,35 | 0,31 | 0,03 | Vigne | 19,3 | 3,76 | 0,19 |

4.2. Méthode de calcul pour avoir les cultures les plus consommatrice en pesticides

Après avoir calculé l'IFT moyen/ha, nous avons été amenés à calculer le Quartile⁴⁶ des IFT moyen/ha. Le calcul du Quartile est nécessaire pour pouvoir repérer les cultures les plus consommatrices en pesticides.

⁴⁵ c'est le rapport écart type sur la moyenne

Tableau 27: Calcul des quartiles des deux variables IFT moyen par hectare et IFT total pour le choix des cultures les plus consommatrice de pesticides (Source : travail de Kanj F. 2016).

| | Q0 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
|---|-------|--------|---------|---------|----------|
| IFTm/ha | 1,245 | 4,34 | 8,7731 | 13,02 | 34,21 |
| IFT tot(Σ/commune) | 16,80 | 659,71 | 2526,60 | 8267,30 | 55144,79 |

Cette démarche nous a permis d'identifier les **6 cultures les plus consommatrices en pesticides** dans notre zone d'étude (Pommes de terre, pommes, vignes, cerises, salades et blé).

Tableau 28: IFT totaux des cultures les plus consommatrices en pesticides (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Culture | IFT tot (Σ /territoire de notre zone d'étude "Zahlé") |
|----------------|--|
| Pomme de terre | 55144,79 |
| Vigne | 32429,57 |
| Pomme | 17656,34 |
| Salade | 11927,08 |
| Blé | 10226,24 |
| Cerise | 8384,53 |

4.3. Identification des produits phytosanitaires les plus utilisés

Après avoir repéré les cultures les plus consommatrices en pesticides au niveau du territoire d'étude, nous sommes passés à l'étape d'identification des produits phytosanitaires les plus utilisés. Nous avons calculé en même temps les IFT totaux pour chaque produit utilisé suivi du calcul des quartiles de ces IFT (tableaux 29).

Tableau 29: IFT total par produit commercial au niveau de notre territoire (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Produits Commerciaux | Somme d'IFT parcelle | Produits Commerciaux | Somme d'IFT parcelle |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Morgan | 2110,09 | Aceta | 132,8 |
| Lanette | 1912,61 | Oxy Copper Blue | 131,5 |
| Cyprin 100 EC | 1672,11 | Dinat | 116,75 |
| Kosayed | 1541,85 | Oka | 107,77 |

⁴⁶ On peut définir les quartiles Q_1 , Q_2 , Q_3 comme des valeurs permettant de couper une population ordonnée en quatre groupes contenant chacun le même nombre d'éléments et ce sont des éléments homogènes.

| | | | |
|----------------------|---------|----------------------|--------|
| Imbacte | 1476,92 | Bio Agro | 107,68 |
| Round up | 1329,62 | Ringo | 106,92 |
| Sparfiro | 1315,63 | Bilice | 100,24 |
| Terminova | 1265,38 | Chlorcel | 95,01 |
| Dinadim blue | 1151,31 | Citrole | 91,18 |
| Fastak | 1012,78 | Cuivral | 79,14 |
| Alphathrin | 970,92 | Pistrine | 76,43 |
| Caodine | 861,1 | Koragen | 68,4 |
| Simonyle | 792,96 | Romectin | 67,93 |
| Talendo | 714,97 | Ticket | 56,72 |
| Koprokafaro | 677,77 | Stopper | 54,75 |
| Coragine | 670,92 | Dona | 49,41 |
| Zitanyl Combi | 640,53 | Pyrimite | 40,12 |
| Ekwichen bro | 577,97 | Rhodax | 32,45 |
| Tobsine | 441,4 | Kingsun | 30,45 |
| Afanet | 435,26 | Pyridol | 29,53 |
| Kadilac | 414,82 | Vicky | 29,18 |
| Faidit | 412,8 | Endura | 27,13 |
| Microloxe | 352,61 | Escartox | 27 |
| Forst | 288,09 | Merox 5G | 25,27 |
| Mosbilan | 286,76 | Savay | 18,98 |
| Nisorone | 251,78 | Gypson | 18,06 |
| Razzine | 247,43 | Ziflo | 14,83 |
| Difa | 233,9 | Actamyl | 14,07 |
| Danisarba | 202,86 | Ziram Granflo | 5,65 |
| Brifent | 149,53 | Basta | 1,63 |
| Cyclon | 137,19 | Alfa Tech | 0,65 |

Une fois le calcul de l'IFT total des parcelles réalisé, nous avons été amenés à calculer le Quartile des IFT. Le calcul du Quartile est nécessaire pour pouvoir repérer les produits commerciaux les plus utilisés dans notre zone d'étude (tableau 30).

Tableau 30: Calcul des quartiles des IFT totaux (Source : Travail Kanj F., 2016).

| Calcul Quartile des IFT total pour le choix des produits les plus utilisés dans notre zone d'étude | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Q0 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
| 0,65 | 52,08 | 137,18 | 655,72 | 2110,09 |

A la fin de cette démarche nous avons pu identifier **15 produits phytosanitaires les plus utilisés** comme le montre tableau 31 ci-dessous.

Tableau 31: Les noms des 15 produits phytosanitaires les plus utilisés (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Produit commercial | Somme d'IFT_P |
|---------------------------|--------------------------------|
| Morgan | 2110,09 |
| Lanette | 1912,61 |
| Cyprin 100 EC | 1672,11 |
| Kosayed | 1541,85 |
| Imbacte | 1476,92 |
| Round up | 1329,62 |
| Sparfiro | 1315,63 |
| Terminova | 1265,38 |
| Dinadim blue | 1151,31 |
| Fastak | 1012,78 |
| Alphathrin | 970,92 |
| Simonyle | 792,96 |
| Talendo | 714,97 |
| Koprokafaro | 677,77 |
| Coragine | 670,92 |

Cette analyse a conduit à connaître les cultures les plus consommatrices en pesticides et les produits les plus utilisés. Un croisement a été réalisé afin de faire ressortir les produits les plus utilisés sur les cultures les plus consommatrices des pesticides.

Avant de faire ce croisement nous avons identifié 6 cultures. Mais quand nous avons croisé les derniers résultats, 5 cultures seulement ont été retenues, il s'agit des cultures de : Pommes de terre, pommes, vignes, cerises et blé. Les salades n'ont pas été retenues car les produits phytosanitaires retenus comme les plus utilisés ne sont pas appliqués sur cette culture. En même temps, ce croisement nous a permis d'identifier 15 produits commerciaux, il s'agit de produits: Alphathrin, Coragine, Cyprin 100 EC, Dinadim Blue, Fastak, Impacte, Kopokafaro, Kosayed, Lanette, Morgan, Round up, Simonyl, Sparfiro, Talendo et Terminova.

Les matières actives qui composent les 15 produits identifiés comme les plus utilisés, ont été définies, afin de pouvoir vérifier la correspondance avec les cultures les plus consommatrices de pesticides, (tableau 32).

Tableau 32: Liste des produits phytosanitaires les plus utilisés, les noms des matières actives et le type des cultures traitées avec les valeurs des IFT totaux par culture au niveau du territoire d'étude (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Produits les plus utilisés | Matière Active | Blé | Cerise | Pomme | Pomme de terre | Vigne |
|----------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|----------------|---------|
| Alphathrin | Alfa Cypermethrine | 15,25 | 459,87 | 456,33 | NA | NA |
| Coragine | Alfa Cypermethrine | NA | 670,92 | NA | NA | NA |
| Cyprin 100 EC | Alfa Cypermethrine | NA | 15,58 | 181,30 | 1380,73 | NA |
| Dinadim blue | Dimethoate | NA | NA | NA | 1113,61 | NA |
| Fastak | Alfa Cypermethrin | NA | 0,54 | 280,13 | 669,54 | NA |
| Imbacte | Flutriafol | NA | 44,66 | 230,82 | NA | 1048,07 |
| Koprokafaro | Oxychloride de cuivre | NA | NA | NA | NA | 671,52 |
| Kosayed | Hydroxyde de cuivre | NA | NA | NA | 1520,91 | NA |
| Lanette | Methomyl | NA | NA | NA | 1083,94 | 241,33 |
| Morgan | Chlorpyrifos ethyl | NA | NA | 489,21 | 857,29 | 698,74 |
| Round up | Glyphosate | 499,73 | NA | NA | NA | 774,42 |
| Simonyle | Cymoxanil | NA | NA | NA | 792,96 | NA |
| Sparfiro | Lamda Cyhalothrin | NA | 45,18 | 971,66 | NA | 102,47 |
| Talendo | Proquinazid | NA | NA | NA | NA | 714,97 |
| Terminova | Chlorpyrifos ethyl | NA | 1,60 | 808,18 | NA | 448,28 |

Tableau 33: Les matières actives retenues et les cultures correspondantes (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Matière Active | Cultures |
|------------------------------|--|
| Alfa cypermethrin | Pomme de terre, pomme et cerise |
| Dimethoate | Pomme de terre |
| Flutriafol | Pomme, cerise et vigne |
| Oxychloride de cuivre | Vigne |
| Hydroxide de cuivre | Pomme de terre |
| Methomyl | Pomme de terre et vigne |
| Chlorpyrifos ethyl | Pomme, pomme de terre, vigne et cerise |
| Glyphosate | Blé et Vigne |
| Lamda cyhalothrin | Pomme, cerise et vigne |
| Proquinazid | Vigne |

Le résultat ci-dessus a permis d'établir des tableaux qui contiennent :

- Les cultures retenues
- Les matières actives retenues
- Les doses homologuées
- Les doses appliquées

- La concentration de la matière active

Ces données sont indispensables pour calculer la quantité de la matière active appliquée D'après les calculs effectués, on a obtenu les résultats qui figurent dans le tableau 34 ci-dessous:

Tableau 34: Quantité moyenne des MA les plus utilisés par les cultures choisies (Source : travail de Kanj F. 2016).

| Matière Active | Culture | Quantité moyenne de la [MA] (kg/ha) | Matière Active | Culture | Quantité moyenne de la [MA] (kg/ha) |
|--------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|
| Alfa Cypermethrin | Pomme de terre | 0,028 | Glyphosate | Vigne | 0,25 |
| Alfa Cypermethrin | Cerise | 0,029 | Hydroxyde de cuivre | Pomme de terre | 0,41 |
| Alfa Cypermethrin | Pomme | 0,018 | Lamda Cyhalothrin | Cerise | 0,131 |
| Chlorpyrifos ethyl | Cerise | 0,088 | Lamda Cyhalothrin | Pomme | 0,084 |
| Chlorpyrifos ethyl | Pomme | 0,072 | Lamda Cyhalothrin | Vigne | 0,046 |
| Chlorpyrifos ethyl | Vigne | 0,075 | Methomyl | Pomme de terre | 0,241 |
| Cymoxanil | Pomme de terre | 0,467 | Methomyl | Vigne | 0,265 |
| Dimethoate | Pomme de terre | 0,231 | Proquinazid | Vigne | 0,052 |
| Flutriafol | Cerise | 0,083 | Tetraconazole | Pomme | 0,041 |
| Flutriafol | Pomme | 0,074 | Tetraconazole | Pomme de terre | 0,074 |
| Flutriafol | Vigne | 0,065 | Tetraconazole | Vigne | 0,043 |
| Glyphosate | Blé | 0,24 | Oxychloride de cuivre | Vigne | 0,12 |

Nous avons obtenu ainsi les quantités appliquées des matières actives retenues qui vont servir un input pour alimenter le modèle. Cette partie sera détaillée dans le chapitre 9 de la partie III.

Conclusion du chapitre 5

Les éléments de la méthode présentée dans ce chapitre mettent en évidence l'utilité de la typologie spatiale des systèmes de production dans le choix des exploitations agricoles à enquêter d'une part, et l'utilité de l'indicateur de fréquences de traitement (IFT) comme outil de diagnostic et d'aide au choix des cultures les plus consommatrices en pesticides et les produits les plus utilisés au niveau d'un territoire d'autre part.

Le calcul d'indicateur de fréquences de traitement IFT moyen par hectare et IFT total nous a permis dans un premier lieu d'obtenir les cultures les plus consommatrices de pesticides et dans un deuxième lieu d'identifier les produits phytosanitaires les plus utilisés au niveau de notre territoire. Ainsi, l'identification des cultures les plus consommatrices de pesticides et les produits les plus

utilisés au niveau de la zone d'étude permettra par une combinaison de distinguer quels sont les matières actives les plus fréquentes sur les cultures les plus consommatrices de pesticides.

A partir des caractéristiques de ces matières actives, nous allons procéder à analyser l'évaluation du risque de transfert des pesticides les plus utilisés au niveau de notre territoire à partir du modèle PEARL. De ce fait, cette démarche méthodologique montre la préparation du travail de modélisation qui a comme objectif d'évaluer le risque de devenir des produits phytosanitaires afin d'aider à prendre des décisions et de proposer des éléments stratégiques de réduction de la pollution diffuse. La démarche de modélisation est présentée dans le chapitre suivant.



Figure 41: Discussion avec un agriculteur lors de notre première visite de terrain en présence de M. Bord J-P, M. Le Grusse P. et M. Darwich S. (Source: visite de terrain, 2015)

CHAPITRE VI

DESCRIPTION DU MODÈLE PEARL

La capacité des modèles à pouvoir simuler de manière satisfaisante le comportement réel des pesticides dans l'environnement nécessite la validation des modèles avec des données de terrain. Ce type d'évaluation de modèle est plus intéressant car il permet d'estimer si le modèle est capable de représenter correctement la réalité telle qu'observée sur le terrain (Bergstrom and Jarvis, 1994 ; Walker *et al.*, 1995 ; Klein *et al.*, 1997 ; Vanclooster *et al.*, 2000). C'est dans ce sens que la direction générale de la commission européenne de la recherche a financé le projet «Assessing the Predicted Environmental Concentration Of Pesticide (APECOP)» (Vanclooster *et al.*, 2008).

Ce projet a pour objectif d'améliorer les concepts de modélisation pour la lixiviation des pesticides dans les eaux de surface et souterraine, la rétention des pesticides dans le sol et les scénarios climatiques. L'outil qui a fait l'objet du projet « APECOP » est le modèle PEARL. Ce modèle est reconnu comme un outil officiel de procédure d'homologation des pesticides en Europe. La validation de ce modèle a été faite sur deux sites différents, l'un situé dans les Pays-Bas (Vredepeel) et l'autre en Suède (Lanna) (Bouraoui, 2007).

Le modèle a été validé également en utilisant les paramètres suivants :

- Le paramètre de réduction de l'évaporation est de 2 mm;
- La longueur de dispersion est fixées à 5 cm;
- La profondeur moyenne du niveau d'eau souterraine a été fixée à 1 m, la valeur du coefficient est optimisée à -0.0112 m/j et celle de l'exposant est de -2.5 l/m.

Dans le cas de notre étude, l'utilisation du modèle PEARL n'est pas de le calibrer (étape citée dans les perspectives), mais plutôt de comprendre le devenir des matières actives dans l'environnement notamment dans le sol et les eaux souterraines. Cependant, l'objectif de ce modèle est d'étudier le devenir des PP des 5 cultures les plus consommatrices des PP au niveau du Caza de Zahlé dans les différents types de sol. Ceci afin, de pouvoir gérer éventuellement le risque de ces produits sur la qualité du sol et les eaux souterraines et plus généralement sur la durabilité des systèmes de production.

Pour atteindre notre objectif et pour bien comprendre le fonctionnement du modèle PEARL, ce chapitre vient décrire toutes les étapes de manipulations de ce modèle en citant tous les paramètres que nous avons utilisés afin de les faire fonctionner.

1. Description du modèle PEARL

Le modèle PEARL (*Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales*) est un modèle dynamique, unidimensionnel, à plusieurs couches qui décrit la transformation des produits phytosanitaires pertinents dans le système sol-plante-eau. Ce modèle décrit alors une liaison entre les trois phases (sol, plante et eau) par le biais des différents processus : état du flux d'eau,

évapotranspiration d'eau de la surface du sol, assimilation d'eau par les racines... Les pesticides peuvent pénétrer dans le système par l'application directe sur la culture ou par contact avec le sol et à partir de ce moment, des transformations commencent à apparaître (figure 42).

Le modèle PEARL est composée d'une part d'un modèle SWAP (Soil, Water, Atmospher, Plant) et d'autre part d'un modèle PEARL qui traite l'évaluation des pesticides. Il permet donc:

- de simuler la lixiviation des produits phytosanitaires à des profondeurs supérieures à 1 m;
- de décrire les fluctuations des nappes phréatiques après l'apport des pluies;
- de donner également les quantités transformées des matières actives dans la phase liquide et dans le sol.

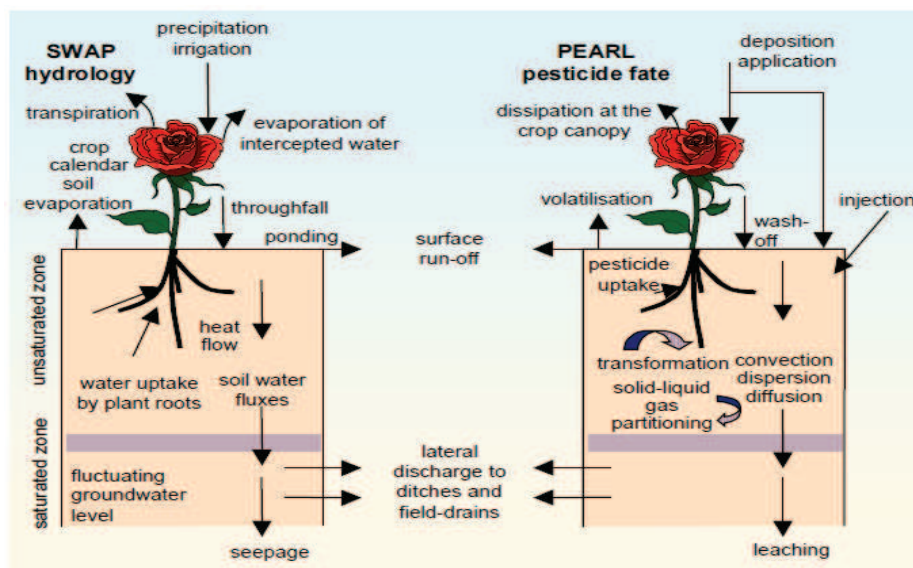


Figure 42: Aperçu du processus inclus dans le modèle PEARL et SWAP (Source : Tiktak A. *et al.*, 2003, RIVM report)

Par ailleurs, le sol est représenté par une succession de couches ayant des propriétés physico-chimiques homogènes. Le processus de l'écoulement d'eau et de soluté dans le sol est calculé par l'équation de Richard⁴⁷. Le flux thermique dans le sol est décrit par la loi de Fourier⁴⁸ et il dépend

⁴⁷ $C_s \delta h_w / \delta t = \Delta(kw(s) \Delta h_w)$
 Avec: $C(s) = \delta \Theta_w / \delta h_w$ le coefficient d'emmagasinement
 $\Theta_v = n s_{nw}$ le teneur en eau volumique
 n la porosité
 s_{nw} le degré de saturation

⁴⁸ Enoncé de la loi de Fourier : « La loi de Fourier (1807) décrit le phénomène de conductivité thermique, c'est-à-dire la description de la diffusion de la chaleur à travers un matériau solide ». L'équation de la loi de Fourier s'écrit :

$$\text{Flux de chaleur (flux)} = \text{conductivité thermique (I)} \times \text{surface de contact (m}^2\text{)} \times \text{gradient de température (}^\circ\text{C/m)} \text{ OU } \text{flux} = I * S * \text{grad T}$$

Avec : Le flux de chaleur est exprimé en Watts ; la surface de contact est exprimée en m² ; la conductivité thermique (symbolisée I) traduit l'aptitude à conduire la chaleur, exprimée en Watt/(m.°C) ; et le gradient de température est une grandeur vectorielle indiquant la façon dont la température varie dans l'espace, exprimée en °C/m.

du temps de la diffusion dans les profondeurs du sol. L'évapotranspiration de l'eau du sol et la transpiration des plantes sont calculées par la multiplication d'un taux d'évapotranspiration de référence avec le sol et les facteurs de culture. Quant à la croissance des cultures, elle est simulée avec le modèle simple (scénarios FOCUS 2001). Les principaux processus qui parviennent dans le sol se résument comme suit (figure 43).

La sorption/désorption peut être simulée par les isothermes de Freundlich selon deux équations (équilibre instantané et cinétique de premier ordre), l'équation de convection / dispersion et le passage liquide-gaz sont simulés par loi de Henry⁴⁹. Le taux de transformation des produits phytosanitaires dépend de la teneur en eau, de la température et de la profondeur du sol.

Dans cette partie, seuls les processus qui permettent la compréhension du modèle sont décrits. Il est à noter que la vue d'ensemble du modèle PEARL est fournie par Tiktak (2000) et Leistra (2001) et la description du modèle SWAP est basée sur la réflexion de Van Dam (2000).

⁴⁹ Henry qui établit à l'équilibre les concentrations en gaz dissous dans un liquide s'écrit :

$$x_i = \frac{p_i}{H_i}$$

Avec :

x_i : fraction molaire du gaz "i". C'est le rapport du nombre de moles de gaz "i" au nombre total de moles de la solution. Même pour une eau assez fortement minéralisée on peut déterminer que ce nombre est peu différent de $N_T=55,6 \text{ mol.L}^{-1}$: nombre de moles d'eau contenues dans un litre d'eau.

p_i : pression partielle du gaz "i" dans la phase gazeuse égale au produit de la pression totale de la phase gazeuse par la fraction représentative de la composition volumique (ou molaire).

H_i : constante de Henry du gaz "i". Cette "constante" est fonction de la température et présente un maximum (qui correspond au minimum de solubilité) qui est fonction du gaz : vers 100 °C pour l'oxygène et l'azote, 130 °C pour le dioxyde de carbone

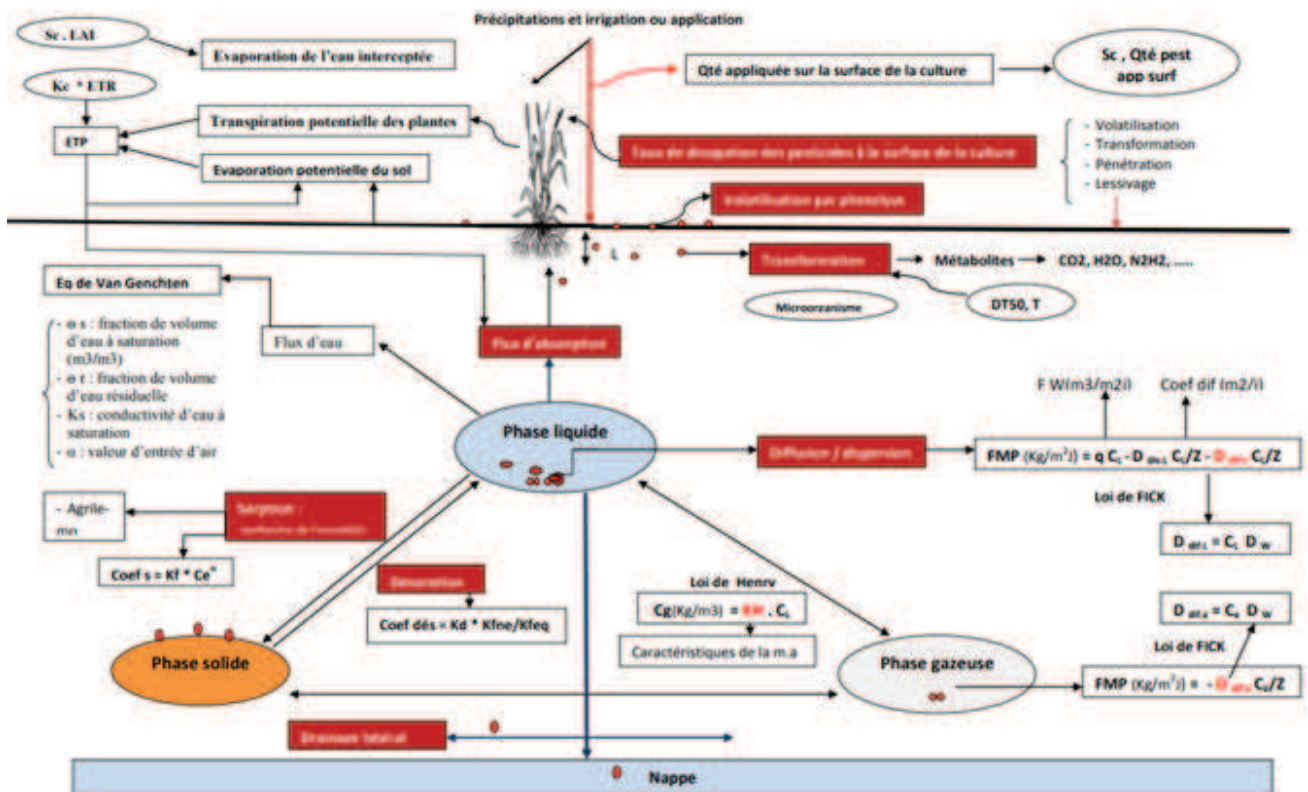


Figure 43: Représentation conceptuelle des différentes paramétrisations employées par le modèle PEARL (Source: Salah, 2012)

1.1. Hydrologie : le modèle SWAP

Le modèle de SWAP (Van Dam, 2000) utilise une méthode mathématique appelée « différences finies » pour résoudre l'équation de Richard. Les propriétés hydrauliques sont décrites par des fonctions de forme fermées comme cela a déjà été proposé par Van Genuchten (1980) (voir partie II, chapitre 2).

La limite supérieure du modèle est utilisée pour interagir avec l'atmosphère et est située dans la partie supérieure de la plante (figure 24). Les flux de précipitations quotidiennes sont saisis dans le modèle; le taux d'évapotranspiration de référence est calculé à partir des données climatiques (température journalière et rayonnement solaire journalier) (Makkink, 1957).

- La limite inférieure du système est utilisée pour interagir avec le système des eaux souterraines à une profondeur de 6 à 14 m sous la surface du sol.
- La limite latérale du système est utilisée pour interagir avec les systèmes d'eau de surface locale.

Dans ce modèle, nous envisageons cinq classes différentes de systèmes de drainage locaux.

Les trois premières classes de ces derniers ont été utilisées pour la simulation de déversement dans les systèmes d'eau de surface primaires, secondaires et tertiaires (figure 24). La définition de ces classes peut être déduite à partir des cartes topographiques de la zone d'étude. Le quatrième réseau de drainage est utilisé pour calculer le drainage des tubes à décharge rapide et le cinquième réseau est utilisé pour le calcul du drainage à la surface du sol. La nécessité de définir les différents niveaux de flux d'une manière séparée permet de calculer le temps de persistance des pesticides étudié dans la zone saturée.

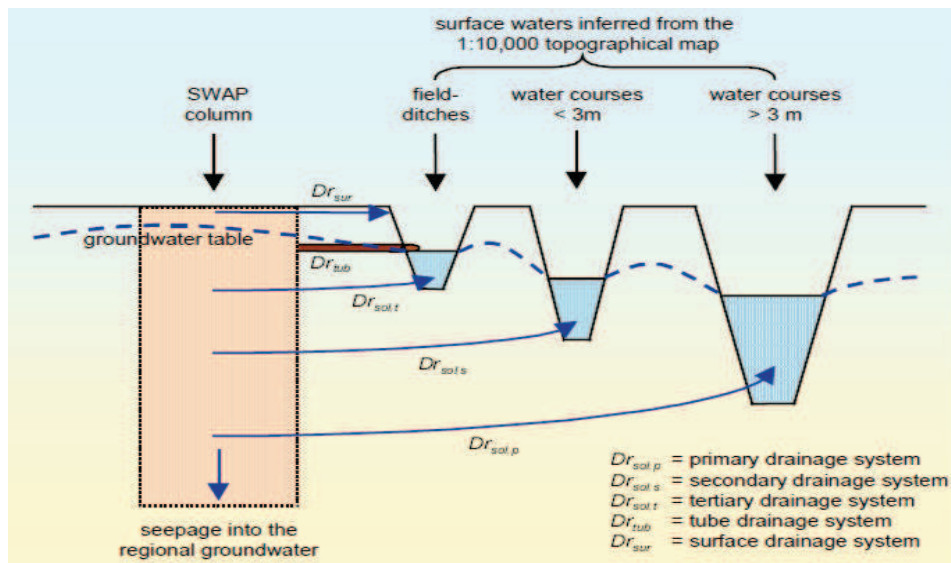


Figure 44: La relation entre les eaux de surface déduite de la carte topographique (1: 10 000) des Pays-Bas et les systèmes de drainage dans SWAP (Source : Tiktak A. *et al.*, 2003, RIVM report)

1.2. L'avenir des pesticides

Le modèle PEARL est considéré comme un système sol où les pesticides et les métabolites pertinents résident dans deux domaines « équilibre » et « non-équilibre ».

Le domaine « équilibre » est subdivisé en trois phases : une phase adsorbée, une phase dissoute et une phase gazeuse.

La sorption dans le domaine d'équilibre est décrite par l'isotherme de Freundlich. Le coefficient de Freundlich est calculé à partir du coefficient de distribution de la substance sur la matière organique et l'eau (Boesten et Van der Linden, 1991).

Le modèle PEARL contient une description de la sorption des acides faibles qui est dépendante du PH des produits (Leistra 2001; Tiktak, 2000; Van der Linden, 2001).

Tandis que l'absorption de pesticides vers les sites non-équilibrés est décrite par une équation de vitesse de premier ordre.

Le cloisonnement du pesticide entre la phase gazeuse et la phase liquide est décrit par la loi de Henry. La transformation de pesticides est décrite avec une équation de vitesse du premier ordre et

un certain nombre de facteurs de réduction, qui représentent l'influence de la température, l'humidité du sol et la profondeur dans le sol.

La version de PEARL contient en outre un certain nombre de fonctions de pédo-transfert, qui font de la demi-vie de référence dépend de la teneur en matière organique, la teneur en argile et le pH. L'absorption de pesticides est proportionnelle à l'absorption d'eau dans les racines et à la transpiration empirique des facteurs de concentration.

La condition initiale pour le modèle est définie par le profil de la concentration des pesticides dans le domaine d'équilibre et non-équilibre du système du sol.

Initialement, le sol est considéré sans pesticide. Le modèle PEARL est composé de plusieurs options pour l'application des pesticides (à savoir la pulvérisation à la surface du sol, la pulvérisation à la culture canopée, l'injection et l'incorporation par le labour). A la limite inférieure du système du sol, les flux de dispersion et de diffusion de pesticides sont supposés nuls. Dans le cas d'infiltration d'eau à partir d'une nappe profonde, la concentration du pesticide est mise à zéro.

Le flux de pesticide dans la phase liquide du sol est décrit par une équation comprenant la convection, la dispersion et la diffusion.

Le flux de pesticide dans la phase gazeuse est décrit par la loi de Fick. Le déchargement latéral des pesticides est pris proportionnel au flux d'eau rejetés par le système de drainage. Cela implique que l'on suppose que les gradients de concentration dans la direction latérale sont négligeables (pas de diffusion / dispersion).

Des analyses numériques par Duffy et Lee (1992) ont montré que cette condition est valable pour $L_d / d_{aq} > 10$ où L_d est la distance entre les canaux de drainage et d_{aq} est l'épaisseur de l'aquifère.

2. Description de la procédure d'utilisation du modèle PEARL

L'interface du modèle PEARL est constituée de 2 parties :

- **Brows runs** permet de créer un fichier ou un projet de travail en utilisant le commande (+),
- **Edit runs** permet d'introduire, d'éditer ou de modifier les données des 5 différents volets à savoir : scénario, contrôle de simulation, contrôle de sorties, modules hydrologiques SWAP et l'état de fonctionnement.

2.1. Volet « Scénario »

Il contient des tables d'informations générales sur le site de l'étude (nom, altitude, sol, climat, eaux souterraines locales et régionales), le calendrier cultural, les programmes d'irrigation et les caractéristiques des matières actives.

2.1.1. Table sol

Nous pouvons accéder à cette table par l'onglet « location ». La table sol se compose de deux parties. La partie supérieure **Brows Soil** Profils pour ajouter ou modifier les paramètres du profil du sol (nom du sol, densité apparente) dans son ensemble. Dans la partie inférieure par **Brows Horizons** in the Soil Profiles nous introduisons les propriétés des horizons du sol. Chaque horizon doit comporter le numéro, l'épaisseur et le nombre des couches de l'horizon (Annexe 6).

Le nombre maximum d'horizons du sol est fixé à 10 et le nombre maximum des couches est fixé à 500.

Dans le modèle PEARL, les horizons sont divisés en couche de faibles épaisseurs afin d'obtenir une meilleure simulation de pesticides dans le sol. Il est demandé de faire rentrer une épaisseur de 2.5 cm pour les 30 premiers cm du sol, puis d'augmenter l'épaisseur des couches à 5 cm pour une profondeur allant de 30 à 100 cm et enfin une épaisseur de 10 cm pour une profondeur supérieure à 1 m (figure 27).

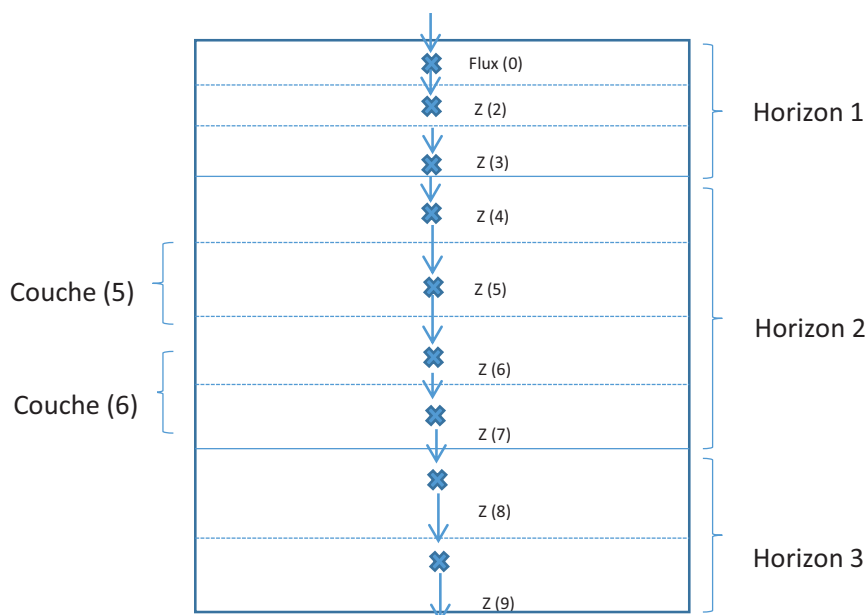


Figure 45: Découpage vertical des horizons du sol dans le modèle PEARL

Au niveau de l'onglet « propriétés physiques du sol » et dans la table **Edit Soil Building Block**, chaque horizon du sol doit être spécifié par la distribution verticale de la texture (sable, limon et argile), la teneur en masse en matière organique (mo), la densité apparente et le PH. On doit également introduire les paramètres hydrologiques de Van Genuchten (1980).

2.1.2. Table données climatiques

Dans cette table nous devons définir le code, le nom et les coordonnées géographiques de la station météo au sein de la zone d'étude. La base de données climatique doit contenir des informations

journalières sur la pluviométrie, la vitesse du vent, la température maximale et minimale de l'air, la radiation solaire, l'humidité de l'air et l'évapotranspiration potentielle. Cette dernière peut être calculée soit par les différentes méthodes disponibles dans la cellule (Makkink et Penman-Monteih), soit elle est introduite.

A défaut de la disponibilité de données nécessaires (la vitesse du vent et l'humidité de l'air) pour le calcul de l'évapotranspiration (ETP) par la méthode de Penman-Monteih, PEARL propose une autre méthode qui utilise les données suivantes : la température (minimale et maximale), la radiation solaire et les précipitations, il s'agit de la méthode de Makkink (1957)⁵⁰. En partant des exigences du modèle PEARL, nous avons importé les données climatiques (Import data) à partir d'un fichier de format « txt ». Ce dernier doit porter le même nom que la station définie dans la table des données météo et une extension .Met (Figure 28), ex : ZAH-M.met.

La radiation journalière est calculée à partir du rayonnement global mesuré directement dans la même station selon la méthode FAO (1979) :

$$R_s = (a + b n_p/100) R_a$$

Avec :

R_s : radiation solaire (MJ/m²/j),

R_a : radiation solaire à la limite de l'atmosphère (MJ/m²/j),

a et b : deux constantes qui dépendent de type de climat.

n_p : pourcentage (en durée) de l'insolation journalière (%), calculé en fonction de la durée totale d'insolation en heures (n) et de la longueur de la journée

L'équation de Makkink s'écrit comme suit (Tiktak *et al.*, 2000) :

$$ET_{p0} = f_c ET_r$$

Avec :

f_c : facteur des cultures

ET_r : Evapotranspiration de référence (m/j)

Néanmoins, il faut noter que l'utilisation de la méthode Makkink peut conduire à une sous-estimation de l'évapotranspiration.

⁵⁰ Introduire la notion de méthode de Makkink

2.1.3. Table calendrier culturel

Cette fenêtre du calendrier de la culture **Crop calendar** (annexe 6), détermine les cultures avec leurs stades de développement (les dates de levée et de la récolte). Il est nécessaire de spécifier si le calendrier de la même culture s'applique de la même façon toutes les années. Dans ce cas, nous allons cocher sur **Repeat Crop Calendar**; si le calendrier des cultures est variable chaque année, on doit sélectionner dans la cellule **variable**.

Dans la sous table **Crop**, nous ajoutons:

- Les cultures en cliquant en bas à droite sur le bouton (+),
- Les paramètres des cultures (utilisation de l'eau des cultures) : on doit fournir l'extraction racinaire en eau à différents niveau d'eau du sol (sol saturé, ressuyé et au point de flétrissement). Si la donnée existe en potentiel capillaire (pF), il faut la convertir en pression d'eau $h \text{ (cm)} = 10^{-pF}$,
- Coefficient d'extinction pour la radiation solaire : ce coefficient est fixé par le modèle selon la culture choisie.

The screenshot shows the 'FOCUSPEARL 4.4.4 - Crops' window. It is divided into two main sections: 'Browse Crops' and 'Edit Crop'.

Browse Crops: A table with columns 'Crop Code' and 'NAME'. The rows are: POMME (Pomme), POMMEDETER (Pomme de terre), POTATOES (Potatoes), SOYBEAN (Soybean), SPCEREALS (Spring cereals), and STRAWBER (Strawberries). A 'Copy' button and navigation icons are at the bottom.

Edit Crop: Fields for 'Crop code:' (POMME) and 'Name:' (Pomme). Parameters include: Anaerobiosis point (cm): -10; Wet reduction point (cm): -25; Higher dry reduction point (cm): -500; Lower dry reduction point (cm): -800; Wilting point (cm): -16000; Extinction coef. for solar radiation (-): 0.39; Minimum canopy resistance (s m-1): 70; Const. in eqn. for water interception (cm): 0.0001; Depth of (virtual) tensiometer (m): 0.2. There are also fields for 'Temperature sum' (Start value, emergence - anthesis, anthesis - maturity) and buttons for 'Root density...' and 'Comments...'. 'Close' and 'Help' buttons are at the bottom.

Figure 46: Table des paramètres de la culture (Source : Modèle PEARL)

Au niveau de la sous table **Stages** (figure 31), les propriétés dynamiques des cultures telles que l'indice foliaire (LAI) et la profondeur d'enracinement sont introduites en fonction des différents stades de développement. Le modèle PEARL fixe 3 phases par défaut : la phase de développement au stade de levée à laquelle nous attribuons la valeur « 0 », la phase de floraison

avec la valeur 0.5 et enfin la phase de la récolte avec la valeur de « 1 ». Le modèle permettra également de normaliser la distribution de la densité racinaire à 1.

2.1.4. Table substances actives

Elle est accessible par la page principale (en bas à droite). Pour ajouter une substance, le principe est le même que les paramètres ajoutés précédemment c'est-à-dire cliquer sur la commande (+) dans le navigateur. Cette table regroupe 5 catégories d'informations sur les propriétés des composés actifs (annexe 6):

- Onglet caractéristiques **générales** sur la substance : on introduit le code et le nom de la substance, la masse molaire, la pression de vapeur à saturation et la solubilité dans l'eau ;
- **La sorption de Freundlich** dépend de la nature des sols (argile et la matière organique),
- **La transformation** : nous devons spécifier la demi-vie des substances, par la suite **Transformation Scheme** pour simuler les substances filles qui se forment dans le sol à partir de la transformation des substances mères. Cette étape peut être ignorée s'il n'y a qu'un composé (substance mère) simulé, alors nous cochons la case **Parent**,
- **La diffusion** : cette catégorie nous renseigne sur les coefficients de diffusion de référence dans l'eau et dans l'air (figure 33),
- **Crop** spécifie les processus de la substance sur le végétal (volatilisation, pénétration, transformation et la demi-vie). Si l'information n'existe pas nous devons choisir **lumped**.

Pour revenir à la page principale où nous allons introduire le calendrier d'application des substances dans le table d'application, nous allons cliquer sur **Close**.

2.1.5. Table Application

Le programme d'application des pesticides peut être répété chaque année ou tous les deux ans, en utilisant l'option **Repeat interval for application events**.

Pour créer un programme d'application, nous devons procéder comme suit (figure 36) :

- Cliquer sur le bouton (+) pour ajouter un événement ou copier un événement existant,
- Remplir un code et un nom dans la boîte (côté gauche de la fenêtre),
- Dans la partie inférieure (côté droit de la fenêtre), l'application doit être mieux définie,
- Cliquer sur la commande (+) pour ajouter une application dans la zone des applications,
- Définir le type d'application : application à la surface des sols, injections, incorporation, application sur la culture et la quantité interceptée doit être spécifiée et enfin application sur la culture.
- Remplir la date d'application et le dose (kg /ha).
- Faire des copies d'une application existante par le bouton Copy. Cela est particulièrement pratique si nous voulons changer uniquement la date d'application.

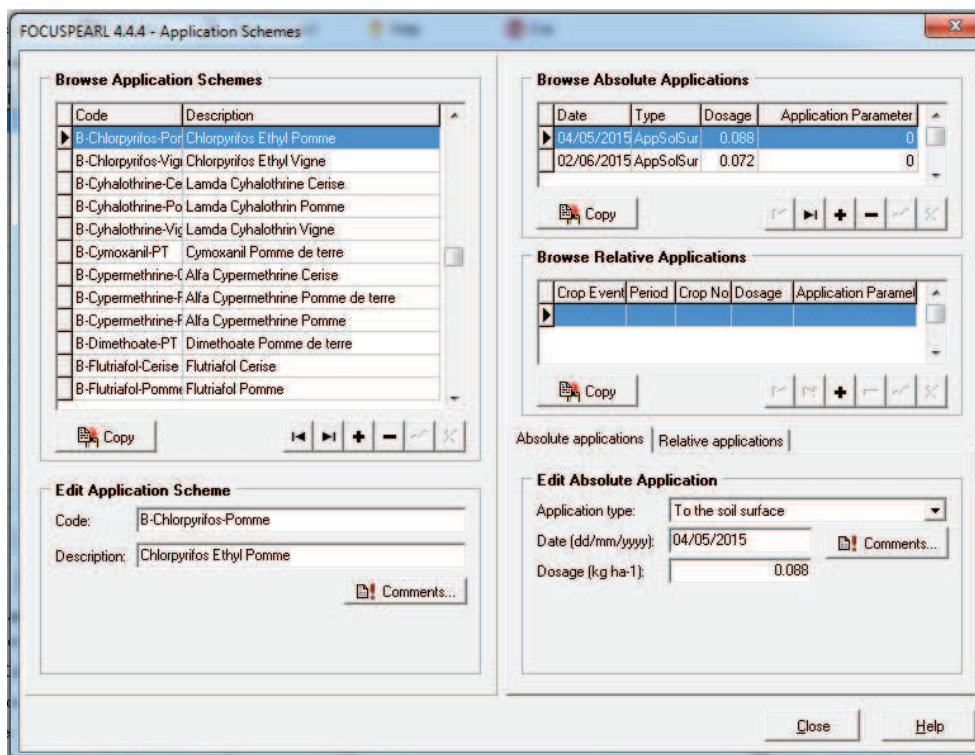


Figure 47: Table du programme d'application des substances actives (Source : Modèle PEARL)

2.2. Volet « Simulation control »

C volet nous permis de définir la période de simulation de notre analyse. En ce qui concerne notre analyse nous avons définir la période de simulation sur une année du 1/1/2015 jusqu'au 31/6/2016.

2.3. Volet « SWAP Hydrological Modul »

Il renseigne sur les paramètres de contrôle du module d'hydrologie SWAP (Annex figure 38).

Pour exploiter les volets hydrologie et hydraulique, nous disposons des données : teneurs en eaux drainées latéralement, profondeur des drains et profondeur de la nappe souterraine. Ces données nous permettent de déduire la quantité de produits phytosanitaires perdus dans les drains.

Avant d'exécuter le modèle, il fallait définir les paramètres de la sortie :

- Choisir le format du temps depuis le début de la simulation, soit en jour ou en année;
- Choisir la sortie des données (jour, décade, année);
- Définir l'épaisseur maximale de la simulation (1 m);
- Cocher la case du **detailed output** si nous voulons le détail du rapport.

En cliquant sur **Detailed output option**, nous ouvrons le formulaire des variables, constitué de 3 parties (figure 48):

- Dans la partie supérieure, nous pouvons parcourir et sélectionner les catégories disponibles ;

- Dans la partie inférieure à gauche du formulaire, nous allons parcourir et sélectionner les différentes variables dans une catégorie.
- Dans la partie inférieure à droite du formulaire, nous pouvons sélectionner et voir les profondeurs du sol prévues pour la sortie.

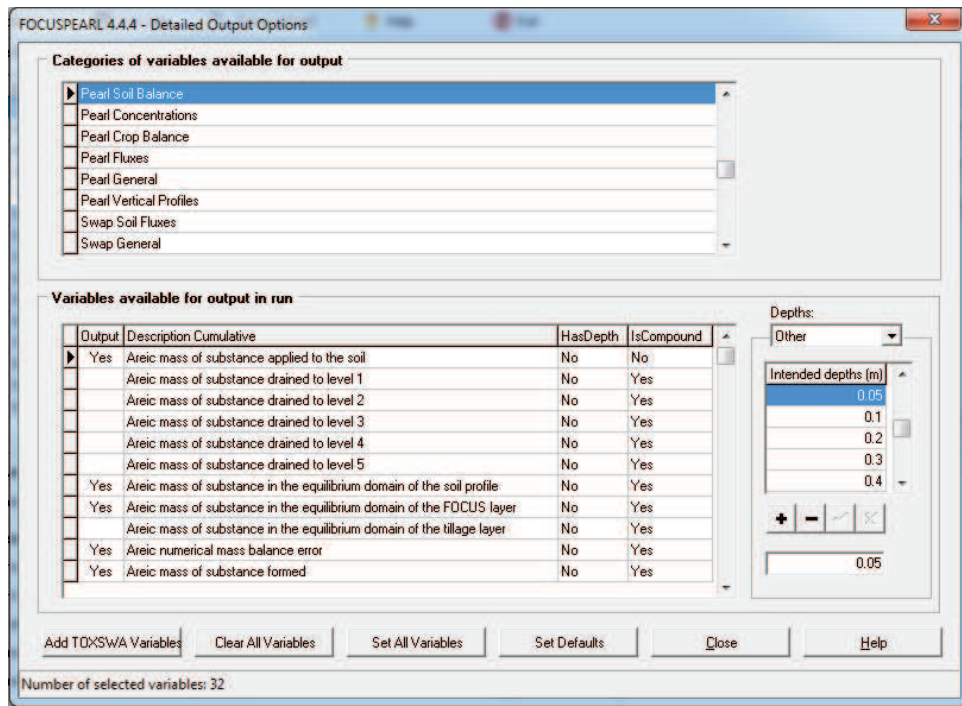


Figure 48: Table des catégories et variables de sorties (Source : Modèle PEARL)

Pour faire exécuter le modèle, il faut d'abord activer le formulaire principal et sélectionner par une double clic le fichier ou le projet à faire exécuter. Par la suite, il faut cliquer sur **Calculate** qui apparaît sur la barre d'outils. Une fenêtre des résultats en cours de simulation apparaît. Le temps de calcul peut être réduit en diminuant soit le nombre de variables sélectionnées pour la sortie, soit le nombre de profondeurs du sol à faire ressortir. Une fois l'exécution du modèle terminée, l'état d'exécution est affiché dans les **colonnes du projet** de la feuille principale comme suit:

- **Not there** : quand le modèle n'a pas été exécuté ou quand l'utilisateur a supprimé les fichiers de sortie.
- **Erreur** : une erreur s'est produite. Les détails peuvent être vus dans le volet **Run Status** de la feuille principale.
- **Available** : le modèle a été exécuté avec succès et la sortie du modèle est disponible pour d'autres traitements (ex : graphique).

La visualisation des résultats peut se faire depuis la feuille principale :

- En cliquant sur **view**, il permet de donner le résumé et les détails de la simulation;

- En cliquant sur l'onglet **graphs predefined**, celui-ci permet de visualiser les graphes prédéfinis sur le bilan des produits des phytosanitaires dans le sol (figure 41).

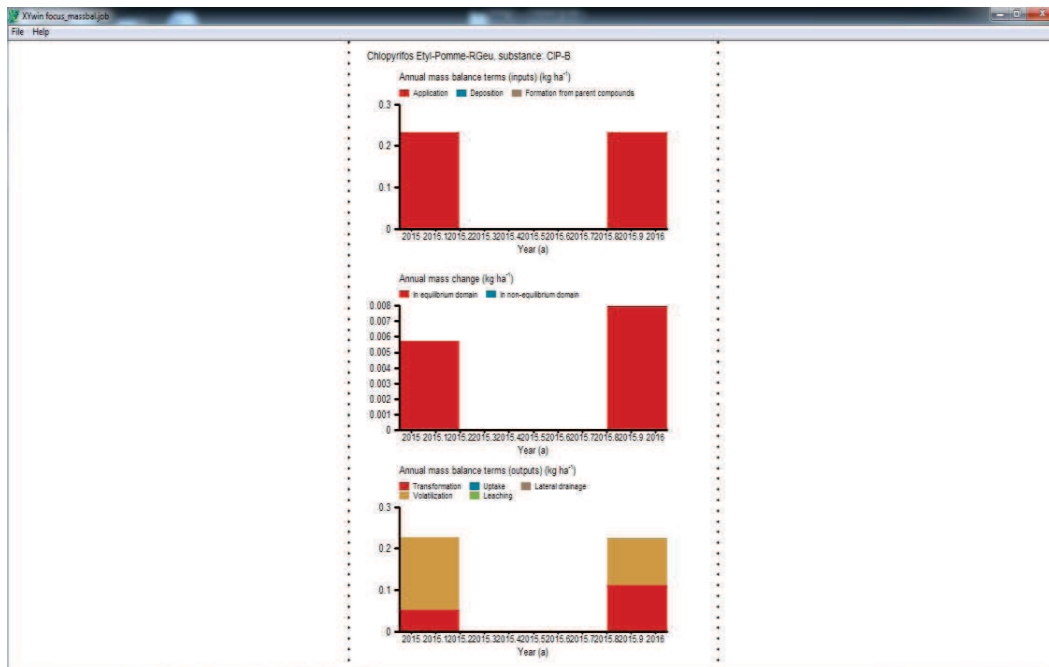


Figure 49: Résultat prédéfini du compartiment eau (Source : Modèle PEARL)

- En cliquant sur l'onglet **graphs users defined**, ceci permet de visualiser les graphes choisis. Par ailleurs, ce module permet d'exporter les données des résultats « **Export file** » vers un autre fichier de type « txt ».

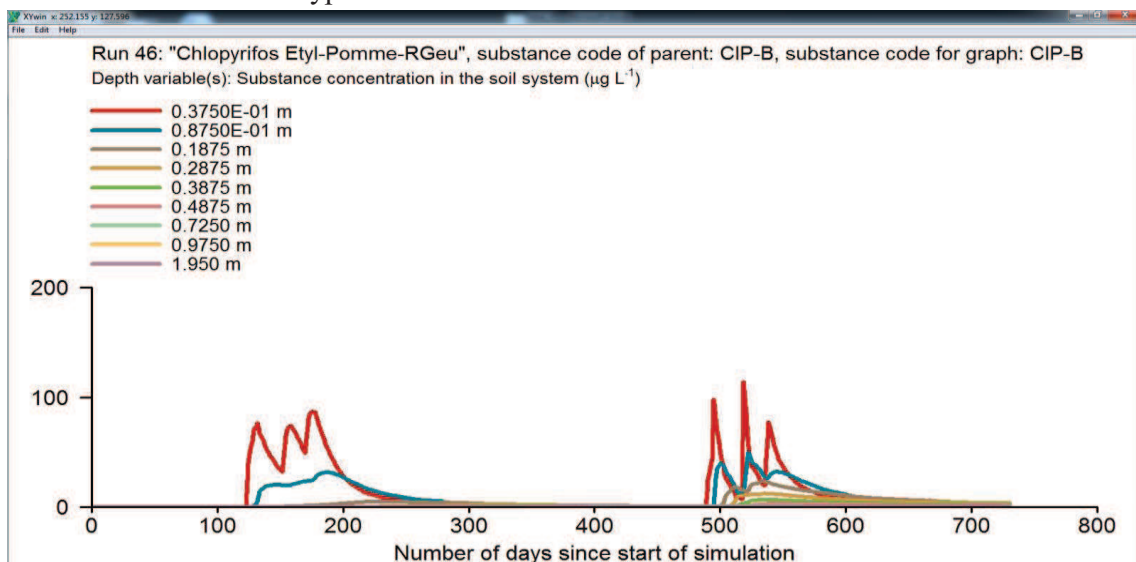


Figure 50: Exemple de résultat des graphes choisis (Source : Modèle PEARL)

3. Paramètres et variables d'entrées dans PEARL

Avant de définir et de détailler les paramètres et les variables d'entrée simulés par PEARL, il est important de définir la signification de quelques termes techniques utilisés par le modèle:

- **La capacité au champ** (wet reduction point): c'est la teneur en eau qui reste dans le sol après ressuyage.
- **Le point de flétrissement (wilting point)**: c'est la teneur en eau non extractible par les racines.
- **La force de rétention**: généralement, la force de rétention du sol pour l'eau s'exprime, soit en bar « s », soit en kilo pascals « kpa », soit par son logarithme, cette force est exprimée en centimètre d'eau et elle s'exprime par le symbole **pF**.

A titre d'exemple :

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ Kpa} = 1000 \text{ cm d'eau} = \text{pF } 3$$

$$1/10 \text{ bar} = 10 \text{ Kpa} = 100 \text{ cm d'eau} = \text{pF } 2$$

La teneur en eau à la capacité au champ correspond à une pression de succion de 1/3 et au point de flétrissement elle correspond à une pression de succion de 15 bars.

$$\text{pF} = \log (-P_{\text{eau}}/\rho g * 100)$$

pF: Le potentiel de capillarité est le log de la pression de succion exprimée en cm

Avec :

pF : potentiel de capillarité

P_{eau} : pression de l'eau par rapport à la pression atmosphérique (mce)

ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s²)

- **Le coefficient de dispersion**: il permet de caractériser la dispersion des pesticides dans le sol.
- **Lixiviation** : c'est l'entraînement des substances actives dans l'eau vers les horizons de profondeur.
- **Le coefficient d'extinction** (extinction coef for solar radiation): il est dû à la diffusion moléculaire (ou diffusion de Rayleigh) s'écrit comme suit (Yaiche et Bekkouche, 2008) :
-

$$\text{Mc.L} = \beta - (1)$$

Les valeurs de β et c dépendent de la nature des particules causant la diffusion. La part de rayonnement solaire diffusé par les constituants de l'atmosphère (molécules et aérosols) n'est pas entièrement perdue comme c'est le cas de l'absorption. Elle est en partie récupérée au sol. (Yaiche et Bekkouche, 2008).

- **L'indice foliaire (LAI):** est une variable clé pour l'étude du fonctionnement des surfaces végétales car elle conditionne les échanges de carbone et de l'eau avec l'atmosphère (Duthoit, 2006).
- **Enthalpie molaire de dissolution (kJ/mole) :** est l'énergie d'activation globale de la dégradation pour les pesticides. Elle établit la relation entre la solubilité dans l'eau de la substance et la température. La valeur par défaut définit par un groupe de travail FOCUS qui est égale à 27 kJ/mol (FOCUS, 2004).
- **Enthalpie molaire de la pression de vaporisation (kJ/mole) :** elle décrit la pression de vapeur saturante de la substance et température. La valeur par défaut définit un groupe de travail FOCUS qui est égale à 95 kJ/mol (FOCUS, 2004).
- **Interception foliaire :** c'est la masse de pesticides interceptée par la canopée et elle dépend du mode de l'application et de la densité du feuillage au moment de l'application. La quantité de pesticides non interceptée est incorporée ensuite dans le sol (Magdelénat, 2009).
- **Lessivage foliaire :** les pesticides reçus sur les feuillages peuvent être lessivés et atteignent la surface du sol lors des précipitations. La masse de pesticides lessivés (en g/j) est calculée comme suit (Magdelénat, 2009) :

$$\mathbf{JFOF = E P M A}$$

Avec :

E : coefficient d'extraction foliaire (cm^{-1})

P : volume de pluie journalière (cm/j)

M : masse de pesticides à la surface de la plante (g/cm^2)

A : aire de la colonne de sol (= 1 cm^2)

- **Masse surfacique des pesticides (quantité) dans le système (kg/ha):** c'est le bilan des substances actives dans le sol après un temps donné (ex : 1 année). Autrement, c'est la quantité des substances stockée dans le sol après avoir subi les différents processus d'évolution. Le modèle PEARL utilise la formule suivante dans le domaine d'équilibre (Tiktak *et al.*, 2000) :

$$\mathbf{C^*_{eq}/t = R_S - J_{P,L}/Z - J_{P,g}/Z - R_t + R_f - R_u - R_d}$$

Avec :

C^*_{eq} (kg/m^3): concentration de pesticide dans un domaine d'équilibre du sol,

R_S ($\text{kg/m}^3/\text{j}$): taux volumique des pesticides

$J_{P,L}$ ($\text{Kg/m}^2/\text{j}$): flux de masse des pesticides dans la phase liquide

$J_{P,g}$ ($\text{Kg/m}^2/\text{j}$): flux de masse des pesticides dans la phase liquide

R_t ($\text{kg/m}^3/\text{j}$): taux de transformation

R_f ($\text{kg/m}^3/\text{j}$): taux de formation

R_u ($\text{kg/m}^3/\text{j}$): taux de pesticides absorbés par les racines

R_d (kg/m³/j): taux des pesticides drainés latéralement

- **Concentration des pesticides dans le percolât ($\mu\text{gr/l}$):** c'est la concentration en substance active d'une eau percolant 1 m de profondeur après l'application.

Après avoir donné les significations des termes techniques, nous allons définir les données d'entrée du modèle. Les entrées dans PEARL sont nombreuses. Il s'agit des données relatives aux sols, climat, cultures et pesticides:

3.1. Sol

Les variables nécessaires qui sont relatives au sol sont :

- Les fractions granulométriques (texture) : limon, argile, et sable (%)
- La matière organique (kg/kg)
- Les épaisseurs des horizons des profils et des couches (m)
- PH
- Paramètres Van Genuchten : propriétés
- Facteur du végétal pour le sol nu
- Hydraulique du sol
- Densité apparente (kg/m³)

Afin d'élaborer une fiche technique du sol pour notre zone d'étude, nous avons eu recours dans un premier temps à deux sources différentes de base de données du sol – Caza de Zahlé puis dans un deuxième temps, nous avons procédé aux calculs en se basant sur le modèle « Soil Water characteristic ». Ces calculs sont indispensables pour compléter cette base de données pour alimenter le modèle.

Dans un premier temps, nous avons récupéré la base du sol et la carte pédologique de notre zone d'après de CNRS. Cette base contient les différentes classes du sol, la profondeur du sol (en cm), les pourcentages d'argile et de sable par type du sol et la teneur en masse en matière organique (MO). Il est à noter que toutes ces données sont géo spatialisées. Mais sur cette base de données, il manque les paramètres hydrologiques du sol, le nombre d'horizons et la profondeur de chaque horizon.

Dans un deuxième temps, nous avons récupéré une base de données du centre national de télédétection. Cette base décrit les caractéristiques du sol (types du sol, horizons avec les profondeurs de chaque horizon).

La variable «Bulk density» qui est une variable indispensable pour le modèle PEARL, ne figurait pas dans les deux bases de données. Pour cela, il était indispensable de trouver une solution afin de calculer cette variable. Le programme « Soil Water characteristic » a permis d'estimer la solution.

En fait, le programme « Soil Water characteristic » est un programme qui estime la tension de l'eau du sol, la conductivité et la capacité de rétention d'eau en fonction de la texture du sol, de la matière organique, de la teneur en gravier, de la salinité et du compactage.

3.2. Climat

La base des données climatiques a été récupérée à l'Institut de Recherche Agronomique Libanais (IRAL). Elle contient les différents paramètres journaliers: la température minimale et maximale, les précipitations et les radiations solaires. Ces paramètres vont être utilisés par la méthode de Makkink pour calculer l'évapotranspiration ETP_0 .

Les coordonnées de la station météo (longitude, latitude et altitude) des données climatiques proviennent de la station de Terbol:

- Longitude (Decimal degree, East positive): 35.99
- Latitude (Decimal degree): 33.8
- Altitude (m): 892.

3.3. Cultures

Concernant les paramètres de chaque culture traitée dans notre étude, nous avons pris en considération ce qui suit:

- Préciser si la culture est pérenne ou saisonnière (le modèle désigne par fixe pérenne et par saisonnière variable)
- Introduire les différents taux d'humidité du sol à différent pF (cm)
- Introduire le coefficient d'extinction pour la radiation solaire
- Déterminer la valeur de la résistance minimale des cultures (s/m)
- Déterminer la constante de l'eau interceptée (cm)
- Préciser la pression d'eau critique pour l'irrigation (cm)
- Définir les stades de développement physiologiques : LAI (m^2/m^2), profondeur racinaire (m) et le facteur de la culture
- Déterminer la date de la levée et de la récolte.

3.4. Pesticides

En ce qui concerne les pesticides, le modèle a besoin des données d'entrée par produits utilisés sous de variables. Il existe deux types de variables, des variables qui sont fixées par le modèle et d'autres que nous devons saisir selon les produits utilisés.

3.4.1. Les variables fixées par le modèle

Les variables fixées par le modèle sont détaillées dans le tableau qui suit:

Tableau 35: Variables fixées par le modèle concernant les caractéristiques des pesticides utilisés (source: base du données du modèle PEARL)

| | |
|--|----------|
| Concentration de référence dans la phase liquide (mg/l) | 1 |
| Enthalpie molaire de dissolution (Kj/mol) | 27 |
| Enthalpie molaire de vaporisation (Kj/mol) | 95 |
| Energie molaire d'activation (Kj/mol) | 54 |

| | |
|--|----------------------|
| Température de référence pour la diffusion (°C) | 20 |
| Coefficient de diffusion de référence dans l'eau (m ² /j) | 4.3 10 ⁻⁵ |
| Coefficient de diffusion de référence dans l'air (m ² /j) | 0.43 |

3.4.2. Les variables saisies selon les produits

Les variables que nous devons les saisir selon les produits utilisés sont détaillés dans le tableau 36:

Tableau 36: Les caractéristiques des substances actives retenues (Source: Base de données FOOTPRINT, 2009).

| | Masse Molaire (g/mol) | Pression de vapeur (mPa) | DT ₅₀ | Solubilité dans l'eau (mg/l) | Dégradation (°C) | Coefficient de Freundlich | | Bulk density |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|--------------|
| | | | | | | K _f | K _{foc} | |
| Alfa cypermethrine | 416,3 | 0,00038 | 42,6 | 0,004 | 248 | | | |
| Dimethoate | 229,26 | 0,247 | 7,2 | 25,900 | 113 | 0,36 | 28,3 | 1,31 |
| Flutriafol | 301,29 | 4,10 ⁻⁴ | 860 | 95 | 270 | 3,96 | 205 | 1,41 |
| Oxychloride de cuivre | 134,45 | 1,10 ⁻¹⁰ | | 757,000 | | | | 3,39 |
| Hydroxyde de cuivre | 97,56 | 0,000001 | 2600 | 0,506 | 229 | | | |
| Méthomyl | 162,21 | 0,72 | | 55,000 | 192 | 0,381 | 25,2 | 1,32 |
| Chlorpyrifos Ethyl | 350,58 | 1,43 | 27,6 | 1,05 | 170 | 91,6 | 395 | 1,51 |
| Glyphosate | 169,1 | 0,0131 | 23,79 | 10,500 | 200 | 226,3 | 16,331 | 1,71 |
| Lamda Cyhalothrine | 449,85 | 0,0002 | 26,9 | 0,005 | 275 | 4,167 | 290,311 | 1,33 |
| Proquinazid | 372,2 | 0,09 | 30,5 | 0,93 | 367 | 194 | 12,870 | 1,57 |

Dans l'élaboration de notre modèle, nous avons précisé la saison d'application de chaque produit. De plus, nous avons déterminé le type d'application pour chaque produit utilisé: injecté, incorporé au sol, sur la surface du sol ou bien sur la couverture végétale avec le calcul de l'interception par le modèle, sans oublier les quantités appliquées (kg/ha) et la profondeur (m).

Conclusion du chapitre 6

En guise de conclusion, l'utilisation des pesticides en agriculture présente un risque sur l'environnement (lessivage vers les eaux souterraines, lessivage dans les cours d'eau et volatilisation dans l'air). L'évaluation d'émission des pesticides au niveau du système sol-plante ainsi que leurs comportements dans les différents compartiments de l'environnement a évolué avec le temps en utilisant des modèles de calcul qui peuvent fournir un certain degré de prédiction.

Le modèle PEARL qui a été décrit dans ce chapitre a comme objectif principal d'évaluer les risques des pesticides tant au niveau régional qu'à l'échelle locale. Ce modèle prend en compte tous les facteurs physiques du territoire étudié. Il est à noter que la façon de traiter les pesticides par les agriculteurs (pulvérisation sur la surface, incorporation ou bien injection dans le sol) a été

prise en compte dans ce modèle. De plus, plusieurs équations ont été utilisées pour calculer le devenir des pesticides dans le système sol-eau (elles ont été décrites au fur et à mesure dans ce chapitre). Egalement, le modèle PEARL prend en compte des effets de la teneur en humidité du sol et de la profondeur du sol sur le devenir des pesticides.

Donc, le modèle PEARL est considéré comme un outil d'évaluation des risques de devenir des pesticides dans l'environnement. Cela permet d'exécuter des scénarios définis dans les premiers niveaux d'évaluation des procédures d'enregistrement d'une part. Et d'autre part, des calculs plus spécifiques peuvent être effectués, à titre d'exemple, pour vérifier l'effet du potentiel des mesures limitant les émissions des pesticides. Ce modèle contient des modules relativement nouveaux dans le domaine d'évaluation des risques de transfert des pesticides mais il est à noter qu'une combinaison entre les résultats obtenus du modèle PEARL et le SIG permettra l'évaluation des risques environnementaux des pesticides à différentes échelles.

Les résultats obtenus seront décrits dans la partie III en les combinant avec le SIG afin de comprendre et de prédire les zones vulnérables aux risques de la pollution diffuse d'origine agricole.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Le développement d'une approche systématique d'évaluation et de gestion de risque de devenir des pesticides dans l'environnement nécessite une élaboration d'une démarche méthodologique structurée et adéquate. Pour cela un choix de la zone d'étude a été effectué en fonction des enjeux environnementaux et socioéconomiques. Un travail de construction d'une base de données des pratiques phytosanitaires au niveau du territoire du caza de Zahlé a été réalisé pour la première fois. L'acquisition et le traitement de cette base de donnée étaient une étape indispensable pour la poursuite de notre travail. Ces données ont été la base pour l'alimentation des outils permettant d'évaluer et de gérer les pratiques phytosanitaires. Parmi les principaux outils, nous pouvons citer l'indicateur de pression phytosanitaire (IFT) et le modèle d'évaluation de risque de devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement afin d'aboutir à une analyse spatialisée des risques de transfert des produits utilisés au niveau du territoire étudié et l'élaboration des cartes de lixiviation des matières actives utilisées par les agriculteurs.

La première étape de notre démarche méthodologie était le choix de la zone d'étude. Ce choix, basé sur une analyse des caractéristiques et des problématiques du territoire du caza de Zahlé, couvre 418 km² et s'étend sur 43 localités. Ce territoire est caractérisé par une diversification des systèmes de production, une diversification des pratiques agricoles et la dégradation de la qualité de la ressource en eau (des eaux de Litani) à cause de la pollution existante.



Figure 51: Dégradation des eaux de Litani, caza de Zahlé (source: travail de terrain, 2015-2016)

Compte tenu de cette diversité, une typologie des systèmes des exploitations agricoles spatialisées a été réalisée afin de nous aider à choisir des exploitations types d'une part et l'échantillon des

agriculteurs à enquêter d'autre part. Par la suite, notre base de données des pratiques phytosanitaires a été construite en se basant sur les enquêtes de terrain qui ont été réalisées auprès des 400 agriculteurs du territoire du caza de Zahlé.

Le calcul de l'indicateur de pression phytosanitaire (IFT) au niveau du caza de Zahlé par culture, par hectare et au niveau du territoire nous a servi dans un premier temps à savoir quelles sont les cultures les plus consommatrices des produits phytosanitaires, et dans un deuxième temps, en couplant ces résultats avec le SIG, nous a permis d'identifier les zones où la pression phytosanitaire est élevée. Le calcul de l'indicateur de pression (IFT), mais cette fois-ci par produit utilisé, nous a permis d'identifier les produits les plus utilisés au niveau du territoire d'étude. De ce fait, nous avons pu identifier les cultures les plus consommatrices des pesticides et les produits les plus utilisés sur ces cultures qui seront le but de l'étude d'évaluation de risque de leur devenir dans l'environnement. Le recours à un outil d'évaluation des risques de devenir des pesticides dans l'environnement était l'objectif de l'étape suivante de notre travail. Ceci est dû au fait que l'IFT ne prend pas en compte des caractéristiques spécifiques de chaque produit phytosanitaire et de leur comportement dans l'environnement.

Le modèle qui a été choisi est le modèle PEARL qui a comme objectif de prédire les quantités perdues d'une matière active dans l'environnement et surtout au niveau du sol. Ce devenir dans le sol est géré par les conditions du milieu d'où la nécessité de la construction d'une base de données pédoclimatique et agronomique afin d'alimenter le modèle.

Cet outil d'évaluation du devenir de risque des produits phytosanitaires couplé avec les types de sol dans le SIG nous a permis d'obtenir des cartes de risque de transfert des produits phytosanitaires dans les eaux souterraines au niveau de la zone d'étude.

L'enchaînement entre la construction de la base de données des pratiques phytosanitaires, le calcul de l'indicateur de pression phytosanitaire (IFT) et le fonctionnement du modèle d'évaluation des risques permet d'aboutir à l'élaboration d'une démarche méthodologique de gestion des risques liée aux pesticides. Cette approche méthodologique élaborée dans ce travail de recherche est une partie pour la mise en place des dispositifs et des stratégies de réduction des risques de la pollution diffuse liée aux pratiques phytosanitaires.

PARTIE III

**EVALUATION DE RISQUE DE TRANSFERT DES PESTICIDES
POUR FAIRE EMERGER DES STRATEGIES DE GESTION ET
D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE: UTILISATION DU
MODELE PEARL**

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE

La problématique de recherche de cette thèse consiste à évaluer le risque des produits phytosanitaires sur la durabilité des systèmes de production. Pour répondre à cette problématique, il fallait mettre en place d'une part des dispositifs de gestion des pratiques agricoles à travers le développement d'outils et d'autre part de proposer des méthodes d'évaluation des risques afin de gérer et de réduire l'impact sur l'environnement.

L'occupation du sol et la diversité des pratiques agricoles sont les deux éléments clés qui favorisent l'augmentation des risques de la pollution diffuse. Cependant, il est nécessaire de réaliser un diagnostic des pratiques phytosanitaires et une évaluation de l'usage des pesticides en fonction des cultures et au niveau des parcelles, surtout qu'aucun diagnostic détaillé au niveau national n'a été réalisé. Ce diagnostic permet de déterminer les différents facteurs et les conséquences de la pollution diffuse liés à l'itinéraire technique de traitement des parcelles et entre les agriculteurs au niveau de leur exploitation agricole. D'après tout ce qui précède et en se basant sur les résultats de ce diagnostic, une mise en place des stratégies de gestion raisonnée de l'usage des pesticides dans un cadre collectif pour faire face à la pollution diffuse sera envisageable. L'approche collective consiste à confronter tous les acteurs à une problématique majeure, celle des risques de la pollution diffuse liée aux produits phytosanitaires. Ainsi cette troisième partie de la thèse présente les résultats du diagnostic et les outils d'aide à la décision développée dans ce travail.

Pour répondre aux besoins des acteurs en termes d'aide à l'évaluation et à la décision, dans le **chapitre 7**, les résultats de la typologie spatialisée a été décrite pour identifier les systèmes de production existant tout en prenant en considération le facteur espace au niveau de notre territoire. Une description de la situation socio-économique des agriculteurs, des pratiques agricoles et de la perception de ces agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires a été présentée dans ce chapitre afin d'avoir une vue générale du territoire d'étude et de son fonctionnement. De plus nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des impacts des itinéraires techniques (ITK) de traitement des exploitations enquêtées qui sont analysés à l'aide d'indicateur de pression phytosanitaire IFT.

Puisque l'indicateur de fréquence de traitement ne prend pas en considération les facteurs physiques du territoire, nous avons eu recours à la modélisation (modèle PEARL) pour évaluer le risque de devenir des PP dans le sol et les eaux souterraines. Le **chapitre 8** montre ainsi les résultats retenus du modèle et le risque de chaque matière active la plus utilisée au niveau du territoire sur la qualité du sol et des eaux souterraines en fonction des cultures les plus consommatrices des PP et des types de sol existant afin d'identifier les zones vulnérables au risques de la pollution diffuse par les PP.

CHAPITRE VII

ORGANISATION DU TERRITOIRE DE L'EXPLOITATION, PRATIQUES PHYTOSANITAIRES ET CONTRIBUTION A LA POLLUTION DIFFUSE

Depuis des décennies, le secteur agricole libanais a subi des grands changements, il est confronté aux deux défis principaux qui sont la sécurité alimentaire et la faible compétitivité de son agriculture. Ce secteur a subi une période d'intensification et d'utilisation mal contrôlée des produits phytosanitaires en raison de la stratégie du ministère de l'agriculture, qui consiste en une intensification agricole et l'augmentation de la productivité sans prendre en considération ni la santé humaine ni l'environnement. Dans le contexte de la région de la Béqaa et du territoire du caza de Zahlé en particulier, la question qui se pose est de voir comment les agriculteurs se comportent face à l'utilisation des produits phytosanitaires et de savoir leur stratégie de travail.

Ce chapitre est divisé en 4 parties. Dans la première partie nous décrivons les systèmes de production type et leur distribution spatiale. En se référant à cette description, une deuxième partie analyse l'organisation interne des exploitations afin de mettre en évidence le mode de fonctionnement et le choix stratégique des agriculteurs en ce qui concerne leurs pratiques agricoles. La troisième partie décrit la perception des agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires alors que la quatrième partie traite les résultats obtenus des calculs d'IFT par hectare et au niveau du territoire afin d'identifier les régions où la pression phytosanitaire est élevée.

1. Description des systèmes de production type

Les exploitations agricoles de la région du caza de Zahlé ont fait l'objet de nombreuses typologies. Certes ces typologies tiennent compte des grands traits de l'agriculture à l'échelle de la région. Elles occultent cependant des différences plus fines qui nous contraignent de se renseigner sur la raison des choix des pratiques agricoles par les agriculteurs.

Nous avons donc mis en œuvre une démarche pour l'identification des systèmes de production homogène spatialisés. Ceci est indispensable et nous aide à mettre en œuvre des stratégies de gestion raisonnée en fonction des systèmes de production spatialisée.

Donc, selon les critères définis dans la Partie II, Chapitre 5, cinq classes ont été retenues. Ces cinq classes sont mises en évidence avec des orientations de production dominantes: Viticulture et Oléiculture (G1), Cultures Maraîchères et Cultures Industrielles (G2), Céréaliculture (G3), Arboriculture (G4) et Viticulture (G5).

Après avoir obtenu les groupes homogènes, nous avons distribué ces groupes spatialement selon les villages de notre zone d'étude afin d'avoir des grandes zones représentatives. Ces résultats sont représentés dans le tableau 37.

Tableau 37: Grandes zones spatialisées en fonction des systèmes agricoles dominants (Source: Travail de Kanj F., 2016).

| Territoires et Systèmes agricoles dominants | Nombre d'exploitations | Nom des villages |
|---|------------------------|--|
| Viticulture et oléiculture (G1) | 435 | Ali Al Nahri, Majdel Anjar, Mreijat et Nasryet Rizk |
| Maraichage et Cultures industrielles (G2) | 1133 | Choubryet tabet, Chtoura, Houch Mandara, Houch Kaysarr, Houch Ghanam, Jdita, Kafarzarbadd, Qabb Elias, Riyak, Saadnayel, Tcheflik Quinano, Terbol et Zahlé |
| Céréaliculture (G3) | 389 | Barr Elias, Dalhamyet, Hoshmosh, Makse, Nasryet Zahlé, Taanayel, Tal Alakhdar et Zahlé Aradi |
| Arboriculture (G4) | 1203 | Anjar, Ain Kfarzarbad, Boueirj, Deir Ghazal, Hezarta, Ksara, Massa, Wadi Arayech, Qaa El Rim, Kousaya, Rait et Taalbaya |
| Viticulture (G5) | 822 | Ablah, Fourzol, Nabi Ayla, Niha, Karak Nouh et Touaite. |

Pour transposer les résultats au niveau spatial, nous avons rassemblé les résultats présentés dans le tableau ci-dessus avec l'outil du système d'information géographique ArcGIS afin de montrer la distribution spatiale de ces grandes zones de classification au niveau de notre territoire d'étude (figure 52).

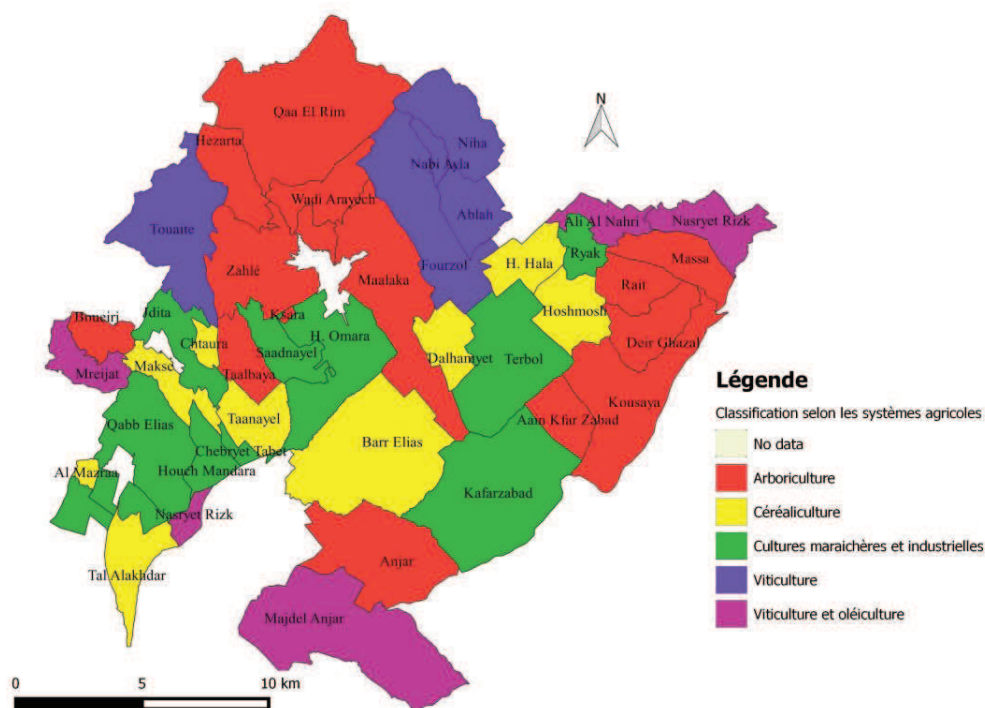


Figure 52: Classification des exploitations en fonction des systèmes de productions agricoles stratifiés (Source: Réalisation Kanj F., 2015).

De ce fait, une typologie des systèmes de production distribuée spatialement a pu être élaborée en tenant compte de la structure de l'exploitation et 5 zones homogènes ont été distinguées. Les 5 zones sont décrites comme suit :

➤ **Zone 1 : viticulture et oléiculture**

La zone de « viticulture et oléiculture » comprend 4 localités (Ali Nahri, Majdel Anjar, Mreijet et Nasryet Rizk). Elle couvre une surface totale de 43 700 ha dont 1 781 ha de SAU et regroupe 435 agriculteurs. La SAU moyenne dans cette zone est d'environ 4.09 ha/agriculteur. 52% des exploitations de ces localités sont irriguées (Notre analyse, Base de données - Département de statistique, MOA, 2016).

La majorité des terrains appartenant à ces localités se trouvent en plaine à l'exception de Mreijet où les terres sont en terrasse et en pente. Les terres cultivées en vigne représentent 32%, suivies par l'olivier (27%), les cultures maraîchères et les cultures industrielles (18%) et enfin l'arboriculture en particulier, cerisier, pommier, pêcher et prunier (10%).

➤ **Zone 2 : cultures maraîchères et industrielles**

La zone des « Cultures maraîchères et industrielles » regroupe 13 localités (Choubryet Tabet, Chtoura, Houch Mandara, Houch Quaysar, Houch Ghanam, Jdita, Kfarzabad, Qab Elias, Riyak, Saadnayel, Tcheflik Quinano, Terbol et Zahle). La surface totale de cette zone est de 29 730 ha dont 8 136 ha de SAU. Le nombre d'agriculteurs est de 1 133 et la SAU moyenne est de 7.18 ha/agriculteur. Presque la totalité des terres des exploitations de ces localités sont irriguées (96%) (Notre analyse, Base de données - Département de statistique, MOA, 2016).

Les cultures maraîchères et industrielles représentent 62% des terres cultivées, suivies par les céréales et l'arboriculture.



Figure 53: Exploitation de pomme de terre à Terbol (source: travail de terrain, 2015-2016).

➤ **Zone 3 : céréaliculture**

8 localités font partie de cette zone (Bar Elias, Dalhamyet, Hoshmash, Makse, Nasryet Zahle, Taanayel, Tell Akhdar et Zahlé Aradi). Sur les 35 840 ha de la superficie totale, 6 536 ha constituent la SAU répartie sur 389 agriculteurs, ce qui correspond à 16.8 ha/agriculteur environ. 53% des exploitations de ces localités sont irriguées. La totalité des terrains de ces localités sont en plaine (Notre analyse, Base de données - Département de statistique, MOA, 2016).

Les céréales viennent en tête des cultures (52%) suivies par les cultures maraîchères et les cultures industrielles.



Figure 54: Exploitation de blé à Dalhamyet (source: travail de terrain, 2015-2016).

➤ **Zone 4 : arboriculture**

Cette zone regroupe 12 localités (Anjar, Ain Kafarzabad, Boueirj, Deir Ghazal, Hezerta, Ksara, Massa, Quadi Arayech, Qaa El Rim, Qousaya, Raait et Taalbaya). Elle couvre une superficie de 42 520 ha dont un peu plus d'un tiers de SAU (2 489 ha) et regroupe 1 203 agriculteurs. 71% des exploitations de ces localités sont irriguées. La majorité des terrains de ces localités se trouvent en pente et terrasse.

L'arboriculture vient en tête d'assolement et en particulier (69%), tandis que les cultures maraîchères et industrielles représentent 15% des terres cultivées, les céréales (10%) et enfin la viticulture et l'oléiculture avec respectivement 5% et 1% (Notre analyse, Bade de données - Département de statistique, MOA, 2016).



Figure 55: Exploitation arboricole à Ksara (source: travail de terrain, 2015-2016).

➤ **Zone 5 : viticulture**

Elle est constituée de 6 localités (Ablah, Fourzol, Nabi Ayla, Niha Zahle, Zahle Karak Nouh et Touaite.). 822 pratiquent l'agriculture sur une SAU de 3 373 ha, ce qui fait que la moyenne de SAU/agriculteur est de 4.1 ha. 77% des exploitations de ces localités sont irriguées.

Les surfaces en vignes représentent 42% des terres cultivées, suivies par les cultures maraîchères et industrielles (24%), l'arboriculture (22%) et puis les céréales 11% (Notre analyse, Bade de données - Département de statistique, MOA, 2016).



Figure 56: Exploitation viticole à Nabi Ayla (source: travail de terrain, 2015-2016).

Pour synthétiser les résultats de ces 5 zones, nous avons présenté ces résultats dans le tableau récapitulatif qui suit.

Tableau 38: Résultats récapitulatif des distributions des systèmes de production par groupe (source : d'après les résultats obtenu du Tanagra et les données du RGA, 2010)

| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Viticulture | 32% | 3 | 1 | 5 | 42 |
| Arboriculture | 10 | 10 | 2 | 69 | 22 |
| Culture maraîchères | 18 | 62 | 45 | 15 | 24 |
| Céréaliculture | 27 | 25 | 52 | 10 | 11 |
| Oleiculture | 13 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

D'après ce qui précède et pour mettre en place une gestion de pollution diffuse d'origine agricole et pour une bonne interprétation des résultats typologiques produits par l'utilisation simultanée des variables de production, nous avons réalisé une carte qui montre la distribution spatiale d'échantillonnage selon la taille et l'orientation des systèmes de production. Une première interprétation montre qu'il existe une hétérogénéité entre les villages en termes de système de production et du nombre d'enquêtes à réaliser (**figure 64**).

Distribution spatiale d'échantillonnage selon la taille et l'orientation des systèmes de production des exploitations

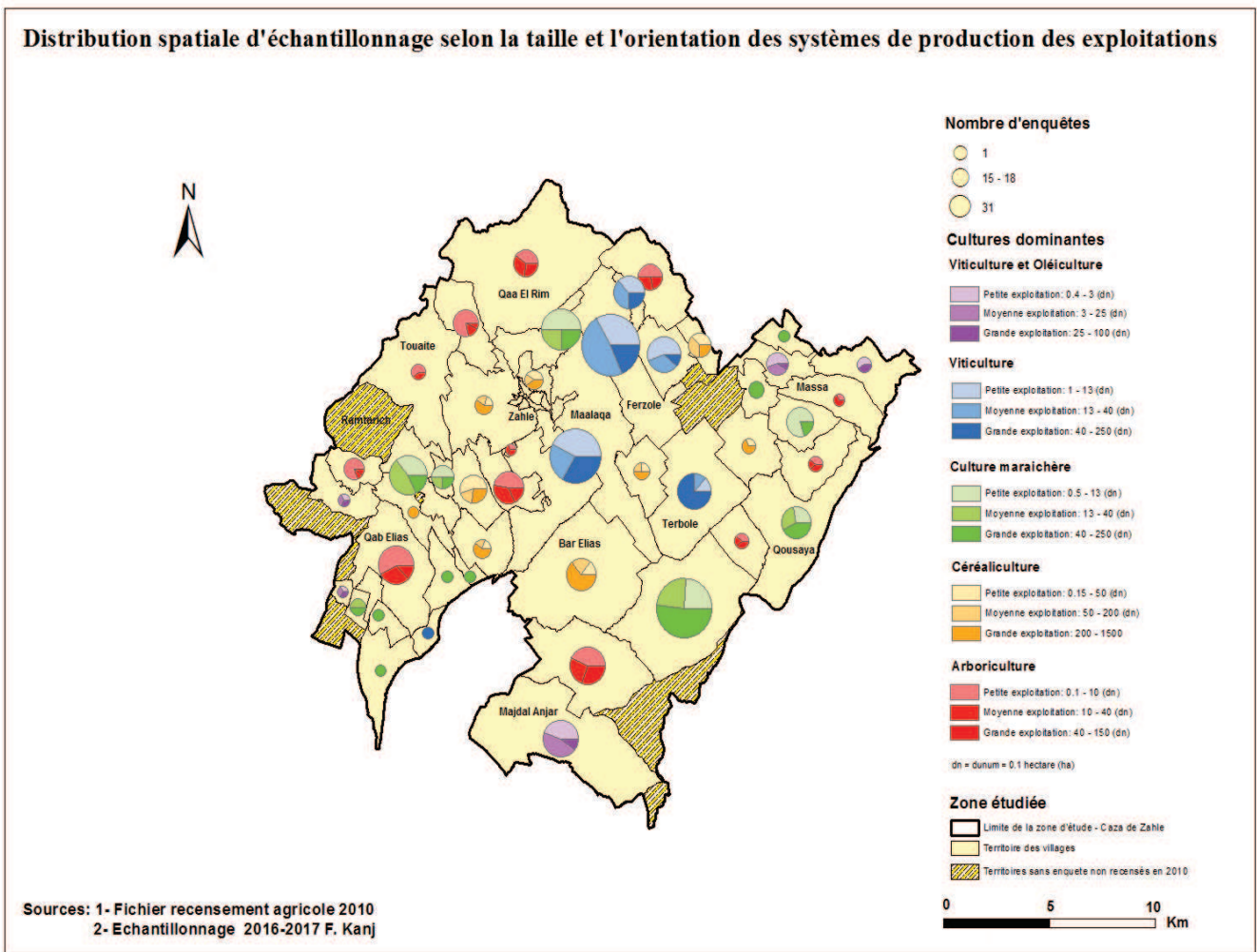


Figure 57: Distribution spatiale d'échantillonnage selon la taille et l'orientation des systèmes de production des exploitations (Source: Réalisation Kanj F., 2016).

Il ressort de la carte que la dimension spatiale en termes de système de production par grande zone, de classe de taille par commune et du nombre d'enquêtes par systèmes de production stratifié par commune joue un rôle important au niveau de la dynamique des facteurs de production de l'activité agricole dans notre zone d'étude.

En se basant sur cette typologie spatialisée, 400 agriculteurs ont été enquêtés afin de mieux comprendre leurs stratégies d'orientation culturelle actuelle et par conséquent de se renseigner sur leurs pratiques agricoles.

2. Analyse de l'organisation interne des exploitations agricoles

Dans bien des cas les stratégies des agriculteurs et l'orientation de leurs systèmes de production sont fortement dépendants de leur environnement socio-économique et naturel de leur exploitation. Les structures des exploitations (leur forme et leur surface), leur mode de faire valoir, leur système de production interviennent également dans le choix stratégies des agriculteurs en choisissant leur pratiques agricoles.

Dans ce qui suit, nous allons expliquer les caractéristiques socio-économiques des exploitations agricoles de la Béquaa centrale afin de mieux comprendre les modes de fonctionnement des exploitations en termes de structures familiales, culturelles, etc.

Ces caractéristiques proviennent des résultats d'enquêtes réalisées auprès de 400 agriculteurs dans la Béquaa centrale.

2.1. Le chef de l'exploitation et sa famille

Parmi les 400 agriculteurs enquêtés, la répartition des exploitations agricoles par genre montre que seulement 4% des chefs d'exploitation sont des femmes, alors que 96% des chefs d'exploitation sont individuels et des hommes.

Quant à l'origine des agriculteurs, nos enquêtes montrent que 82% des agriculteurs sont originaires de la commune, 8% de la commune voisine et 10% sont originaire du caza. Presque la moitié des agriculteurs (49%) de notre échantillon est représenté par des personnes âgées (plus de 55 ans). Les 51% restants, sont représentés par 32% d'agriculteurs âgés de 45 à 55 ans et 19% seulement ont moins de 45 ans.

Dans la Béquaa centrale, les familles sont en général importantes. Nous avons remarqué que les familles composées de 5 membres y compris le chef d'exploitation représentent 71% de notre échantillon. La plus petite famille comprend trois personnes et la plus grande compte jusqu'à 14 personnes. Il est à noter que les familles nombreuses se trouvent dans les villages périphériques de la ville principale du caza qui est Zahlé.

68.5% des chefs d'exploitation de notre échantillon travaillent à temps plein et 31.5 à temps partiel. Parmi ces derniers (31.5%), 20% sont des fonctionnaires, 12% ont une profession libérale et les 12% restants travaillent dans le secteur privé. Le pourcentage des fonctionnaires se répartit d'après la catégorie d'âge somme suit: 12% appartiennent à la catégorie d'âge de 20 à 45 ans et 8% ont plus de 45 ans.

Les résultats de nos enquêtes montrent que 74% des exploitations n'ont un seul actif familial, alors que 23% des exploitations ont 2 actifs familiaux.

En ce qui concerne l'éducation, les résultats de nos enquêtes montrent que 56% des agriculteurs enquêtés n'ont pas dépassé le niveau primaire, 35% ont un niveau secondaire et 8% ont un niveau

universitaire. Les enquêtes montrent que seulement 6.5% ont déjà acquis une formation initiale agricole.

2.2. La structure foncière et mode de faire valoir

Comme dans toutes les régions libanaises, les propriétés foncières diffèrent d'un agriculteur à un autre et parfois même d'un village à un autre. Dans le cas de notre recherche, les résultats de nos enquêtes montrent que 78% des agriculteurs ont hérité leurs terres, 14% sont en location et le reste est réparti entre achat, héritage collectif et mixte.

Le mode de faire valoir correspond à un régime juridique et à des procédés cultureux de l'exploitation agricole. Par ailleurs, le mode de faire valoir règle les relations entre exploitant et propriétaire. Nous pouvons distinguer deux modes majeures : direct et indirect.

Pour le mode de faire valoir direct, l'exploitation de la terre est effectuée par son propriétaire avec l'aide de la main d'œuvre familiale.

Pour le mode de faire valoir indirect, l'exploitation de la terre se fait par délégation. La mise en valeur d'une exploitation agricole est réalisée avec l'aide d'une main d'œuvre salariale ou bien par métayage ou par location.

Dans la Béqaa Centrale, et toujours d'après nos enquêtes, nous avons remarqué que le mode de faire valoir direct prédomine dans 84% des exploitations de notre échantillon tandis que le mode de faire valoir indirect ne représente que 14%. Le mode mixte est très négligeable, il ne dépasse pas les 2%.

En analysant les résultats de nos enquêtes nous avons pu remarquer que le mode de faire valoir direct par rapport au taux d'agriculteurs représente 84% alors qu'en le calculant en fonction de la surface il ne représente que 65%. 1 859 ha sont en mode de faire valoir direct soit 65%.

Le fermage et le métayage sont deux types de baux ruraux ayant chacun leur propre régime juridique. Leur distinction repose principalement sur le mode de rémunération du propriétaire.

Le principal critère pour différencier les deux régimes repose en effet sur la nature de la contrepartie dont bénéficie le bailleur en échange de la location des terres. Alors qu'en cas de fermage, le propriétaire perçoit un loyer dont le montant est déterminé, en cas de métayage il va percevoir une part des produits de l'exploitation. De cette distinction résultent plusieurs conséquences.

Le métayage est un type de bail rural dans lequel un propriétaire, le bailleur, confie à un métayer le soin de cultiver une terre en échange d'une partie de la récolte.

Les résultats de nos enquêtes montrent bien la dominance du métayage dans la Béqaa centrale avec 92%, alors que le fermage reste très limité (8%).

2.3. L'irrigation

La superficie complètement irriguée totale est de 2 611.6 hectare soit 98% de la surface agricole utile des exploitations enquêtées (2 869.5 hectare).

Quant aux systèmes d'irrigation adoptés, toujours d'après les résultats de nos enquêtes, nous remarquons que l'irrigation goutte à goutte est pratiquée dans plus de la moitié des exploitations (56%), l'irrigation par aspersion dans 37% et enfin l'irrigation par submersion dans 7% des exploitations. En fait, l'irrigation par submersion est pratiquée surtout pour les cultures céréalières au cours du printemps comme irrigation complémentaire et dans certaines exploitations viticoles. Les agriculteurs de la Béqaa centrale profitent de l'abondance de l'eau dans les rivières et à côté des sources d'eau temporaires au printemps pour irriguer leurs exploitations avec seulement comme charge le coût de la main-d'œuvre.

L'irrigation par aspersion est surtout pratiquée pour les cultures des tubercules et les pommes de terre. Les agriculteurs pratiquent l'irrigation goutte à goutte surtout pour les cultures maraîchères et avec les changements climatiques et la diminution des précipitations ces dernières années, ce système a été introduit dans les exploitations viticoles à grande échelle et se développe aussi dans les exploitations arboricoles.



Figure 58: Technique d'irrigation par aspersion d'une exploitation de pomme de terre à Terbol (source: travail de terrain, 2016)

Les résultats de nos enquêtes ont montré également que l'origine de l'eau d'irrigation de 55% des agriculteurs enquêtés provient des puits privés, alors qu'à peu près 15% d'agriculteurs utilisent l'eau de la rivière Litani et les puits privés, et à peu près 14% d'agriculteurs utilisent l'eau des

puits et de certaines rivières qui coulent durant le printemps. Etant donné que notre zone d'étude couvre bien les villages d'Anjar, Kfarzabad, nous avons trouvé aussi que 8% des agriculteurs utilisent l'eau d'irrigation de la source de kfarzabad (figure 66).

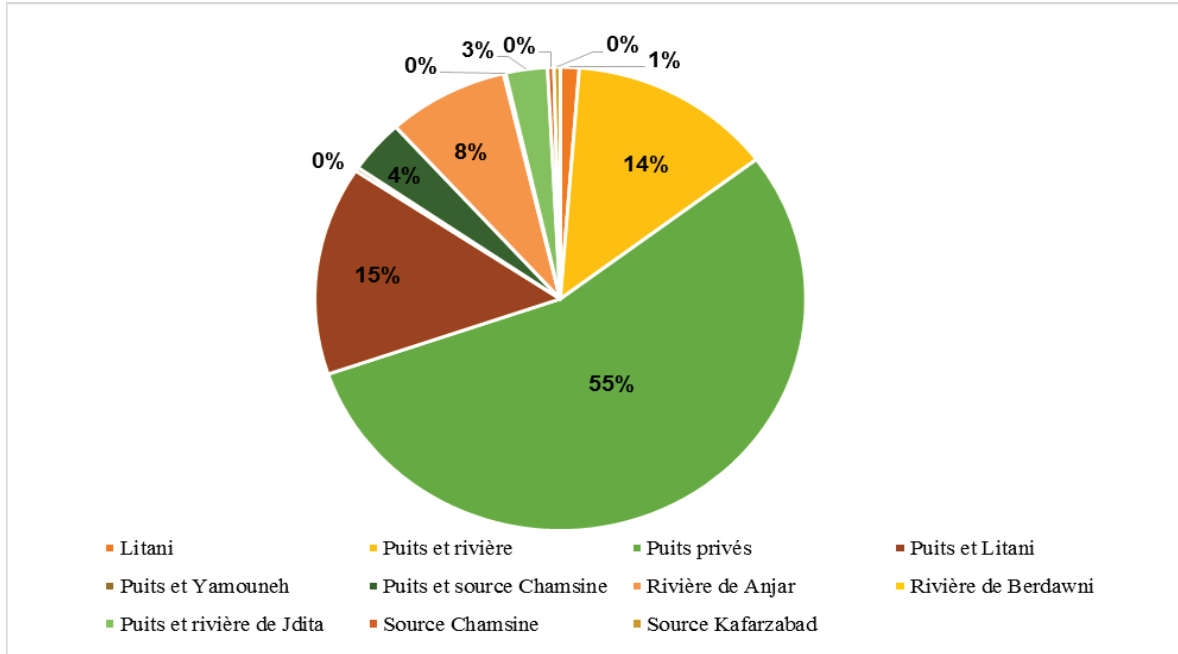


Figure 59: Répartition de l'origine de l'eau d'irrigation dans notre zone d'étude (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016).

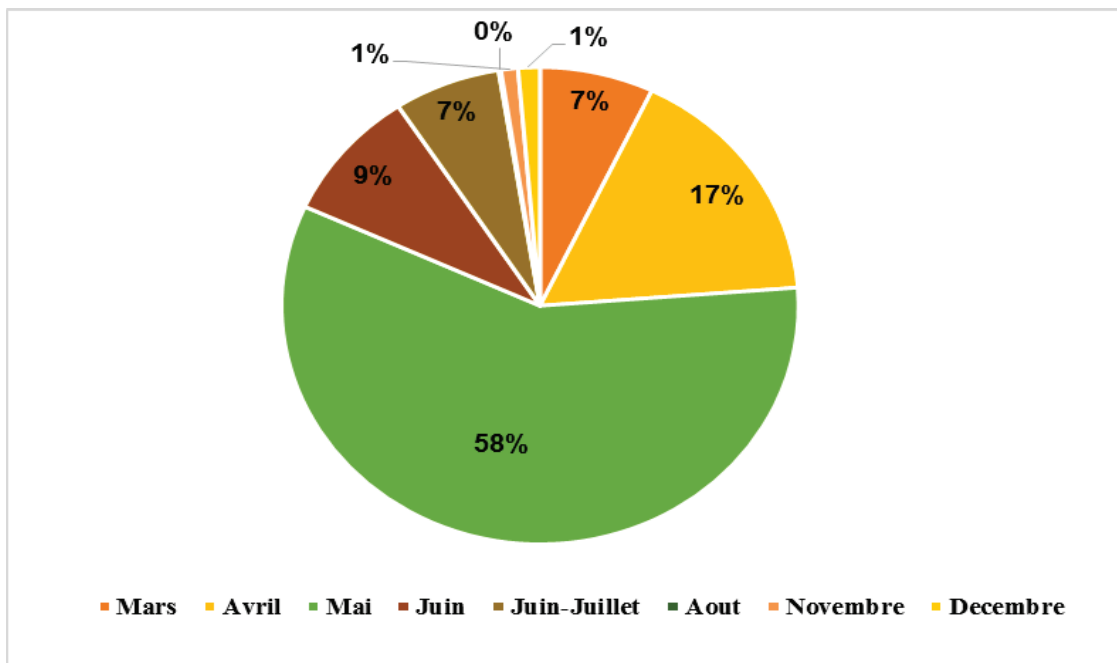


Figure 60: Répartition du moment d'utilisation de l'eau au niveau des exploitations enquêtées (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016)

Nos enquêtes ont montré que seulement 7% d'agriculteurs commencent à utiliser l'eau d'irrigation à partir du mois de mars, puis cela remonte à 17% en avril pour atteindre son pic au mois de mai avec 58%, puis cela descend à 9% en juin et 7% en juillet. En fait, les moments d'utilisation de l'eau par les agriculteurs s'explique par le fait que la majorité des cultures nécessitent l'eau d'irrigation pour les cultures pérennes et saisonnières qui sont fortement présentes dans notre zone d'étude. A titre d'exemple, la pomme de terre est cultivée entre février et mars en fonction des pluies et elle est irriguée jusqu'à la fin juin au plus tard, ce qui est identique pour les autres cultures maraîchères (oignon, ail, carotte, persil, etc.).

Pour les mois de juin, juillet, août et septembre, seuls les agriculteurs qui pratiquent les cultures maraîchères et les arboriculteurs continuent à utiliser de l'eau. A ces derniers s'ajoutent les agriculteurs qui pratiquent les cultures fourragères.

2.4. Production animale

La production animale est pratiquée dans 7% des exploitations seulement. L'élevage des bovins pour la production laitière représente plus que la moitié dans notre zone d'étude (57%), suivi par l'élevage des bovins pour la viande (17%), puis l'élevage des caprins (14%) et enfin l'élevage des ovins (12%) (Figure 61).

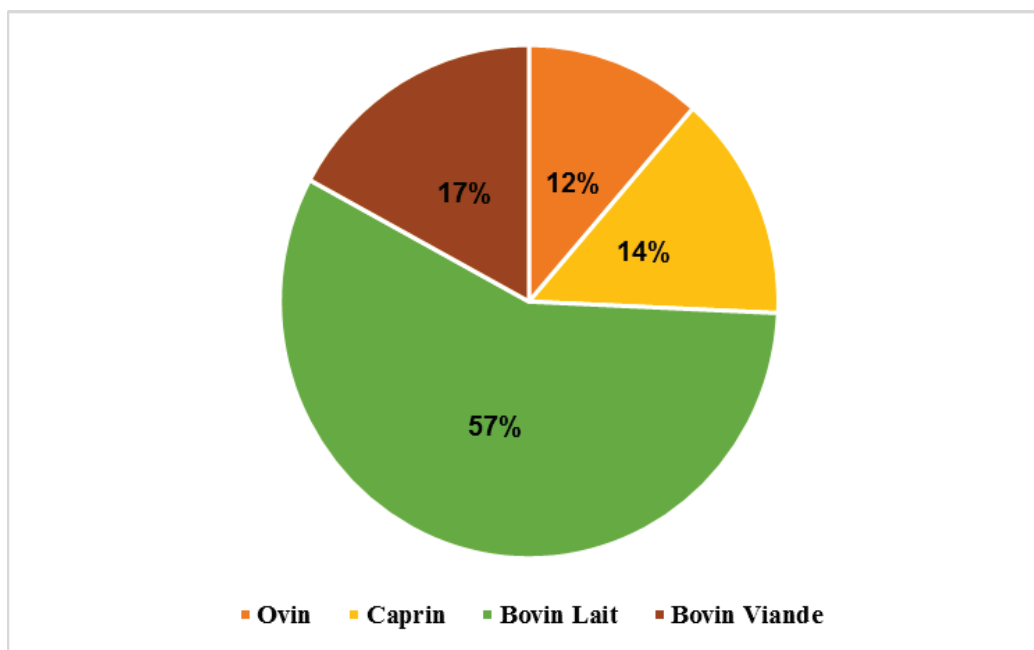


Figure 61: Répartition de type d'élevage au niveau des exploitations enquêtées (source: travail de terrain de Kanj F., 2016)

1/5 des exploitations pratiquent l'élevage pour assurer leur autoconsommation, le reste est destiné pour le marché. En fait, la forte présence de producteurs laitiers est liée à l'installation des

industries laitières dans notre zone d'étude tel que cela a été souligné par un producteur lors de la réalisation de nos enquêtes.

2.5. Les équipements

Les équipements en machines agricoles sont très rares. 16% seulement des exploitations sont équipées en machines de travail du sol, et quelques-unes n'ont même pas le matériel dont elles auraient besoin. Dans ce cas ils les empruntent ou ils les louent à leurs voisins. Quant aux tracteurs, 54% en possèdent un. Mais le taux d'équipements en pulvérisateur est très élevée ceci est dû au fait que les agriculteurs achètent le pulvérisateur qui a un prix abordable pour leur budget et louent le tracteur.

2.6. Les pratiques agricoles

Les résultats de nos enquêtes montrent que presque les 3/4 des agriculteurs (73%) ont recours aux phytopharmacies pour leur approvisionnement en PP, 13% ont recours aux fournisseurs d'intrants et 8% au mix phytopharmacies et entreprises d'intrants. Nous avons observé aussi que les agriculteurs ont très rarement recours aux commerçants (2%) (Figure 62).

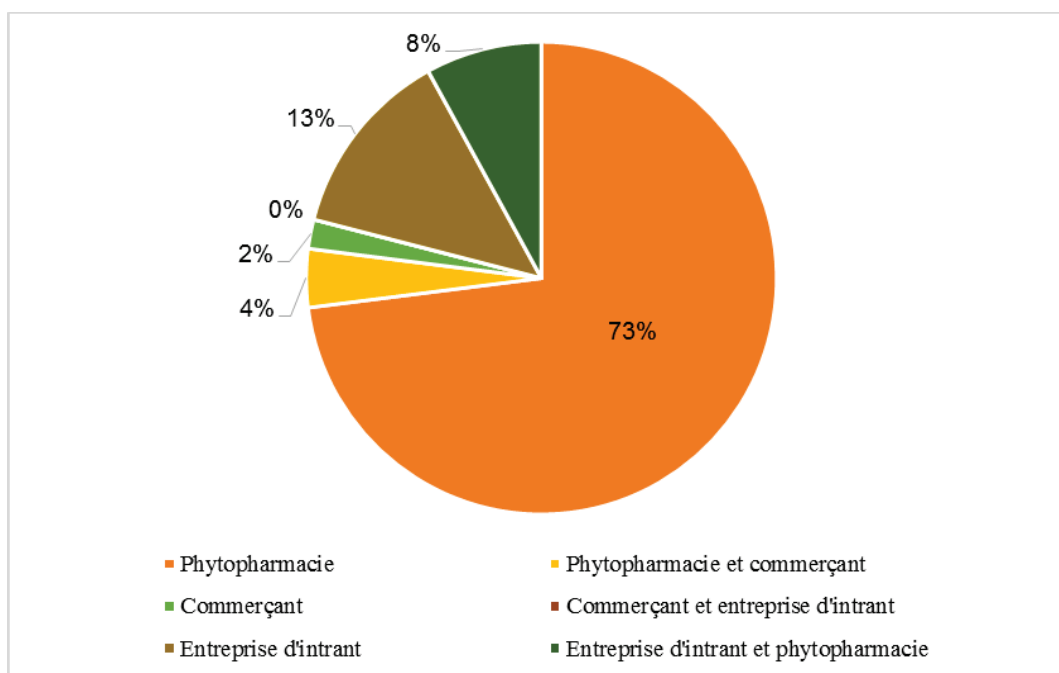


Figure 62: Répartition des lieux d'achats des PP au niveau de notre zone d'étude (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016)

Nous avons remarqué toujours d'après nos enquêtes que 2/3 des agriculteurs savent mélanger les PP. Nous pensons que malgré ce pourcentage élevé, il reste quand même faible par rapport à cette

question qui est très critique du point de vue personnel pour les agriculteurs et les employés d'une part et du point de vue technique et environnemental d'autre part.

En approfondissant davantage, l'utilisation des PP, nous remarquons que presque la moitié des agriculteurs savent lire l'étiquette affichée sur le PP. Comme pour le mélange des PP, ce pourcentage est très critique car c'est l'étiquette affichée sur les PP qui tranche dans les pratiques agricoles des exploitants.

En analysant les sources de recommandations des doses d'application des PP selon l'origine d'acquisition, nous avons trouvé que 37% des agriculteurs enquêtés appliquent les doses fournies en fonction de leur expérience, suivis également par 11% se référant aux ingénieurs agronomes et aux étiquettes des PP. Les recommandations provenant de l'expérience et des commerçants d'une part et de l'expérience et des ingénieurs agronomes représentent chacune 6% (Figure 63).

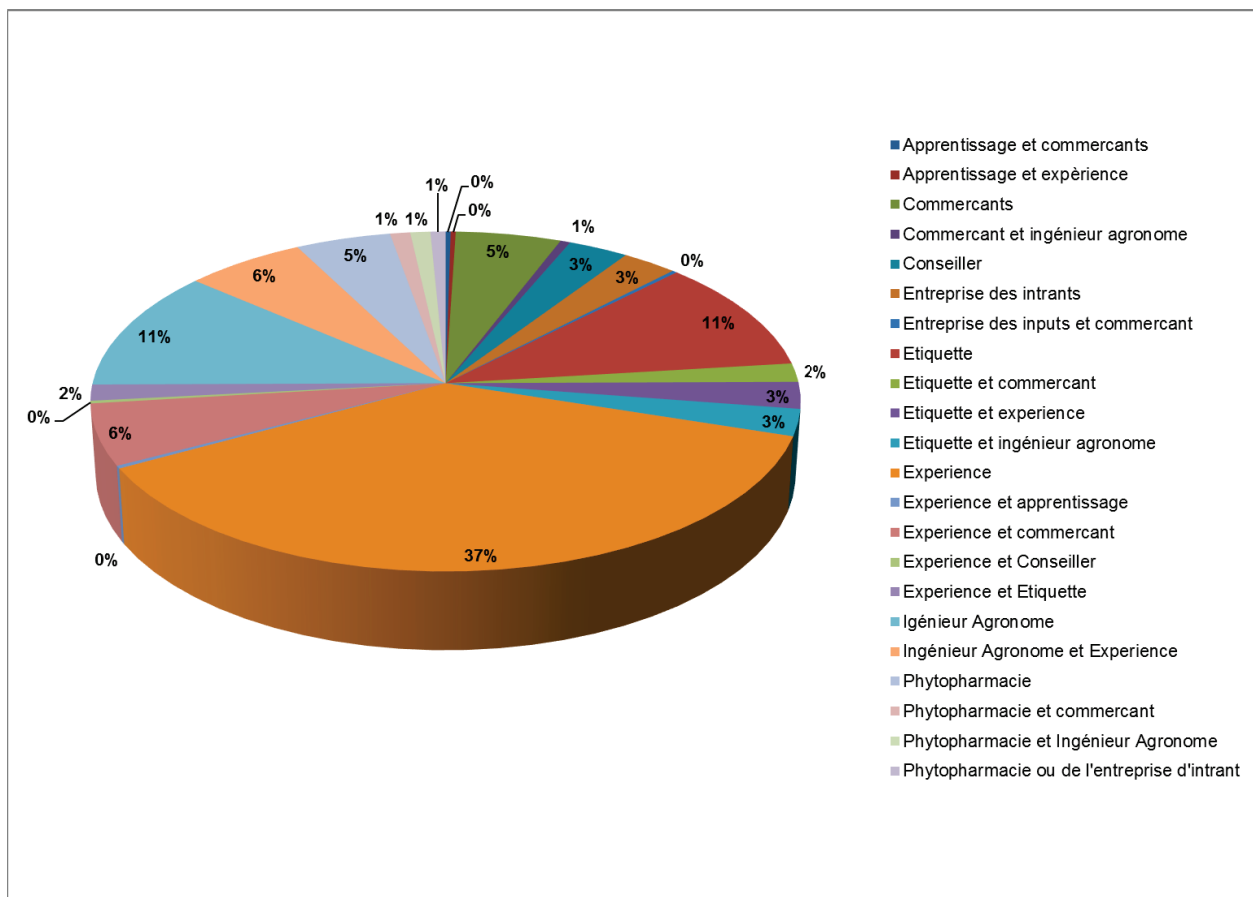


Figure 63: Répartition de source des méthodes des quantités des PP (Source: travail de terrain de Kanj F., 2016)

La totalité des agriculteurs enquêtés appliquent un programme de PP quelque soit le cas. Ils appliquent plutôt les PP d'une façon systémique (97%).

Presque la totalité des agriculteurs (89%) n'ont reçu aucun conseil concernant l'utilisation des PP. Les résultats des enquêtes affirment que le conseil provenait de la chambre d'agriculture de Zahlé (5%) alors que la majorité (95%) ont mentionné le terme « autre » pour le conseil.

Comme pour le conseil, 95% des agriculteurs ont déclaré qu'ils n'ont pas reçu de formation qui traite les PP, et même 98% ont signalé qu'ils n'ont pas assisté à ces formations.

3. La perception des agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires

Etant donné que l'objectif principal de notre thèse consiste à mettre en place une stratégie pour la gestion des risques des produits phytosanitaires, nous avons été amenés à analyser les résultats liés aux différents comportements des agriculteurs du stade du diagnostic de la maladie jusqu'à l'application du produit phytosanitaire. Dans cette partie nous décrivons les résultats des enquêtes menées auprès des agriculteurs concernant leur perception face à l'utilisation des PP.

Un questionnaire a été élaboré afin de répondre aux difficultés rencontrées par les agriculteurs dans les différentes étapes dès l'approvisionnement des PP jusqu'à son utilisation. Ce questionnaire comporte trois parties :

- Une première partie concerne les pratiques agricoles des agriculteurs et plus particulièrement l'achat, l'utilisation, la manière et le mode d'utilisation, etc.
- Une deuxième partie tente de connaître les types de formations données aux agriculteurs dans notre zone d'étude.
- Une troisième partie traite le savoir-faire des agriculteurs en ce qui concerne l'impact de l'utilisation des PP sur les agriculteurs et leur environnement.

Dans ce cadre et pour connaître la perception des agriculteurs envers les produits phytosanitaires et leur impact sur leurs pratiques agricoles, l'outil utilisé pour réaliser cette étape reposait sur les résultats des enquêtes directes.

Suite à l'élaboration d'un questionnaire spécifique qui répond à cet objectif de travail, le choix des exploitations a été fait de manière aléatoire.

Concernant la partie perception du risque des produits phytosanitaires, la dernière partie de notre questionnaire, cette partie va nous servir à évaluer l'attitude et le comportement des agriculteurs face à l'utilisation des PP.

Pour cela, nous avons décidé d'utiliser l'échelle de Likert dans cette partie. L'échelle de Likert est l'une des méthodes les plus populaires et les plus fiables pour mesurer l'attitude et le comportement des personnes.

C'est une échelle pour laquelle la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation (l'énoncé).

L'échelle contient en général cinq ou sept choix de réponses qui permettent de nuancer le degré d'accord. Le texte des étiquettes est variable, par exemple :

-
- 1- Tout à fait d'accord
 - 2- D'accord
 - 3- Ni en désaccord ni d'accord
 - 4- Pas d'accord
 - 5- Pas du tout d'accord

Dans notre cas, nous avons choisi l'échelle de cinq choix (tout à fait d'accord, d'accord, sans avis, en désaccord et tout à fait en désaccord). En effet, nos attentes des réponses des agriculteurs devraient affirmer la réponse tout à fait d'accord. Mais nous nous sommes rendues compte au moment du remplissage du questionnaire que les réponses des agriculteurs était répartie sur les cinq choix citées ci-dessus. Ceci montre bien que les agriculteurs de notre zone d'étude manquent de professionnalisme dans leur activité agricole.

Notre raisonnement a porté sur l'analyse du risque à quatre niveaux différents: santé, environnement, respect des bonnes pratiques lors de l'utilisation des PP et enfin formation et informations des agriculteurs.

3.1. L'impact sur la santé

En se basant sur notre questionnaire, nous avons trouvé qu'il y a 8 questions qui sont liées à la santé des utilisateurs des produits phytosanitaires et de leur entourage. Dans ce qui suit nous allons regrouper les réponses des agriculteurs en fonction des attributs qui leur ont été accordées et en particulier les deux attributs « Tout à fait d'accord » et « D'accord ».

Le graphique ci-après montre les pourcentages des deux attributs qui ne dépassaient pas les 2% (48-18 et 48-18). Il s'agit des risques de l'entourage (famille, amis et population). En fait, ces pourcentages presque nuls, confirment que les agriculteurs enquêtés n'ont pas du tout une idée sur le risque de l'utilisation des produits phytosanitaires sur leur entourage.

Même quand il s'agit de la relation entre la pénétration des produits aux organismes et la bouillie, la pulvérisation, le nettoyage et l'entretien du matériel utilisé, seulement 5% (48-4) étaient «tout à fait d'accord » et « d'accord » sur le risque cité ci-dessus.

Le pourcentage a atteint 10% (48-2) quand la question concerne la relation entre la façon de se servir des produits phytosanitaires et le risque sur la santé. Malgré sa dangerosité nous pensons que ce pourcentage (10%) reste très faible. Ceci montre encore une fois l'ignorance des agriculteurs des risques d'utilisation des produits phytosanitaires.

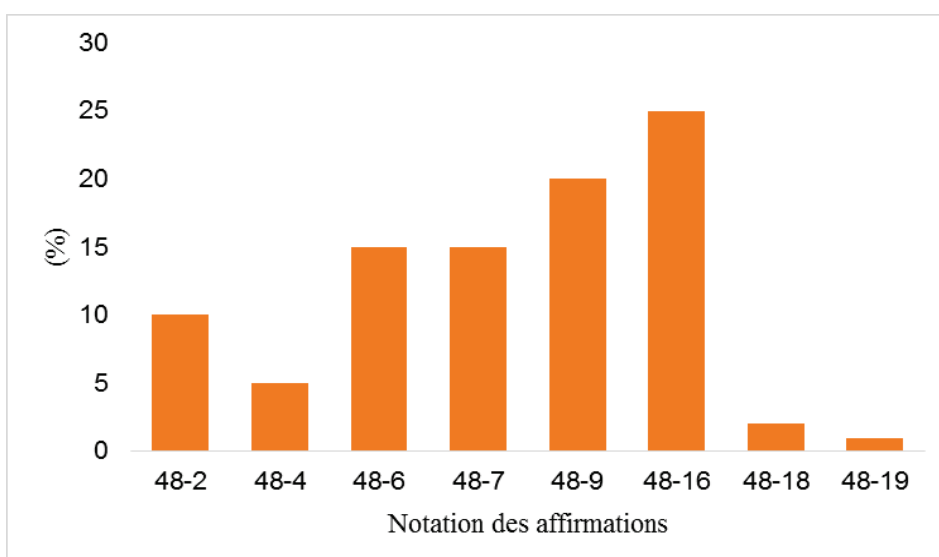


Figure 64: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face à l'impact des PP sur la santé (travail de Kanj F., 2016).

15% sont d'accord qu'un pesticide ayant une forte odeur est plus dangereux qu'un pesticide inodore (48-6). Egalement 15% sont d'accord qu'un pesticide coloré est plus dangereux qu'un pesticide incolore (48-7). 20% sont d'accord que l'homologation des produits est une garantie pour la santé de l'utilisateur (48-9). 25% sont d'accord que les produits phytosanitaires présentent un risque pour la santé de l'utilisateur (48-16).

3.2. Impact sur l'environnement

Concernant leur perception face à l'impact des PP sur l'environnement, les réponses positives c'est-à-dire d'accord et tout à fait d'accord avec les propositions signalées lors de nos enquêtes sont représentées dans la figure 65.

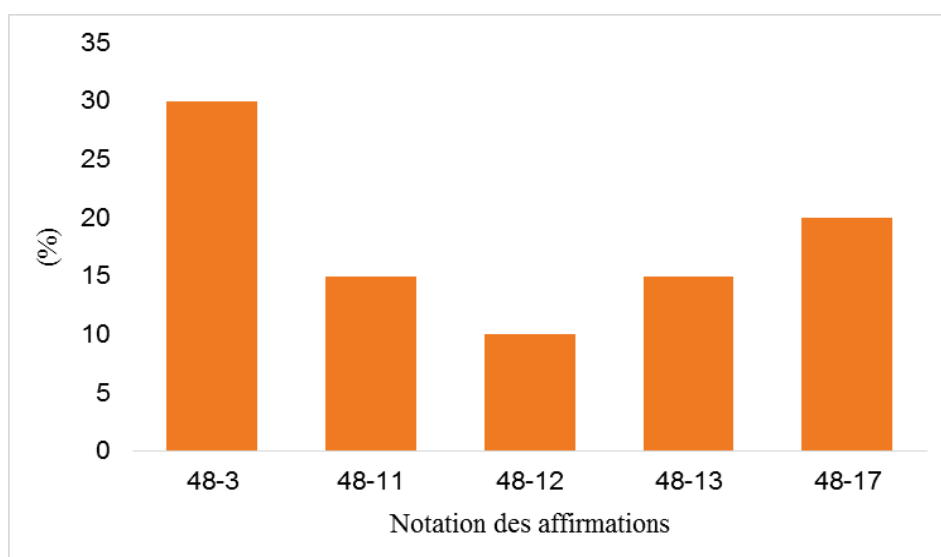


Figure 65: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face à l'impact des PP sur l'environnement (Source : travail de Kanj F., 2016).

Cette figure 65 montre que 30% des agriculteurs sont d'accord pour dire que les produits utilisés sont les plus dangereux pour l'environnement (48-3). 15% seulement sont d'accord pour dire que la quantité de pesticides appliquée a des effets dangereux sur la pollution de l'eau de surface et l'eau souterraine (48-11), de même 15% sont d'accord que le nombre de traitement des pesticides influent sur la qualité du sol et de l'eau (48-13). Pour ces agriculteurs, seulement 10% d'entre eux sont d'accord que la quantité de pesticides appliquée influe sur la pollution du sol (48-12). Enfin 20% sont d'accord que les produits phytosanitaires présentent un risque pour la nature et l'environnement (48-17).

3.3. Respect des bonnes pratiques lors de l'utilisation des PP

Concernant leur perception face au respect des bonnes pratiques lors de l'utilisation des PP, les réponses positives c.à.d. d'accord et tout à fait d'accord avec les propositions signalées lors de nos enquêtes sont représentées dans la figure 66.

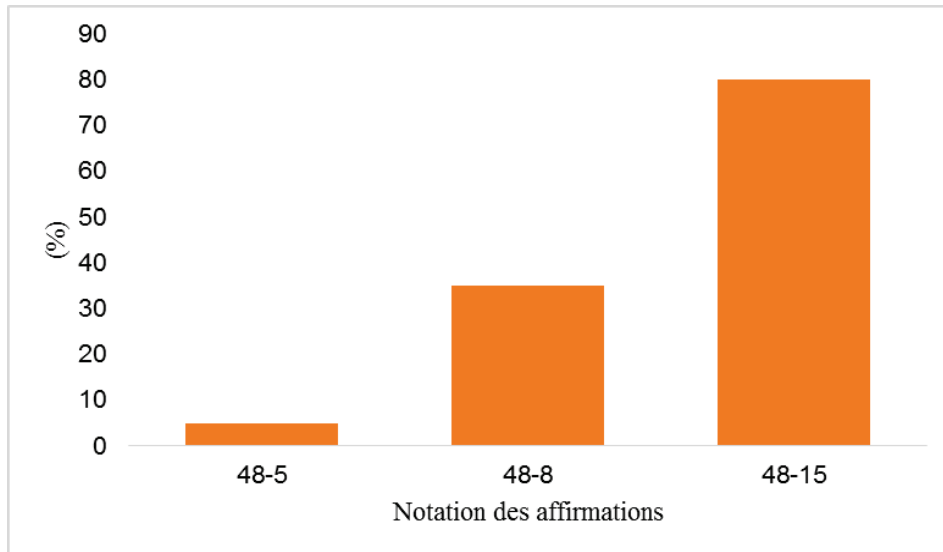


Figure 66: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face au respect des bonnes pratiques lors de l'utilisation des PP (Source : travail de Kanj F., 2016)

Cette figure 66 montre que 5% des agriculteurs sont d'accord pour dire qu'il est nécessaire de nettoyer et d'entretenir les matériels après leur utilisation (48-5). 35% sont d'accord qu'il est nécessaire de porter des équipements de protection (gants, lunettes de protection, masque avec filtre et bottes en caoutchouc) lors de l'usage des produits phytosanitaires (48-8). 80% sont d'accord qu'il faut consulter l'étiquette du produit avant de l'utiliser (48-15).



Figure 67: Photo d'un agriculteur qui prépare un mélange d'engrais chimique sans prendre de précautions pour sa santé (source : travail de terrain, 2016).

3.4. Former et informer les agriculteurs

Concernant leur perception face à la question de savoir s'il faut former et informer les agriculteurs, les réponses positives c.à.d. ils sont d'accords et tout à fait d'accord avec les propositions signalées lors de nos enquêtes concernant le sujet traitant la question des produits phytosanitaires sont représentées dans la figure ci-après.

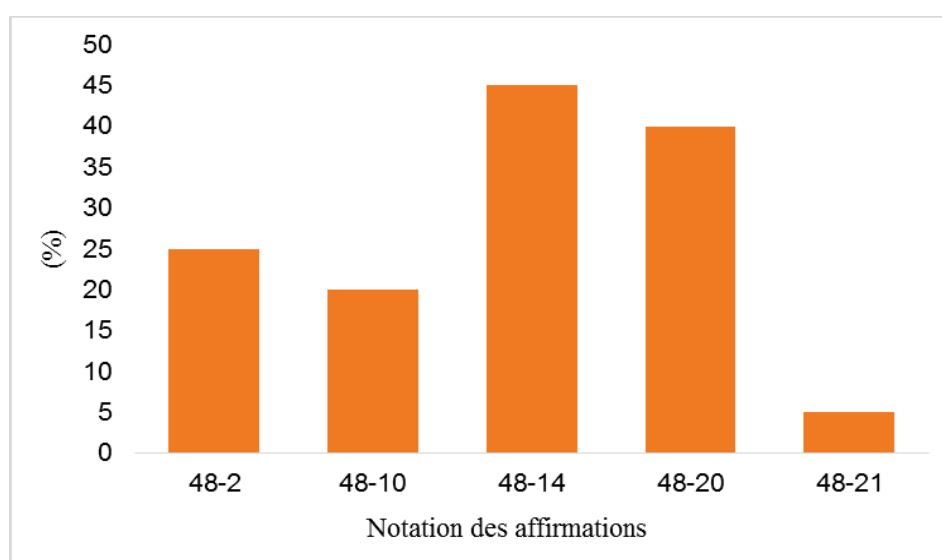


Figure 68: Répartition des réponses positives des agriculteurs concernant leur perception face à la question qu'il faut former et informer les agriculteurs (Source : travail de Kanj F., 2016).

Cette figure montre que 25% des agriculteurs sont d'accord que les formations permettent de mieux utiliser les produits phytosanitaires (48-2). 20% sont d'accords que la manière d'utiliser des produits phytosanitaires est curative (48-10). 45% sont d'accord qu'il faut respecter la dose à appliquer pour chaque pesticide (48-14). 40% sont d'accord qu'il faut respecter la période avant récolte (48-20). Et 5% sont d'accord qu'il faut respecter la période entre le traitement (48-21).

Après avoir présenté la perception des agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires qui joue un rôle indispensable dans la compréhension de la stratégie des agriculteurs en terme des pratiques agricoles, nous allons aborder dans la quatrième partie de ce chapitre le calcul de l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) afin d'identifier les zone où la pression phytosanitaire est élevée.

4. Analyse des calculs de l'indicateur de Fréquence de Traitement

Les agriculteurs sont les principaux acteurs des actions relatives à la pollution diffuse d'origine agricoles. Cette partie a comme objectif de présenter et d'analyser les pratiques agricoles des agriculteurs afin de comprendre comment l'organisation spatiale des activités agricoles constitue une répartition de la pression phytosanitaire et du risque sur l'environnement.

4.1. Analyse comparative des IFT moyenne (par hectare) par culture

L'analyse des différents itinéraires techniques des cultures pratiquées dans la région du Caza de Zahlé nous a permis de dégager des indicateurs de moyens de fréquence de traitement afin d'identifier les cultures les plus consommatrices de pesticides par hectare (**figure 76**).

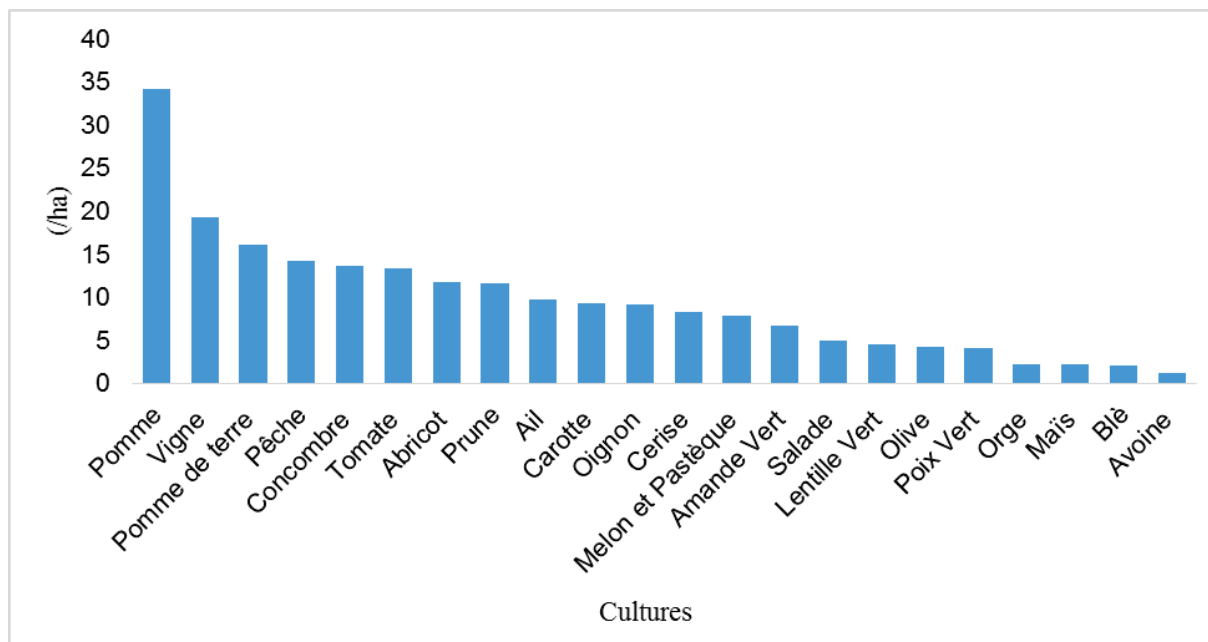


Figure 69: Indicateur de fréquence de traitement moyenne par hectare des différentes cultures (Source : travail de Kanj F., 2016).

L'analyse des enquêtes menées dans les 400 exploitations agricoles de la région du Caza de Zahlé montre une variation au niveau du nombre de traitement des pesticides (par hectare) par culture. La culture de la pomme est la plus consommatrice en pesticides par hectare, son indicateur de fréquence de traitement (IFT) moyen est de l'ordre de 34.2.

La culture de la vigne se positionne en deuxième position en terme de pression phytosanitaire. Son IFT moyen est de l'ordre de 19.3, suivi par la culture de pomme de terre qui possède un IFT moyen de 16.1.

Par ailleurs et pour identifier les cultures les plus consommatrices en pesticides, nous avons recours à une méthode statistique simple qui se base sur le calcul des quartiles. Par conséquent, les cultures retenues pour cette analyse sont : Pomme de terre, vigne, pomme, salade, blé et cerise.

Après avoir analysé les variabilités des IFT moyens par culture et par hectare, une évaluation des IFT totaux par culture a été réalisée au niveau de notre territoire pour identifier les cultures les plus consommatrices de pesticides dans notre zone d'étude. Le tableau ci-dessous montre que la culture de la pomme de terre est la culture la plus consommatrice de pesticides tout en tenant compte de la surface de cette culture par rapport de la surface agricole utile totale et dans d'IFT.

Tableau 39 : Représentation de la somme des IFT totaux au niveau de notre territoire d'étude "caza de Zahlé" (Source: travail de Kanj F., 2016).

| Culture | IFT total (Σ /territoire de notre zone d'étude "Zahlé") |
|-------------------|---|
| Pomme de terre | 55144,79 |
| Vigne | 32429,57 |
| Pomme | 17656,34 |
| Salade | 11927,08 |
| Blé | 10226,24 |
| Cerise | 8384,53 |
| Pêche | 7915,59 |
| Oignon | 7100,29 |
| Tomate | 5026,97 |
| Prune | 2583,61 |
| Concombre | 2553,84 |
| Amande Vert | 2499,37 |
| Ail | 1844,02 |
| Carotte | 1282,62 |
| Melon et Pastèque | 842,36 |
| Maïs | 717,8 |
| Orge | 640,34 |
| Olive | 407,89 |
| Abricot | 275,06 |
| Poix Vert | 219,34 |
| Lentille Vert | 138,74 |
| Avoine | 16,8075 |

Pour détailler encore notre analyse, nous avons identifié les communes où la pression phytosanitaire est forte. Nous avons calculé la somme des IFT totaux par culture de chaque commune. Les résultats figurent dans le tableau 40 qui suit.

Tableau 40: La somme des IFT totaux des cultures par commune (Source: travail de Kanj F., 2016).

| Commune | SAU (/ha) | Somme IFT totaux | IFT (/ha) |
|----------------|-----------|------------------|-----------|
| Mreijet | 65,22 | 209,60 | 3,21 |
| Nasryet Rizk | 391,44 | 2280,20 | 5,82 |
| Dalhamyet | 160,41 | 963,63 | 6,01 |
| Tall Al Akhdar | 260,8 | 1601,86 | 6,14 |
| Bar Elias | 2649,24 | 17440,38 | 6,58 |
| Nasryet Zahle | 165,2 | 1132,83 | 6,85 |

| | | | |
|------------------------|---------|----------|-------|
| Taaneyel | 323,28 | 2285,02 | 7,068 |
| Majdal Anjar | 494,95 | 3614,43 | 7,30 |
| Deir Al Ghazel | 95,26 | 732,00 | 7,68 |
| Zahle Aradi | 1397,27 | 11367,26 | 8,13 |
| Rait | 25,71 | 210,99 | 8,21 |
| Hoshmosh | 562,20 | 4626,19 | 8,23 |
| Terbol | 1627,11 | 13659,37 | 8,39 |
| Saadnayel | 436,02 | 3680,17 | 8,44 |
| Ryak | 139,39 | 1223,187 | 8,775 |
| Hosh Mandara | 25,8 | 238,38 | 9,24 |
| Ainkafarzabad | 116,87 | 1101,77 | 9,42 |
| Wadi Al Arayech | 170,26 | 1611,83 | 9,466 |
| Quab Elias | 864,54 | 8318,07 | 9,62 |
| Choubryet Tabet | 50,96 | 492,87 | 9,67 |
| Zahle | 650,097 | 6388,42 | 9,82 |
| Hosh Kaysar | 125,41 | 1239,17 | 9,88 |
| Massa | 291,54 | 2904,38 | 9,96 |
| Kfarzabad | 2045,71 | 20548,97 | 10,04 |
| Karak Nouh | 929,74 | 9863,65 | 10,61 |
| Chtoura | 18,65 | 198,58 | 10,65 |
| Ali Nahri | 300,11 | 3248,26 | 10,82 |
| Qaa El Rim | 206,29 | 2238,59 | 10,85 |
| Hosh Ghanam | 62,31 | 699,67 | 11,23 |
| Jdita | 183,24 | 2179,79 | 11,89 |
| Hezerta | 131,51 | 1636,30 | 12,44 |
| Niha | 431,77 | 5732,50 | 13,27 |
| Nabi Ayla | 308,1 | 4146,95 | 13,46 |
| Taalbaya | 128,52 | 1786,66 | 13,90 |
| Anjar | 552,33 | 8817,36 | 15,96 |
| Ksara | 14,6075 | 241,56 | 16,53 |
| Ferzol | 946,6 | 15996,01 | 16,89 |
| Toueite | 51,61 | 890,36 | 17,25 |
| Ablah | 191,99 | 3603,79 | 18,77 |
| Boueirej | 34,402 | 682,16 | 19,82 |

Pour distribuer ces résultats spatialement, il était nécessaire de les discrétiser afin de faciliter la représentation spatiale. Pour cela, nous avons classé les communes en 4 classes en se basant sur le calcul des quartiles comme il est présenté dans la **figure 77** ci-dessous.

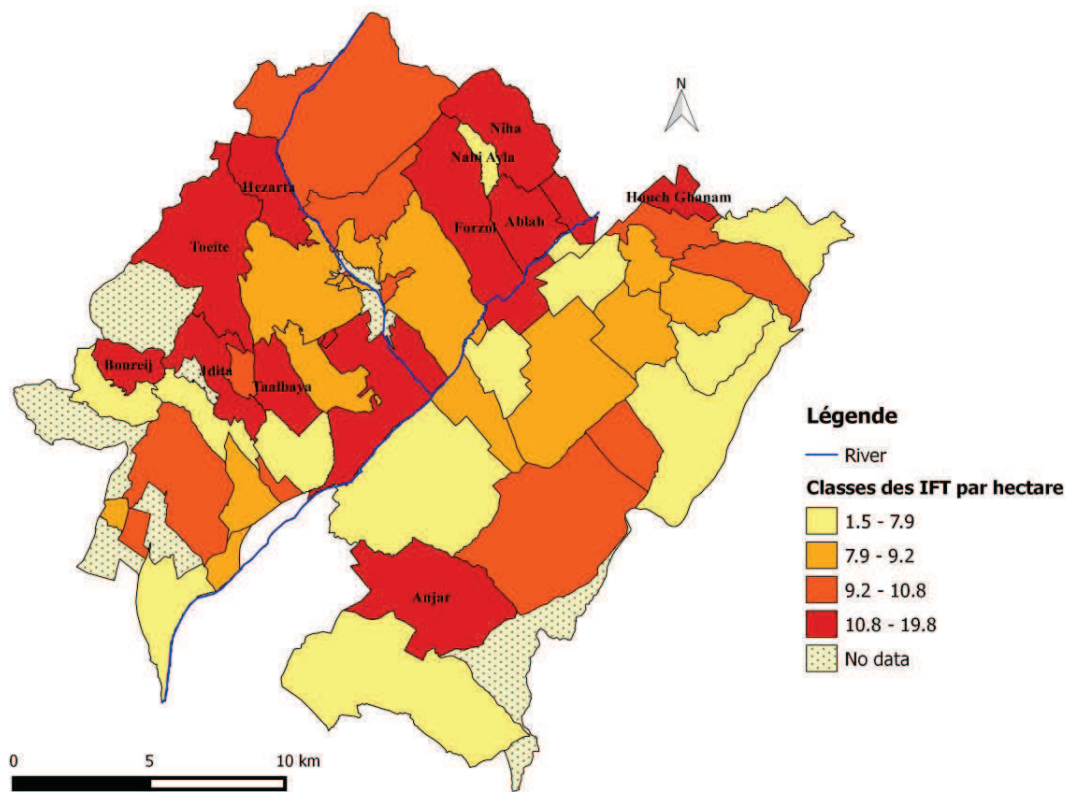


Figure 70: Distribution spatiale des IFT moyennes par hectare et par commune (source: travail de Kanj F., 2016, données de terrain).

De façon globale, les communes situées sur la plaine agricole du caza de Zahlé sont les communes à forte pression phytosanitaire à l'exception de Nabi Ayla au Nord et Tall Akhdar au Sud. De même la commune Quab Elias qui est situé au sud-ouest du Caza est caractérisée par une forte pression phytosanitaire.

De cette base, nous constatons qu'il existe une inégalité entre les communes et cette inégalité est due à la différence de la SAU, des systèmes de production et des comportements des producteurs en termes d'utilisation des produits phytosanitaires.

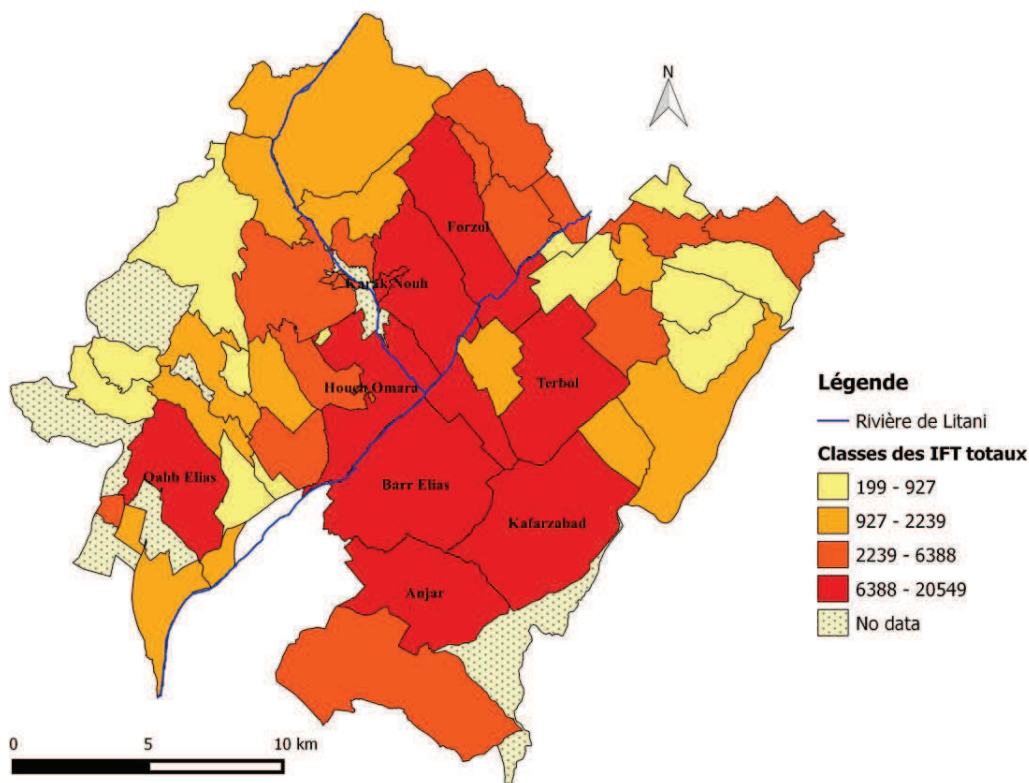


Figure 71: Distribution spatiale des IFT totaux par commune (Source : travail de Kanj F., 2016, données de terrain).

La pression des traitements des produits phytosanitaires est liée directement aux types de cultures et à la SAU cultivée. En revanche, le calcul de l'IFT ne prend pas en considération les matières actives de chaque produit traité, mais il est basé sur les spécialités commerciales. De plus les IFT ne tiennent pas compte des caractéristiques spécifiques de chaque produit phytosanitaire telles que le comportement dans l'environnement, la solubilité, la volatilité, la toxicité par les organismes non ciblées, l'écotoxicité pour le milieu ni aussi la vulnérabilité propre à chaque milieu physique.

Il est seulement un indicateur d'évaluation de pression phytosanitaire à l'échelle d'une parcelle, d'une exploitation, ou d'une région.

Conclusion du chapitre 7

Tous les éléments analysés dans ce chapitre mettent en évidence la diversité des formes qui caractérisent l'agriculture du territoire du caza de Zahlé. Des stratégies et des tactiques différentes ont été adaptées à la structure de l'exploitation agricole, aux conditions pédoclimatiques et aux aménagements hydroagricoles.

Ce regroupement des exploitations constitue une synthèse de gestion de l'espace en fonction des types de fonctionnements spatiaux. Cinq grands systèmes de production ont été définis et distribués spatialement: (1) viticulture et oléiculture; (2) cultures maraîchères et cultures industrielles; (3) céréaliculture; (4) arboriculture et (5) viticulture. Ces systèmes de production suivant un fonctionnement spatial interrogent sur les pratiques phytosanitaires et leurs conséquences environnementales. Les procédés des perceptions par les agriculteurs face à l'utilisation des produits phytosanitaires ont montré un manque de responsabilisation environnementale chez la majorité des agriculteurs de notre zone d'étude. Leurs pratiques ne concordent ni avec les bonnes pratiques agricoles ni avec les aménagements souhaités au niveau du territoire d'étude.

Néanmoins, ces données nous permettent de tenir compte des pratiques phytosanitaires et de leur diversité, du comportement des agriculteurs et de leurs perceptions des effets des produits phytosanitaires sur l'environnement.



Figure 72: Les mauvaises pratiques phytosanitaires au niveau du territoire d'étude (source: travail de terrain, 2016)

CHAPITRE VIII

RÉSULTATS RETENUS DU MODÈLE ET STRATÉGIES PROPOSÉES EN SE BASANT SUR L'ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie traite des pesticides dans le sol ; il ne s'agit pas de comparer nos résultats en termes de normes de pollution car jusqu'à présent au niveau international même national, aucun seuil de qualité n'a été défini (Djamila, 2012), mais plutôt de comprendre le devenir des matières actives à travers le modèle. La deuxième partie traite la question de transfert des pesticides de la surface du sol vers les eaux souterraines. Nous avons essayé de comparer les résultats de lixiviation des matières actives dans les eaux souterraines en termes de normes de pollution.

Afin de tester la capacité du modèle PEARL vis-à-vis du devenir des pesticides dans le sol et le transfert dans les profondeurs du sol pour arriver aux eaux souterraines, nous avons effectué la simulation sur une année d'application des pesticides à des dates différentes en faisant varier le type de sol existant par culture.

Nous avons comparé les mêmes itinéraires techniques sur différents types de sol dans les mêmes conditions climatiques. Il était nécessaire de signaler que notre analyse a été effectuée sur une année culturale et lors de l'application de la matière active utilisée sur une culture bien définie, à titre d'exemple pour la culture de la vigne la simulation va commencer lors de la date du premier traitement qui est du 15/5/2015 au 15/5/2016 pour les insecticides et du 15/6/2015 au 15/6/2016 pour les herbicides. Pour la même raison citée ci-dessus, l'état initial des sols est supposé sans traitement par le modèle.

Avant de commencer la simulation et l'analyse des résultats, nous avons défini d'une part les caractéristiques des matières actives retenues dans notre étude (lors de la démarche méthodologique) et d'autre part les types de sol retenus avec leur vitesse d'infiltration (selon la littérature, à titre d'exemple les travaux adaptés de Ferguson, 1994).

1. Caractéristiques des matières actives retenues dans notre analyse

Les matières actives les plus utilisées au niveau de notre territoire d'étude sont Alfa Cyperméthrin, Diméthoate, Flutriafol, Oxychlorure de cuivre, Hydroxyde de cuivre, Methomyl, Chlorpyrifos Ethyl, Glyphosate, Lambda Cyhalothrin et Proquinazid (**tableau 30, p. 181**).

Chaque matière active possède des caractéristiques spécifiques, pour cela nous allons décrire les caractéristiques de chacune de ces matières en termes de caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques. Ces caractéristiques influencent les risques de transfert de cette substance active vers les eaux, et le risque de pollution des eaux.

1.1. Alfa Cyperméthrin

Cette matière active est surtout utilisée sur la pomme de terre, les pommiers et les cerisiers.

L'alpha-cyperméthrine ou alphaséthine est une substance active d'un insecticide qui appartient à la famille chimique des pyréthrinoïdes de synthèse.

Les caractéristiques physico-chimiques de cette matière sont définies comme suit :

- Hydrolyse à pH 7 : stable
- Solubilité : 0,01 mg·L⁻¹
- Coefficient de partage carbone organique-eau : 16 344 cm³·g⁻¹. Ce paramètre, noté K_{oc}, représente le potentiel de rétention de cette substance active sur la matière organique du sol. La mobilité de la matière active est réduite par son absorption sur les particules du sol.
- Durée de demi-vie : 91 jours. Ce paramètre, noté DT₅₀, représente le potentiel de dégradation de cette substance active et sa vitesse de dégradation dans le sol.
- Coefficient de partage octanol-eau : 5,16. Ce paramètre, noté log K_{ow} ou log P, mesure l'hydrophilie (valeurs faibles) ou la lipophilie (valeurs fortes) de la substance active.

1.2. Diméthoate

Cette matière active est utilisée sur la pomme de terre. Elle est l'une des substances actives les plus dangereuses et les plus toxiques sur la santé humaine mais également sur l'environnement. Le diméthoate, ou 2-diméthoxy-phosphinothioylthio-N-méthylacétamide, est un composé organique de la famille des organophosphorés de formule C₅H₁₂NO₃PS₂.

C'est un insecticide et acaricide à large spectre apparu en 1948 à action systémique ou par contact. Le diméthoate est efficace contre de nombreuses espèces d'insectes, en particulier les insectes suceurs-piqueurs tels que pucerons, les thrips, les cicadelles et les aleurodes ainsi que les mineuses (larves de diptères creusant des galeries dans les feuilles). La durée de demi-vie est de 3 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

1.3. Flutriafol

Cette matière active est utilisée sur les pommiers, les cerisiers et les vignes alors que d'après la base PPBD, le flutriafol est homologué seulement sur les céréales et les pommiers.

Le flutriafol est un fongicide systémique qui inhibe la déméthylase. Il est de la famille des Triazoles. Cette matière active à large spectre permet de lutter contre certains ascomycètes et champignons causant la rouille dans diverses cultures. Il n'est pas une matière cancérigène mais il a un risque aiguë. La durée de demi-vie est de 1358 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

1.4. Oxychlorure de cuivre

Les agriculteurs utilisent l'oxychlorure de cuivre sur les vignes.

Le cuivre est un produit naturel qui existe le plus souvent sous forme de sulfure. C'est un métal lourd, non biodégradable, qui peut devenir toxique pour la microfaune (champignons, vers de terre...), notamment sur sol acide. La durée de demi-vie est de 10 000 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

L'oxychlorure de cuivre possède plusieurs propriétés :

- Il est à la fois bactéricide et fongicide :
 - Il permet d'éviter certaines maladies en agissant de façon préventive contre les bactéries.
 - Il évite le développement des champignons en luttant contre leur germination.
- Il freine le développement des plantes :
 - Il faut veiller à ne pas nuire aux végétaux en respectant à la fois la fréquence et la période de traitement.

1.5. Hydroxyde de cuivre

L'hydroxyde de cuivre est utilisé par les agriculteurs sur les pommes de terre. La durée de demi-vie est de 10 000 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

C'est un fongicide puissant utilisé soit en préventif, soit en curatif contre le mildiou, la cloque et la bactériose. Utilisé de façon préventive pendant les périodes à risque, il empêche l'installation du mildiou sur les cultures de pommes de terre et de tomates.

1.6. Méthomyl

Les agriculteurs utilisent le méthomyl sur les pommes de terre et les vignes. La durée de demi-vie est de 7 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT). Le méthomyl, ou méthyl N [(méthyl-amino)carbonyl-oxy] éthanimidothioate, est un carbamate anti-cholinestérasique.

Ce produit est un insecticide, utilisé souvent pour lutter contre les larves, les insectes, les rongeurs et les champignons, mais aussi dans les ménages et dans les agglomérations urbaines pour lutter contre les moustiques et les vecteurs.

1.7. Chlorpyrifos-éthyl

Le chlorpyrifos-éthyl est utilisé par les agriculteurs qui cultivent les pommiers, les cerisiers, les vignes et les pommes de terre.

Le chlorpyrifos-éthyl (ou chlorpyrifos-éthyl) est une substance active d'un produit de défense contre les bio-agresseurs ou produit phytopharmaceutique. Il présente un effet insecticide, qui appartient à la famille chimique des organophosphorés organochlorés. La durée de demi-vie est de 35 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

1.8. Glyphosate

Le glyphosate est utilisé sur les cultures du blé et des vignes dans notre zone d'étude. Le glyphosate (N-(phosphonométhyl)glycine, C₃H₈NO₅P) est un herbicide utilisé en pré-récolte. C'est un herbicide systémique, non sélectif.

C'est aussi un organophosphoré non inhibiteur des cholinestérases. Il est utilisé pour détruire les vivaces à enracinement profond et les herbes annuelles ou bisannuelles dans certaines zones cultivées, mais également pour le désherbage des allées de parcs, jardins publics et trottoirs. La durée de demi-vie est de 32 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

1.9. Lambda Cyhalothrin

Le lambda cyhalothrin est utilisé par les agriculteurs qui pratiquent les pommiers, les cerisiers et les vignes. La lambda-cyhalothrine est un Pyréthriinoïde de synthèse utilisé pour contrôler une large gamme de ravageurs.

Les études montrent que la lambda-cyhalothrine n'est pas facilement volatilisable dans l'atmosphère à cause de sa faible pression de vapeur, mais se dissipe rapidement dans l'eau (Farmer *et al.*, 1995) à cause de son adsorption sur les particules et les organismes aquatiques. La durée de demi-vie est de 60 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

1.10. Proquinazid

Le proquinazid est utilisé sur les vignes. C'est un fongicide qui appartient à la famille des Quinazolinone. La durée de demi-vie est de 60 jours (d'après la base de données de FOOTPRINT).

Puisque notre étude va comporter une analyse des mêmes itinéraires techniques sur différents types de sol, alors, il était indispensable de décrire les types de sol au niveau du territoire d'étude.

2. Les type des sols retenus avec les vitesses d'infiltration

Après avoir identifié les types des sols existants dans notre zone d'étude (c.f. chapitre 4), nous avons regroupé les types de sol selon leur texture afin de décrire chaque type pour une meilleure compréhension de l'analyse de nos résultats.

La texture du sol est l'une des propriétés de sol qui nous permet de comprendre la différence de la vitesse d'infiltration des matières actives dans la profondeur du sol pour se diffuser dans les eaux souterraines.

Nous tenons compte de trois types: le sable, le limon et l'argile. La plupart des sols se composent d'un mélange de ces trois types de sols.

Nous distinguons au niveau des sols argileux, des sols sableux, des sols limoneux, des sols argileux limoneux, des sols argileux sableux et des sols argileux sablonneux. Chacun de ces types possède des caractéristiques spécifiques. Pour cela nous allons définir les trois types principaux que sont : le sol argileux, le sol limoneux et le sol sableux.

2.1. Les sols sableux

Les particules d'un sol sableux sont relativement espacées, ce qui permet à l'eau de s'écouler rapidement. Les substances dissoutes dans l'eau s'infiltrent vite dans les profondeurs du sol et éventuellement dans les eaux souterraines. Certaines activités agricoles, comme le mélange des pesticides, le rinçage des cuves et l'entreposage du fumier, des engrais et des combustibles, peuvent être particulièrement dangereuses sur un sol sableux.

Dans les régions à sol sableux, le risque d'entreposage des polluants est très important. Il est important de situer de manière appropriée les puits et de bien les entretenir, car un puits peut devenir un « raccourci » pour des polluants s'écoulant vers les eaux souterraines. La sur-fertilisation à l'azote des terres sableuses risque de causer la contamination des eaux souterraines par infiltration d'azote.

2.2. Sols limoneux

Bien que tous les sols soient sujets à une éventuelle érosion par l'eau, le limon et le loam limoneux sont les plus menacés. Sur les pentes longues ou abruptes, l'érosion par l'eau s'intensifie et le ruissellement peut atteindre une vitesse impressionnante. L'érosion par l'eau s'accompagne du ruissellement de substances dissoutes ou fixées à des particules.

Pour réduire l'érosion par l'eau, on recommande notamment les pratiques suivantes : les rotations culturales, les cultures de protection, le travail du sol de conservation, la culture étagée et l'aménagement de bandes de protection végétalisées et de rigoles gazonnées.

2.3. Sols argileux

Les sols renfermant une forte proportion d'argile sont propices à l'agriculture en zone aride, mais certaines caractéristiques de ces sols peuvent causer le déplacement des polluants présents dans les sols cultivés. La structure superficielle des sols argileux peut se dégrader, formant une croûte. L'encroûtement limite l'infiltration et accroît le ruissellement. Un sol argileux mouillé a tendance à se compacter, ce qui favorise également le ruissellement, lequel peut contenir des polluants et affecter la qualité des eaux de surface ou souterraines. Les sédiments de la finesse de l'argile prennent beaucoup de temps à se déposer dans les étangs-réservoirs, les ruisseaux et les lacs, ce qui entraîne une hausse importante du coût du traitement de l'eau.

La vitesse d'infiltration des différents types de sol est détaillée dans le tableau 41 suivant.

Tableau 41: Taux d'infiltration typiques (Source: adapté de Ferguson, 1994)

| Type de sol | Taux d'infiltration pour conception (facteur de sécurité de 0.5) | |
|-------------------------|--|----------------|
| | (mm/h) | (m/s) |
| Sable | 105 | $2,92.10^{-5}$ |
| Sable limoneux | 30.5 | $8,45.10^{-6}$ |
| Limon sablonneux | 13 | $3,16.10^{-6}$ |
| Limon | 6.5 | $1,18.10^{-6}$ |
| Limon silteux | 3.4 | $9,45.10^{-7}$ |
| Limon argilo-sablonneux | 2.2 | $5,95.10^{-7}$ |
| Limon argileux | 1.2 | $3,20.10^{-7}$ |
| Limon argilo-silteux | 0.75 | $2,09.10^{-7}$ |
| Argile sablonneuse | 0.6 | $1,67.10^{-7}$ |
| Argile silteuse | 0.45 | $1,25.10^{-7}$ |
| Argile | 0.3 | $8,35.10^{-8}$ |

En se basant sur la texture du sol de notre zone d'étude, le regroupement des types de sol nous a permis d'identifier 6 types qui sont: Argile, sable, limon argileux, argile sablonneuse, limon argilo-sableux et argile sableux (figure 73).

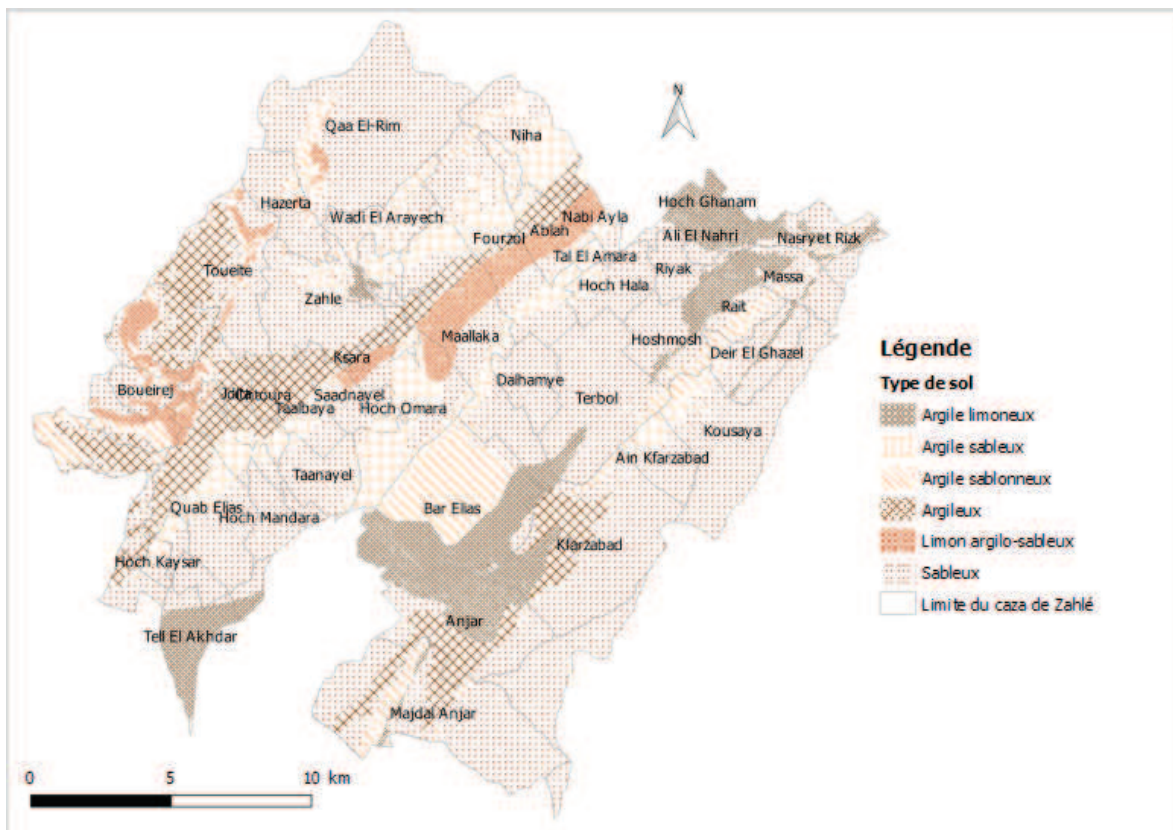


Figure 73: Types de sol de notre zone d'étude (Source: Kanj F. 2016-2017 d'après la base de données pédologique construite au cours du travail de terrain).

3. L'occupation du sol des cultures retenues au niveau du caza de Zahlé

Au niveau de notre zone et d'après les enquêtes qui ont été réalisées auprès des agriculteurs, les pommiers, les cerisiers et les vignes sont localisées dans les montagnes tandis que les cultures de pomme de terre et de blé sont localisées dans la plaine.

Cette notion d'identifier la localisation spatiale des parcelles est très importante pour analyser la diffusion des pesticides dans les eaux souterraines.

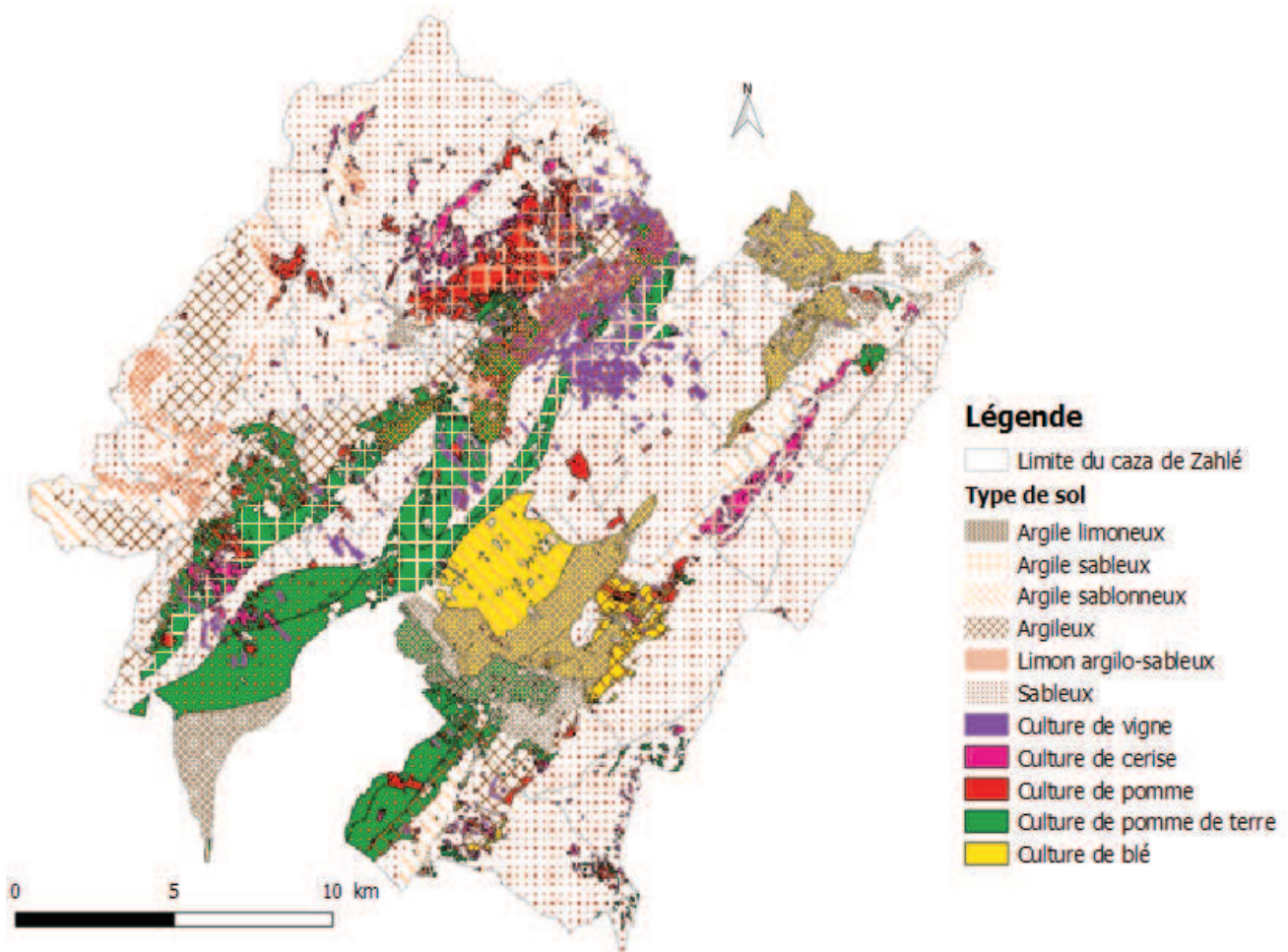


Figure 74: Distribution des parcelles des cultures retenues au niveau du caza de Zahlé (source: Kanj F. 2016-2017).

En fait, la combinaison entre les types des sols et la distribution spatiale des cultures retenues montre clairement que :

- les cultures de pomme de terre sont pratiquées sur des sols sableux (la partie jaune sur la carte) ;
- tandis que le blé est cultivé sur des sols argilo-sableux, argilo-sablonneux et argilo-limoneux (vert foncé sur la carte) ;

- Les vignes sont dominantes dans les sols sableux, argileux, argilo-sableux et limon argilo-sableux (vert clair sur la carte) ;
- Les pommiers sont cultivées sur des sols sableux, argilo-limoneux et argilo-sablonneux (violet sur la carte) ;
- Et enfin les cerisiers sont cultivés sur des sols argilo-sableux, argilo-sablonneux, limon argilo-sableux et sableux (rouge sur la carte).

4. Analyse des résultats du modèle PEARL

4.1. Pour la culture de vigne

4.1.1. Simulation des quantités des matières actives les plus utilisées sur la vigne

Nous avons simulé les quantités et les concentrations des 5 matières actives les plus utilisées au niveau de notre territoire pour le traitement de la vigne à des dates d'applications différentes dans les types de sol. En comparant les résultats obtenus par jour pour les sols définis (**tableau 35**), nous constatons que le comportement des herbicides, des insecticides et des fongicides est différent en fonction des sols. Après une année, après la date d'application, les sols à base d'argile (argilo-limoneux, argile, argilo-sablonneux) présentent des résidus en Chlorpyrifos Ethyl et en Flutriafol de l'ordre de 64% et 45% respectivement pour le sol argile limoneux, 67% et 40% respectivement pour le sol argileux et 59% et 40% respectivement pour le sol argileux sablonneux. En ce qui concerne la matière active glyphosate nous remarquons qu'elle représente des résidus de 54% pour le sol argileux et cela est dû aux caractéristiques de ce type de sol qui possède une vitesse d'infiltration très lente et de cette manière le résidu avec le temps va augmenter.

Nous distinguons que la texture du sol ne semble pas avoir une influence sur la matière active « Flutriafol » car le résidu de cette matière varie entre 22% et 50% après une année d'application. Cela n'a qu'une seule explication à savoir que la durée de la demi-vie de cette matière est de 1358 jours pour être dégradée dans le sol et la demi vie typique au champs est de 860 jours ce qui est aussi énorme.

Tableau 42: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: Réalisation personnelle).

| Type de sol | Matière active | Quantité apportée en 2015 (kg/ha) | Quantité accumulée (kg/ha) | Résidu après une année (%) |
|-----------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Argile limoneux | Chlorpyrifos Ethyl | 0.07 | 0.064 | 64 |
| | Flutriafol | 0.06 | 0.11 | 45 |
| | Glyphosate | 0.17 | 0.017 | 17 |
| | Methomyl | 0.25 | 0 | 0 |
| | Proquinazid | 0.005 | 0.008 | 8 |
| Argile | Chlorpyrifos Ethyl | 0.07 | 0.067 | 67 |
| | Flutriafol | 0.06 | 0.1 | 40 |
| | Glyphosate | 0.17 | 0.054 | 54 |

| | | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------|---------|-----------|
| | Methomyl | 0.25 | 0 | 0 |
| | Proquinazid | 0.005 | 0.004 | 4 |
| Argile sablonneux | Chlorpyrifos Ethyl | 0.07 | 0.059 | 59 |
| | Flutriafol | 0.06 | 0.1 | 40 |
| | Glyphosate | 0.17 | 0.005 | 0.5 |
| | Methomyl | 0.25 | 0 | 0 |
| | Proquinazid | 0.005 | 0.0031 | 3 |
| Sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0.07 | 0.0061 | 6.1 |
| | Flutriafol | 0.06 | 0.1 | 40 |
| | Glyphosate | 0.17 | 0.0005 | 0.5 |
| | Methomyl | 0.25 | 0 | 0 |
| | Proquinazid | 0.005 | 0.002 | 2 |
| Argile sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0.07 | 0.0069 | 0 |
| | Flutriafol | 0.06 | 0.117 | 22 |
| | Glyphosate | 0.17 | 0.00051 | 0.05 |
| | Methomyl | 0.25 | 0 | 0 |
| | Proquinazid | 0.005 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0.07 | 0.0067 | 7 |
| | Flutriafol | 0.06 | 0.12 | 50 |
| | Glyphosate | 0.17 | 0.00058 | 0.05 |
| | Methomyl | 0.25 | 0 | 0 |
| | Proquinazid | 0.005 | 0.00046 | 0.04 |

4.1.2. Simulation des devenir de chaque matière active dans les sols de 2015 à 2016

La substance « Chlorpyrifos-éthyl »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance « Chlorpyrifos-éthyl » varient d'un sol à l'autre. D'après le tableau 43 et la figure 75, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, de volatilisation et de lixiviation. La phase de transformation est présente dans tous les types des sols. La phase de volatilisation est plus importante dans les sols argileux que dans les sols sableux, par contre la phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux.

Tableau 43: Le bilan du Chlorpyrifos-éthyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|------|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|------|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Unité | | | | | | | | | | | | |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,08 | 100 | 0,08 | 100 | 0,08 | 100 | 0,08 | 100 | 0,08 | 100 | 0,08 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,058 | 72,5 | 0,052 | 65 | 0,062 | 77 | 0,065 | 81 | 0,07 | 87 | 0,07 | 87 |
| absorbée | | | | | | | | | | | | |
| Lixiviée | | | | | 0,012 | 15 | 0,009 | 11 | 0,001 | 1,5 | 0,003 | 4 |
| Volatilisée | 0,02 | 27,5 | 0,026 | 35 | 0,006 | 8 | 0,006 | 8 | 0,009 | 11,5 | 0,007 | 9 |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active chlorpyrifos-éthyl dans chaque type de sol qui a été signalée dans le tableau 43 est issue des résultats du modèle PEARL. La figure 75 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de vigne.

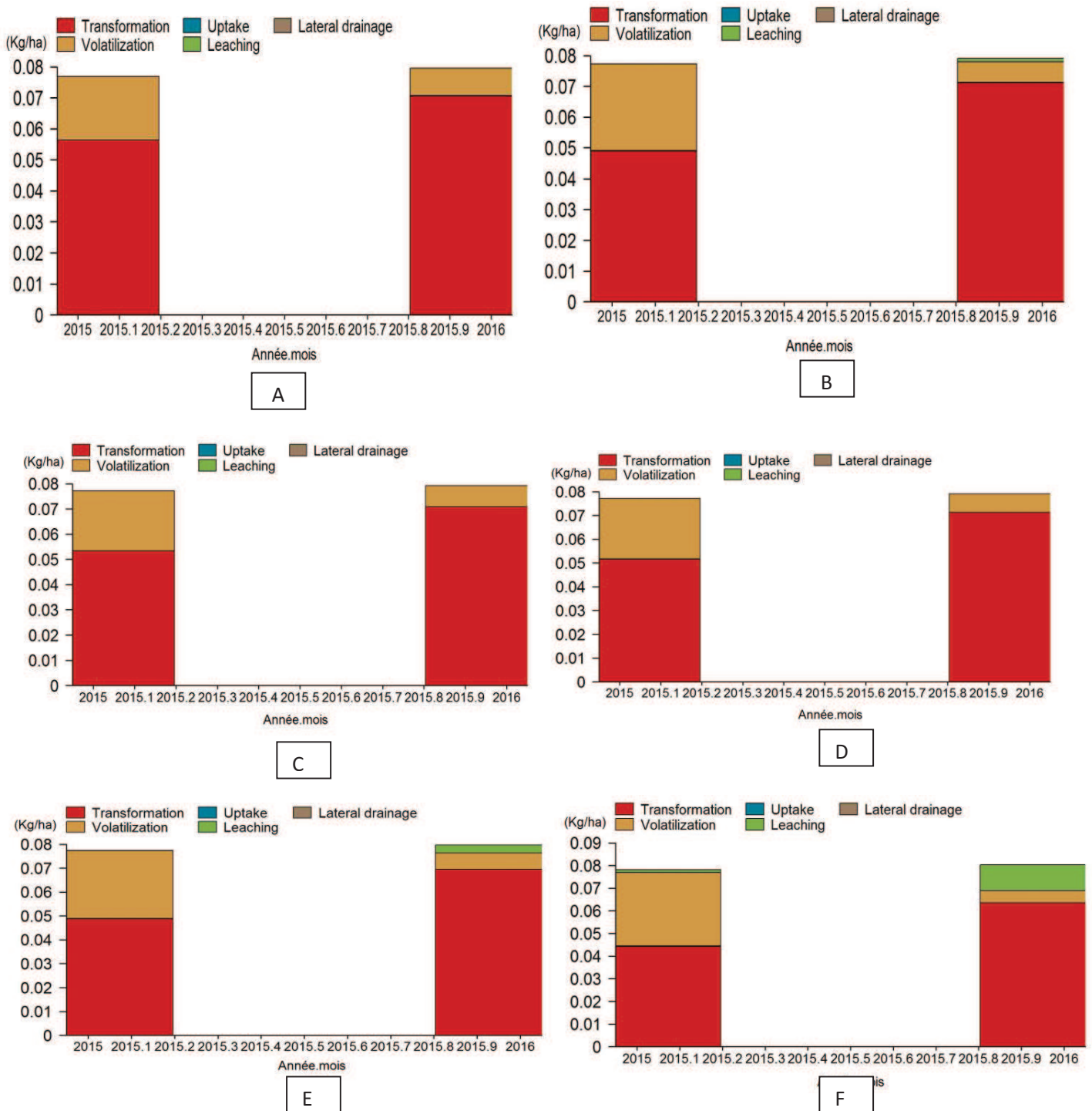


Figure 75: La quantité perdue de la matière active "chlorpyrifos-éthyl" pour la culture de vigne dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sol sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance «Flutriafol»

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Flutriafol» varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 44 et la figure 76, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption et de lixiviation. Les phases de lixiviation et de transformation sont présentes dans tous les types des sols. La phase d'absorption est plus importante dans les sols argileux que dans les sols sableux.

Mais ce qui est remarquable, c'est que la quantité lixiviée de cette substance active est très importante par rapport aux autres phases et elle n'est pas influencée par la texture du sol.

Tableau 44: Le bilan du Flutriafol dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|------|------------|------|-------------------|------|---------|------|----------------|------|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0.13 | 100 | 0.13 | 100 | 0.13 | 100 | 0.13 | 100 | 0.13 | 100 | 0.13 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0.002 | 1.5 | 0.002 | 1.5 | 0.001 | 0.8 | 0.002 | 1.5 | 0.002 | 1.5 | 0.13 | 100 |
| Absorbée | 0.0005 | 0.4 | 0.000 5 | 0.4 | 0.0005 | 0.4 | | | | | | |
| Lixiviée | 0.1275 | 98.1 | 0.128 | 98.5 | 0.0115 | 98.8 | 0.1275 | 98.1 | 0.128 | 98.5 | | |
| Volatilisée | | | | | | | | | | | | |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active flutriafol dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 44 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 76 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de vigne.

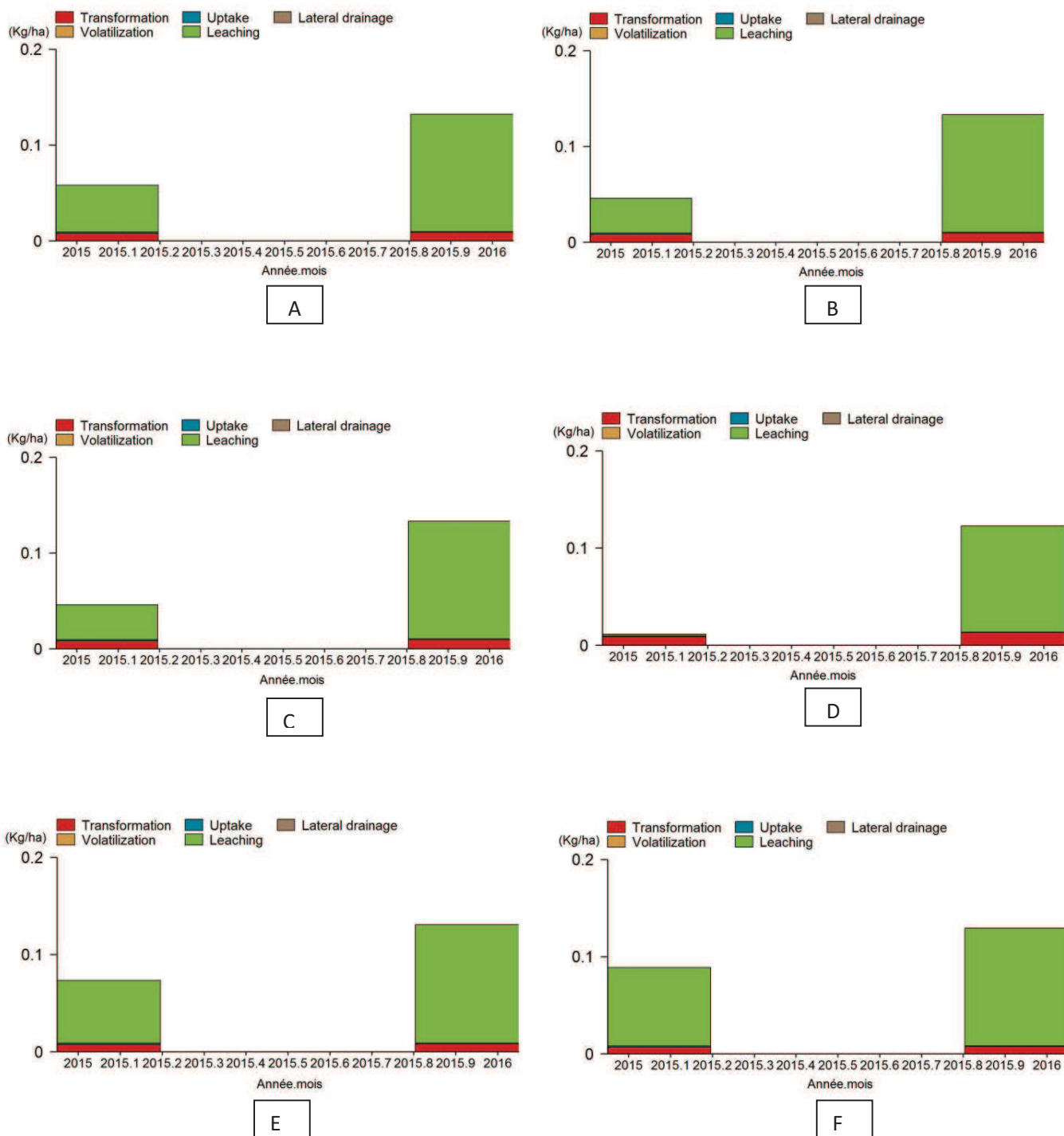


Figure 76: La quantité perdue de la matière active "flutriafol" pour la culture de vigne dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols limoneux argilo-sableux et F: sol sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance «Glyphosate»

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Glyphosate» dans les différents types du sol sont les mêmes. Nous remarquons qu'une seule phase de dissipation des pesticides est vécue qui est la transformation (tableau 45). Cela nous laisse conclure que le devenir de la substance active glyphosate n'est pas influencé par le type de sol d'une part et il ne présente pas un risque sur les eaux souterraines d'autre part.

Tableau 45: Le bilan du Glyphosate dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Unité | Quantité appliquée | Quantité adsorbée | Quantité transformée | Quantité absorbée | Quantité lixiviée | Quantité volatilisée | Quantité drainée |
|----------------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Argilo limoneux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argileux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argilo sablonneux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sableux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argile sableux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |

La substance «Proquinazid»

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Proquinazid» dans les différents types du sol sont les mêmes. Nous remarquons qu'une seule phase est prononcée c'est la transformation (tableau 46). Cela nous permet de conclure que le devenir de la substance active proquinazid n'est pas influencée par le type de sol d'une part et n'a pas de risque sur les eaux souterraines d'autre part.

Tableau 46: Le bilan du Proquinazid dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Unité | Quantité appliquée | Quantité adsorbée | Quantité transformée | Quantité absorbée | Quantité lixiviée | Quantité volatilisée | Quantité drainée |
|-------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Argilo | (kg/ha) | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|------|---|------|---|---|---|---|---|
| limoneux | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argileux | (kg/ha) | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argilo sablonneux | (kg/ha) | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sableux | (kg/ha) | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argilo sableux | (kg/ha) | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | (kg/ha) | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

La substance «Méthomyl»

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Méthomyl» varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 47 et la figure 77, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation et de lixiviation. La phase de transformation est présente dans tous les types des sols. La phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux. Nous en déduisons donc que plus la texture est grosse plus la substance active a tendance à être transférée dans les profondeurs du sol.

Tableau 47: Le bilan du Méthomyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|-----|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0.27 | 100 | 0.27 | 100 | 0.27 | 100 | 0.27 | 100 | 0.27 | 100 | 0.27 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0.2 | 74 | 0.23 | 85 | 0.2 | 74 | 0.19 | 70 | 0.22 | 81 | 0.19 | 70 |
| Absorbée | | | | | | | | | | | | |
| Lixiviée | 0.7 | 26 | 0.04 | 15 | 0.07 | 26 | 0.08 | 30 | 0.05 | 19 | 0.08 | 30 |
| Volatilisée | | | | | | | | | | | | |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active méthomyl dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 47 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 77 montre la quantité perdue par

chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de vigne.

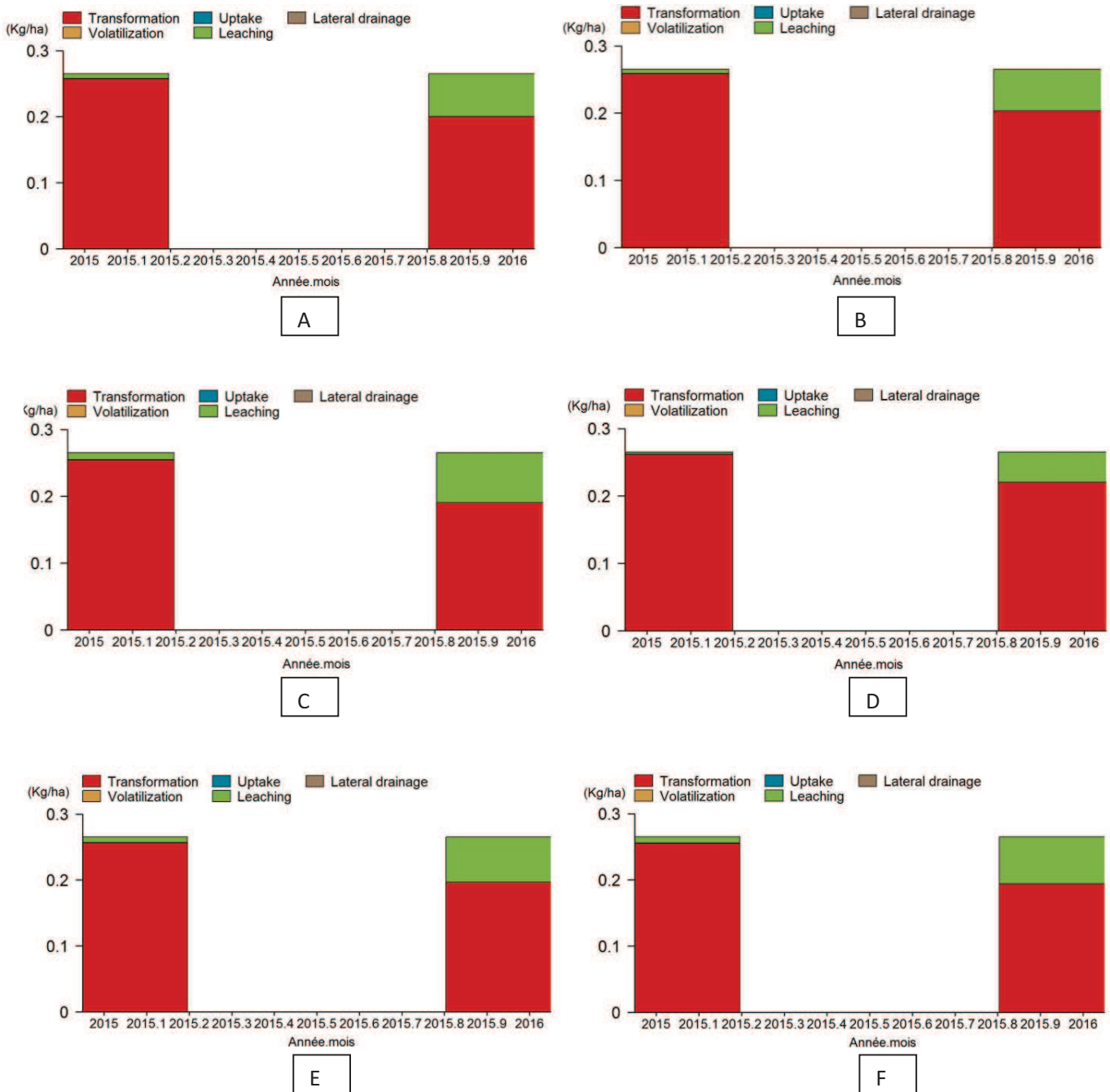


Figure 77: La quantité perdue de la matière active "méthomyl" pour la culture de vigne dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sol limoneux argilo-sableux et F: sol sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

4.2. Analyse de la culture Blé

En se basant sur l'analyse des substances utilisées dans notre méthodologie de travail, le blé est parmi les cultures retenues dans notre zone d'étude. Les agriculteurs qui la pratiquent utilisent la substance active « Glyphosate ».

4.2.1. Simulation des quantités de la substance active « Glyphosate » sur le blé

Nous avons simulé les quantités et les concentrations de la substance active « Glyphosate » pour le traitement du blé à des dates d'applications différentes dans les types de sol. En comparant les résultats obtenus par jour pour les sols définis (tableau 48), nous constatons que le comportement du glyphosate est différent en fonction des sols. Après une année de la date d'application, les sols présentent des résidus qui varient entre 0.6 et 2%. Nous remarquons que les sols à base d'argile présentent des résidus plus importants que dans les sols sableux, mais les quantités sont basses.

Table 48: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: Réalisation personnelle).

| Type de sol | Quantité apportée en 2015 (kg/ha) | Quantité accumulée (kg/ha) | Résidu après une année (%) |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Argile limoneux | 0.25 | 0.0017 | 2 |
| Argile | 0.25 | 0.00058 | 0.5 |
| Argile sablonneux | 0.25 | 0.0017 | 2 |
| Sableux | 0.25 | 0.0012 | 1.5 |
| Argile sableux | 0.25 | 0.00176 | 2 |
| Limon argile-sableux | 0.25 | 0.0006 | 0.6 |

4.2.2. Simulation des devenir de chaque matière active dans les sols de 2015 à 2016

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Glyphosate» dans les différents types du sol sont décrits dans le tableau 49. D'après ce tableau, une seule phase prononcée pour tous les sols est la transformation. Cela nous laisse conclure que le devenir de la substance active glyphosate n'est pas influencée par le type de sol d'une part et qu'il n'a pas un risque sur les eaux souterraines d'autre part.

Table 49: Le bilan du Glyphosate dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Unité | Quantité appliquée | Quantité adsorbée | Quantité transformée | Quantité absorbée | Quantité lixiviée | Quantité volatilisée | Quantité drainée |
|-------------|-------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|
|-------------|-------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|------|---|------|---|---|---|---|
| Argile limoneux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argileux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argile sablonneux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sableux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argile sableux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | (kg/ha) | 0.25 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.3. Analyse de la culture de Pomme de terre

En se basant sur l'analyse des substances utilisées dans notre méthodologie de travail, la pomme de terre est parmi les cultures retenues dans notre zone d'étude. Les substances actives les plus utilisées par les agriculteurs pour traiter cette culture contre les ravageurs sont le chlorpyrifos-éthyl, l'alfa cyperméthrin, le méthomyl et le diméthoate.

4.3.1. Simulation des quantités des matières actives les plus utilisées sur la pomme de terre

Nous avons simulé les quantités et les concentrations des 4 matières actives les plus utilisées au niveau de notre territoire pour le traitement de la pomme de terre à des dates d'applications différentes dans les types de sol. En comparant les résultats obtenus par jour pour les sols définis (tableau 50), nous constatons que le comportement des herbicides, insecticides et des fongicides est différent en fonction des sols. Après une année de date d'application, les sols à base d'argile (argile limoneux, argile, argile sablonneux) présentent des résidus en Chlorpyrifos Ethyl : 16% pour le sol argile limoneux, 18% pour le sol argileux et 14% pour le sol argileux sablonneux. En ce qui concerne la substance active alfa cyperméthrin, nous remarquons qu'elle représente des résidus qui varient entre 2 et 3% en fonction de types des sols.

Et enfin pour les deux substances actives le méthomyl et le diméthoate, elles ne présentent pas de résidus après une année d'application.

Tableau 50: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: Réalisation personnelle).

| Type de sol | Matière active | Quantité apportée en 2015 (kg/ha) | Quantité accumulée (kg/ha) | Résidu après une année (%) |
|------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Argile limoneux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,28 | 0,016 | 16 |

| | | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------|--------|-----------|
| | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,0015 | 2 |
| | Dimethoate | 0,7 | 0 | 0 |
| | Methomyl | 0,25 | 0 | 0 |
| Argile | Chlorpyrifos Ethyl | 0,28 | 0,018 | 18 |
| | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,0013 | 2 |
| | Dimethoate | 0,7 | 0 | 0 |
| | Methomyl | 0,25 | 0 | 0 |
| Argile sablonneux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,28 | 0,014 | 14 |
| | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,0015 | 3 |
| | Dimethoate | 0,7 | 0 | 0 |
| | Methomyl | 0,25 | 0 | 0 |
| Sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,28 | 0,0094 | 9 |
| | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,0016 | 3 |
| | Dimethoate | 0,7 | 0 | 0 |
| | Methomyl | 0,25 | 0 | 0 |
| Argile sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,28 | 0,0095 | 9 |
| | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,0017 | 3,2 |
| | Dimethoate | 0,7 | 0 | 0 |
| | Methomyl | 0,25 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,28 | 0,0084 | 8 |
| | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,0013 | 2 |
| | Dimethoate | 0,7 | 0 | 0 |
| | Methomyl | 0,25 | 0 | 0 |

4.3.2. Simulation des devenir de chaque matière active dans les sols de 2015 à 2016

La substance « Chlorpyrifos-éthyl »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance « Chlorpyrifos-éthyl » varient d'un sol à l'autre. D'après le tableau 51 et la figure 78, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption, de volatilisation et de lixiviation. Les phases de transformation et celle de volatilisation sont présentes dans tous les types des sols. La phase d'absorption est présente dans les sols mixtes à base d'argile (argilo-limoneux, argilo-sablonneux et argilo-sableux), mais la quantité absorbée dans ces types de sol est de 1% seulement. Enfin, la phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux. Il est à

noter que la lixiviation est quasiment négligeable dans le sol argileux, elle atteint 12% dans les sols sableux en termes de quantité lixiviée.

Tableau 51: Le bilan du Chlorpyrifos-éthyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|-----|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,28 | 100 | 0,28 | 100 | 0,28 | 100 | 0,28 | 100 | 0,28 | 100 | 0,28 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,15 | 53 | 0,15 | 53 | 0,15 | 53 | 0,13 | 46 | 0,13 | 46 | 0,13 | 46 |
| Absorbée | 0,001 | 1 | | | 0,001 | 1 | | | 0,001 | 1 | | |
| Lixiviée | 0,001 | 1 | | | 0,001 | 1 | 0,03 | 12 | 0,025 | 9 | 0,026 | 10 |
| Volatilisée | 0,128 | 45 | 0,13 | 47 | 0,128 | 45 | 0,12 | 42 | 0,124 | 44 | 0,124 | 44 |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active chlorpyrifos-éthyl dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 51 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 78 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de pomme de terre.

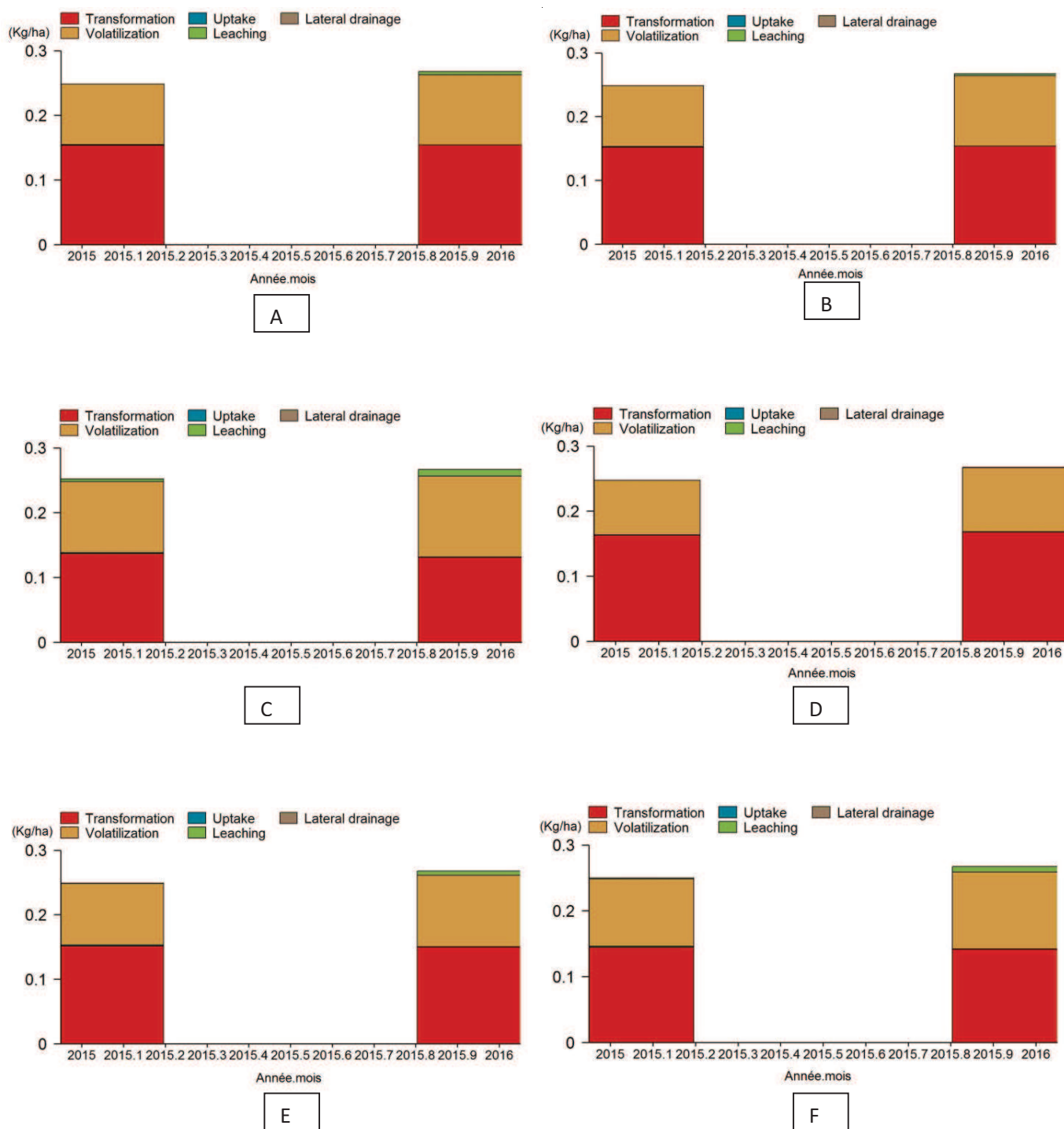


Figure 78: La quantité perdue de la matière active "chlorpyrifos-éthyl" pour la culture de pomme de terre dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance « Alfa cyperméthrin »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Alfa cyperméthrin» varient d'un sol à l'autre. D'après le **tableau 52 et la figure 79**, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption, de volatilisation et de lixiviation. Les quatre phases de dissipation sont présentes dans tous les types des sols. La phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux. Il est à noter que la quantité lixiviée de cette substance active atteint 48% dans les sols sableux et 45% dans les sols argileux, cela nous laisse conclure que cette matière active n'est pas influencée par le type du sol.

Tableau 52: Le bilan d'alfa cyperméthrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|-----|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0.058 | 100 | 0.058 | 100 | 0.058 | 100 | 0.058 | 100 | 0.058 | 100 | 0.058 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0.025 | 43 | 0.023 | 40 | 0.022 | 38 | 0.022 | 38 | 0.024 | 41 | 0.024 | 41 |
| Absorbée | 0.001 | 2 | 0.001 | 2 | 0.001 | 2 | 0.001 | 2 | | | 0.001 | 2 |
| Lixiviée | 0.026 | 44 | 0.026 | 45 | 0.026 | 45 | 0.028 | 48 | 0.026 | 45 | 0.026 | 45 |
| Volatilisée | 0.006 | 11 | 0.008 | 13 | 0.009 | 15 | 0.007 | 12 | 0.008 | 14 | 0.008 | 12 |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active alfa cyperméthrin dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 52 est issue des résultats du modèle PEARL. La figure 79 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de pomme de terre.

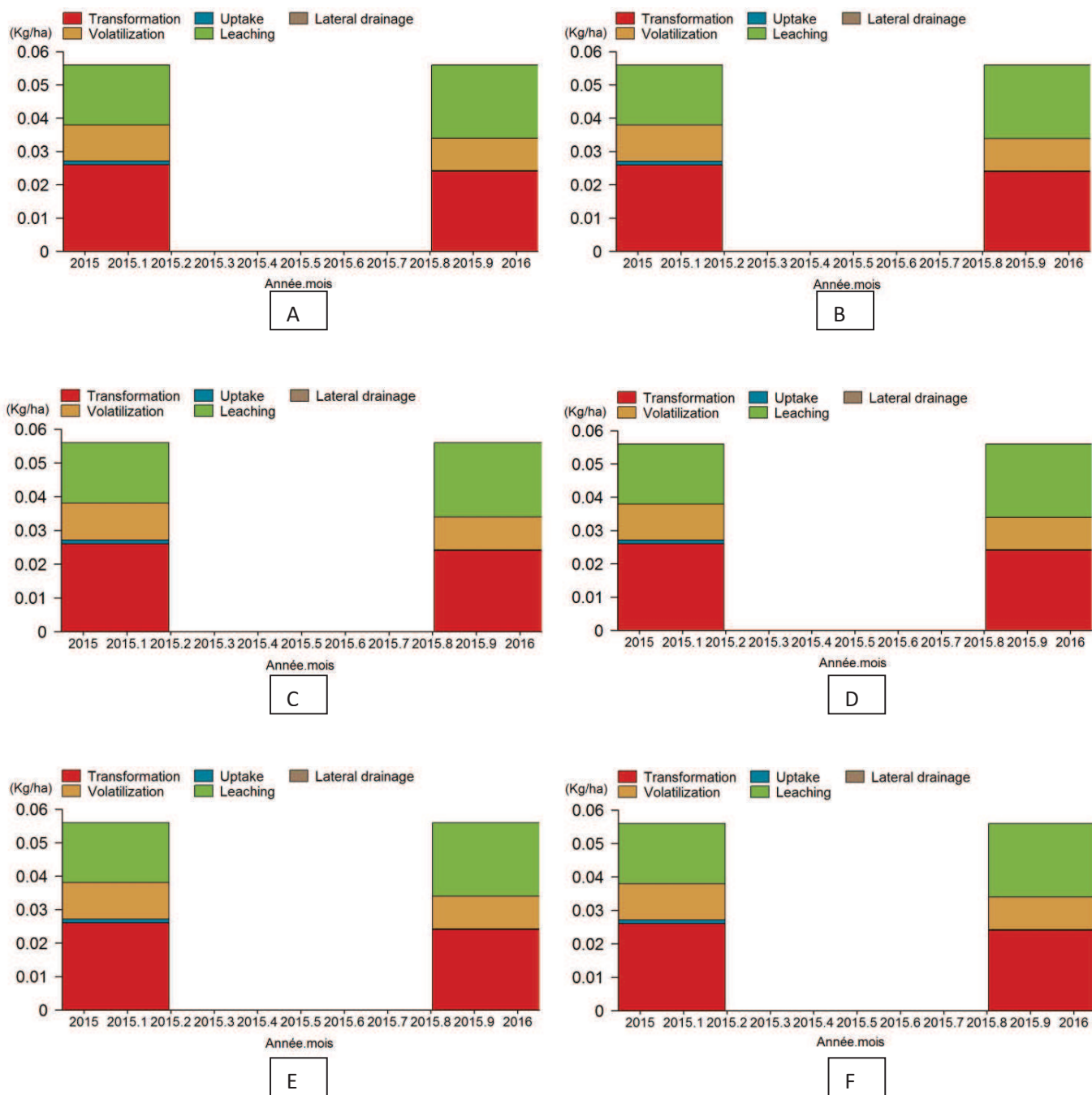


Figure 79: La quantité perdue de la matière active "alfa cypermethrin" pour la culture de la pomme de terre dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance «Méthomyl»

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Méthomyl» varient d'un sol à l'autre. D'après le tableau 53 et les figures 80, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation et de lixiviation. Ces deux phases sont présentes dans tous les types des sols mais en quantités différentes. La phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux. Nous déduisons que plus la texture est grosse plus la substance active a tendance à être transférée dans les profondeurs du sol, c'est le cas du sol sableux qui atteint 16%.

Tableau 53: Le bilan du Méthomyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|-----|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,25 | 100 | 0,25 | 100 | 0,25 | 100 | 0,25 | 100 | 0,25 | 100 | 0,25 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,22 | 88 | 0,24 | 96 | 0,22 | 88 | 0,21 | 84 | 0,23 | 92 | 0,23 | 92 |
| Absorbée | | | | | | | | | | | | |
| Lixiviée | 0,03 | 12 | 0,01 | 4 | 0,03 | 12 | 0,04 | 16 | 0,01 | 8 | 0,02 | 8 |
| Volatilisée | | | | | | | | | | | | |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active méthomyl dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 53 est issue des résultats du modèle PEARL. La figure 80 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de pomme de terre.

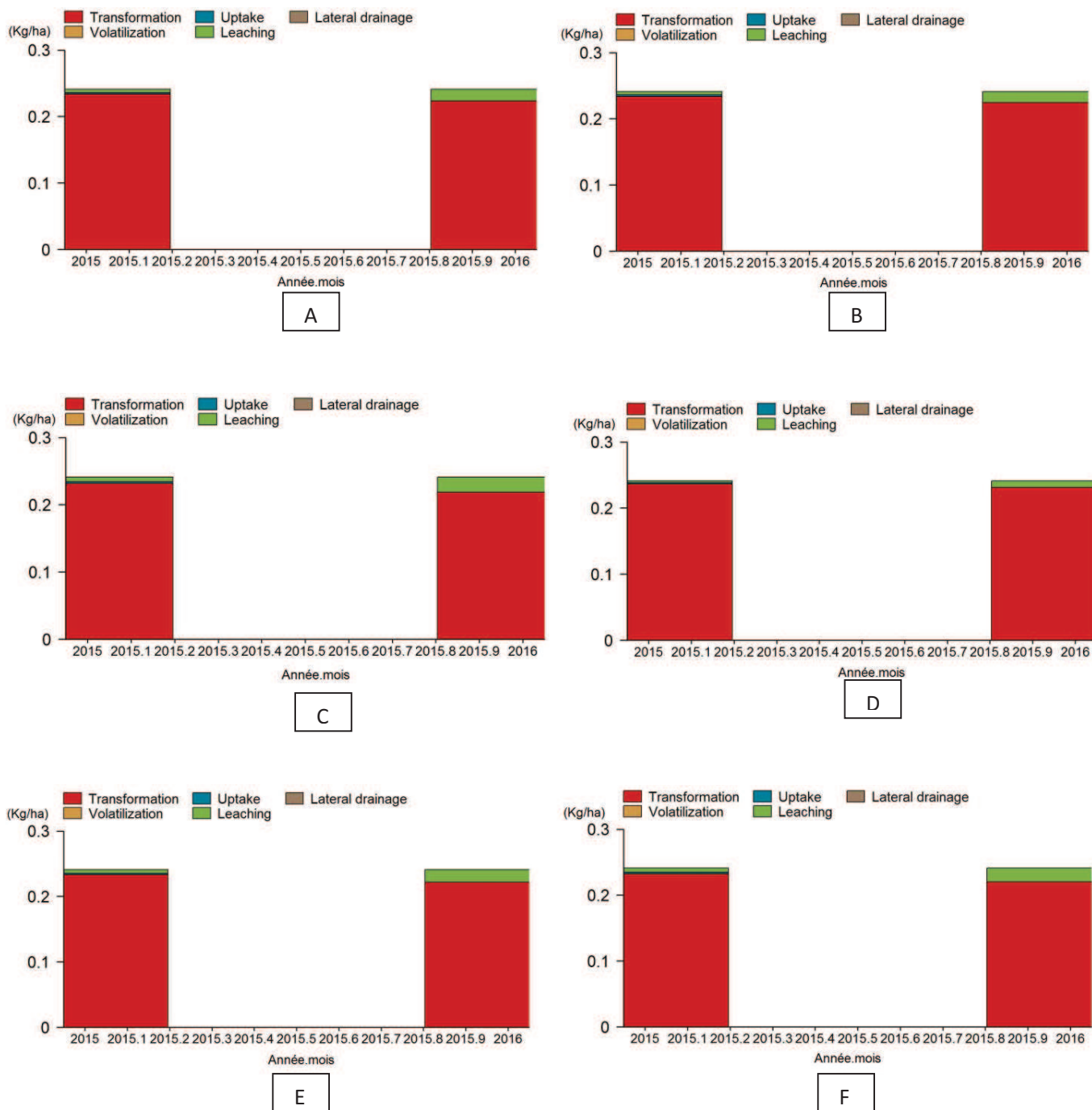


Figure 80: La quantité perdue de la matière active "méthomyl" pour la culture de pomme de terre dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance active « Dimethoate »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Dimethoate» dans les différents types du sol. D'après le tableau 54, la transformation est la seule phase prononcée pour tous les sols.

Tableau 54: Le bilan du Glyphosate dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Unité | Quantité appliquée | Quantité adsorbée | Quantité transformée | Quantité absorbée | Quantité lixiviée | Quantité volatilisée | Quantité drainée |
|-----------------------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Argile limoneux | (kg/ha) | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argileux | (kg/ha) | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argile sablonneux | (kg/ha) | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sableux | (kg/ha) | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argile sableux | (kg/ha) | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | (kg/ha) | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.4. Analyse de la culture de Pomme

En se basant sur l'analyse des substances utilisées dans notre méthodologie de travail, la culture des pommes est parmi les cultures retenues dans notre zone d'étude. Les substances actives les plus utilisées par les agriculteurs pour traiter cette culture contre les ravageurs sont le chlorpyrifos-éthyl, le flutriafol, l'alfa cyperméthrin, et le lambda cyhalothrin.

4.4.1. Simulation des quantités des matières actives les plus utilisées sur les pommiers

Nous avons simulé les quantités et les concentrations des 4 matières actives les plus utilisées au niveau de notre territoire pour le traitement des pommiers à des dates d'applications différentes dans les types de sol. En comparant les résultats obtenus par jour pour les sols définis (tableau 55), nous constatons que le comportement des herbicides, des insecticides et des fongicides est différent en fonction des sols. Après une année de la date d'application, les sols argileux présentent des résidus en Chlorpyrifos Ethyl et en Alfa cyperméthrin, de 35% et 34% respectivement et les sols sableux présentent 22% et 28%. En ce qui concerne la matière active flutriafol, nous remarquons qu'après une année d'application les résidus de cette matière ne sont pas influencés par la texture du sol et elles atteignent 1% seulement.

Table 55: Quantités journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source:travail de Kanj F., 2017).

| Type de sol | Matière active | Quantité apportée en 2015 (kg/ha) | Quantité accumulée (kg/ha) | Résidu après une année (%) |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Argile limoneux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,023 | 0,006 | 26 |
| | Flutriafol | 0,22 | 0,002 | 1 |
| | Alfa cypermethrin | 0,035 | 0,012 | 34 |
| | Lambda cyhalothrin | | 0 | 0 |
| Argile | Chlorpyrifos Ethyl | 0,023 | 0,008 | 35 |
| | Flutriafol | 0,22 | 0,002 | 1 |
| | Alfa cypermethrin | 0,035 | 0,012 | 34 |
| | Lambda cyhalothrin | | 0 | 0 |
| Argile sablonneux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,023 | 0,004 | 17 |
| | Flutriafol | 0,22 | 0,002 | 1 |
| | Alfa cypermethrin | 0,035 | 0,0013 | 4 |
| | Lambda cyhalothrin | | 0 | 0 |
| Sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,023 | 0,005 | 22 |
| | Flutriafol | 0,22 | 0,002 | 1 |
| | Alfa cypermethrin | 0,035 | 0,01 | 28 |
| | Lambda cyhalothrin | | 0 | 0 |
| Argile sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,023 | 0,004 | 17 |
| | Flutriafol | 0,22 | 0,002 | 1 |
| | Alfa cypermethrin | 0,035 | 0,012 | 34 |
| | Lambda cyhalothrin | | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | Chlorpyrifos Ethyl | 0,023 | 0,0066 | 28 |
| | Flutriafol | 0,22 | 0,002 | 1 |
| | Alfa cypermethrin | 0,035 | 0,01 | 28 |
| | Lambda cyhalothrin | | 0 | 0 |

4.4.2. Simulation des devenir de chaque matière active dans les sols de 2015 à 2016

La substance « Chlorpyrifos-éthyl »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance « Chlorpyrifos-éthyl » varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 56 et la figure 81, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, de volatilisation et de lixiviation. La phase de transformation et celle de volatilisation sont présentes dans tous les types des sols. Mais la phase de lixiviation est présente dans deux types de sol seulement qui sont le sol argile sablonneux et le sol sableux qui présentent 14% et 35% respectivement.

Table 56: Le bilan du Chlorpyrifos-éthyl dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|-----|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,23 | 100 | 0,23 | 100 | 0,23 | 100 | 0,23 | 100 | 0,23 | 100 | 0,23 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,12 | 52 | 0,13 | 57 | 0,1 | 43 | 0,1 | 43 | 0,12 | 52 | 0,13 | 57 |
| Absorbée | | | | | | | | | | | | |
| Lixiviée | | | | | 0,03 | 14 | 0,08 | 35 | | | | |
| Volatilisée | 0,11 | 48 | 0,1 | 43 | 0,1 | 43 | 0,05 | 22 | 0,11 | 48 | 0,1 | 43 |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active chlorpyrifos-éthyl dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 56 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 81 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de pomme.

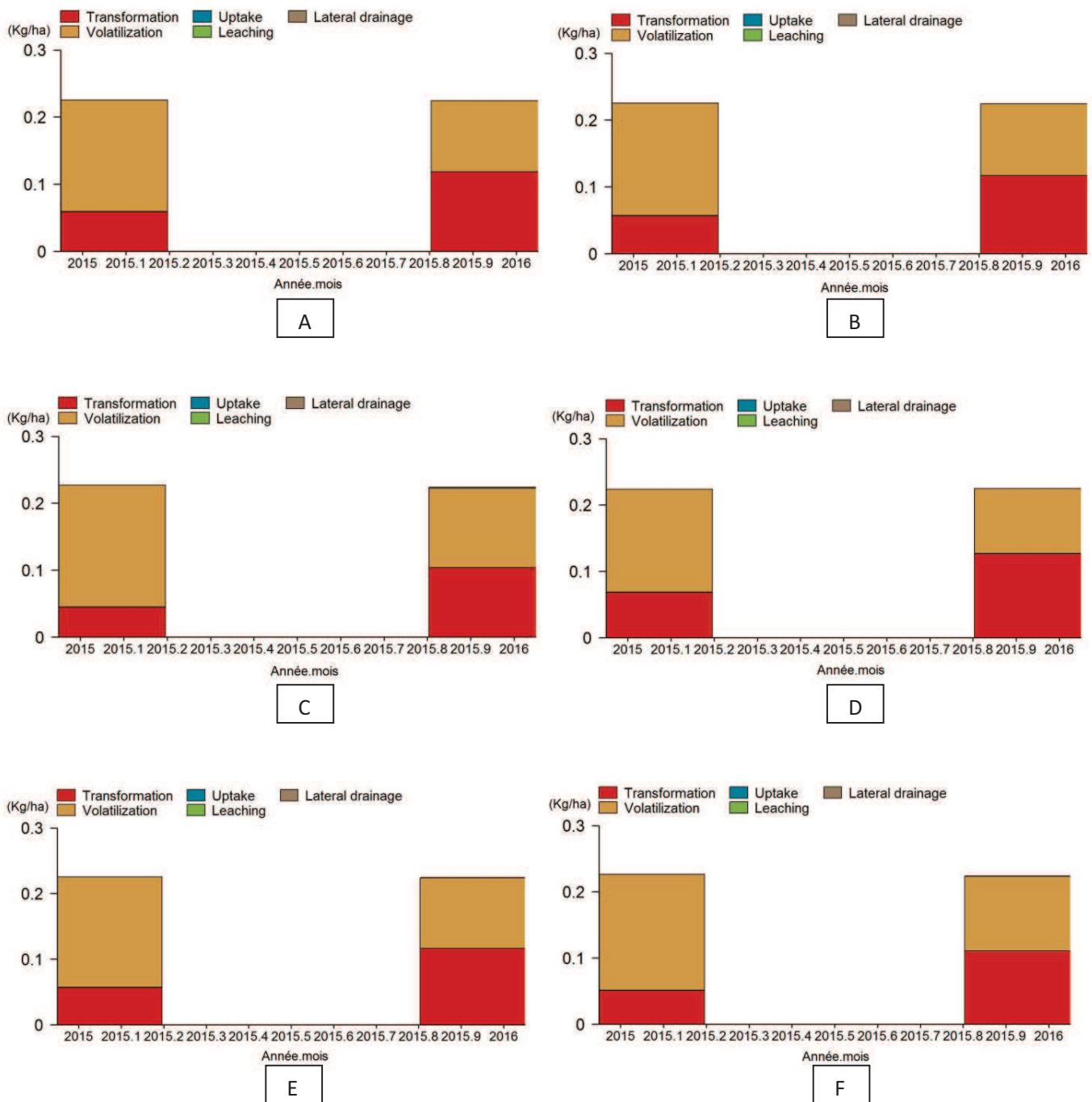


Figure 81: La quantité perdue de la matière active "chlorpyrifos-éthyl" pour la culture de pomme dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance « flutriafol »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Flutriafol» varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 57 et les figures 82, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption, de volatilisation et de lixiviation. Les phases de lixiviation et de transformation sont présentes dans tous les types des sols. Tandis que la phase de volatilisation est présente dans le sol limon argileux et la phase d'absorption est présente dans tous les sols sauf le sol argileux limoneux.

Mais ce qui est remarquable, la quantité lixiviée de cette substance active est très importante par rapport aux autres phases et elle n'est pas influencée par la texture du sol.

Tableau 57: Le bilan du Flutriafol dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|------|---------|------|----------------|------|----------------------|------|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,22 | 100 | 0,22 | 100 | 0,22 | 100 | 0,22 | 100 | 0,22 | 100 | 0,22 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,003 | 1 | 0,003 | 1 | 0,002 | 0,7 | 0,002 | 0,7 | 0,002 | 0,7 | 0,002 | 0,7 |
| Absorbée | | | 0,001 | 1 | 0,001 | 1 | 0,05 | 0,5 | 0,001 | 1 | 0,001 | 1 |
| Lixiviée | 0,216 | 98 | 0,216 | 98 | 0,217 | 98,3 | 0,218 | 98,8 | 0,217 | 98,3 | 0,217 | 98,3 |
| Volatilisée | 0,001 | 1 | | | | | | | | | | |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active chlorpyrifos-éthyl dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 57 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 82 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de pomme.

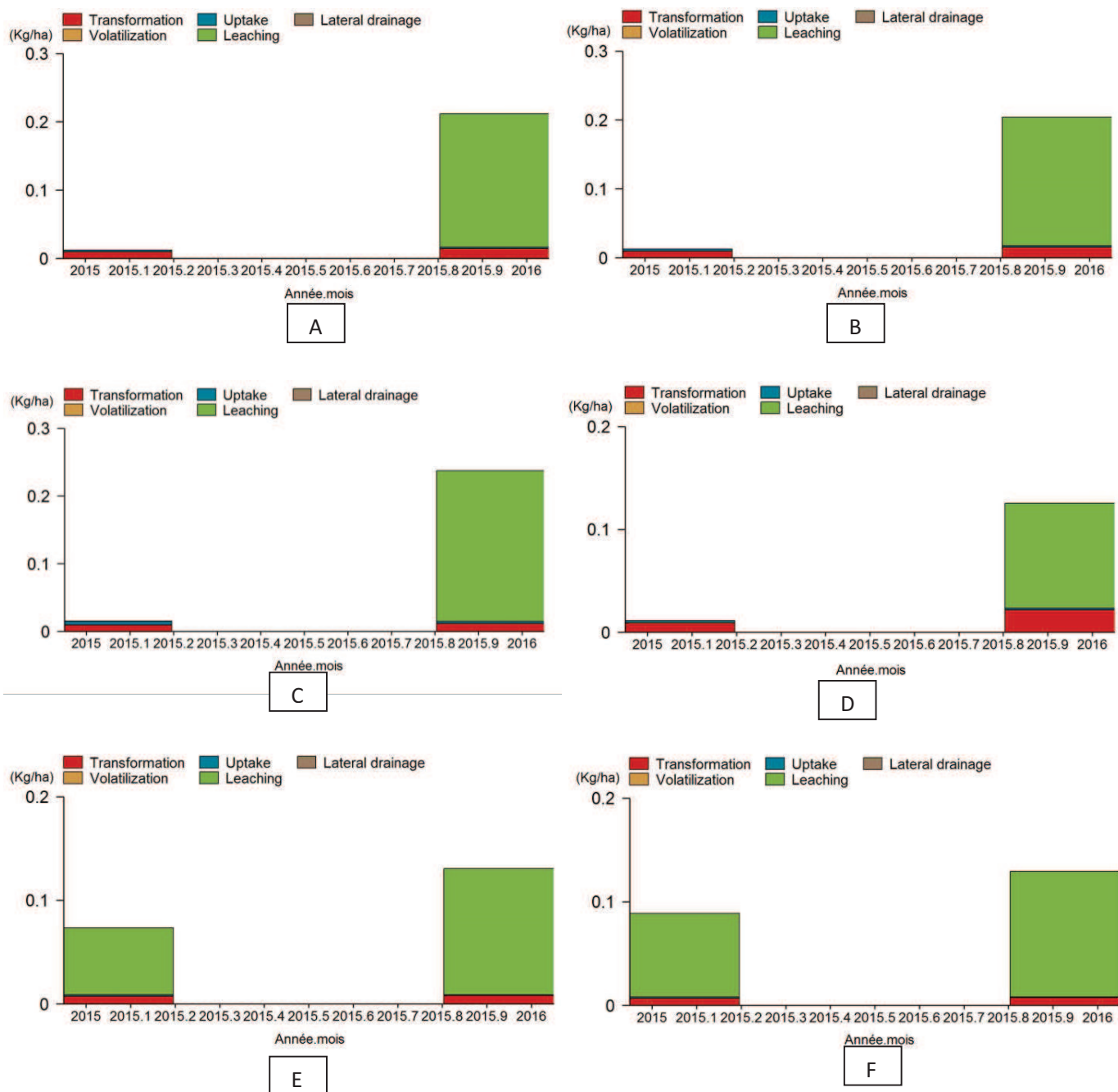


Figure 82: La quantité perdue de la matière active "flutriafol" pour la culture de pomme dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E:sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance « Alfa cyperméthrin »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Alfa cyperméthrin» varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 58 et la figure 83, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption, de volatilisation et de lixiviation. Les quatre phases de dissipation sont présentes dans tous les types des sols. La phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux. Il est à noter que la quantité lixiviée de cette substance active atteint 11.5% dans les sols sableux et 3% dans les sols argileux.

Tableau 58: Le bilan d'alfa cyperméthrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|------|-------------------|------|---------|------|----------------|------|----------------------|------|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,035 | 100 | 0,035 | 100 | 0,035 | 100 | 0,035 | 100 | 0,035 | 100 | 0,035 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,013 | 37 | 0,013 | 37 | 0,013 | 37 | 0,013 | 37 | 0,013 | 37 | 0,13 | 37 |
| Absorbée | 0,001 | 3 | 0,0005 | 1,5 | 0,0005 | 1,5 | 0,0005 | 1,5 | 0,0005 | 1,5 | 0,0005 | 1,5 |
| Lixiviée | 0,001 | 3 | 0,001 | 3 | 0,002 | 6 | 0,004 | 11,5 | 0,002 | 6 | 0,002 | 6 |
| Volatilisée | 0,02 | 57 | 0,025 | 57,5 | 0,024 | 55,5 | 0,02 | 50 | 0,024 | 55,5 | 0,024 | 55,5 |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active alfa cyperméthrin dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 58 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 83 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de pomme.

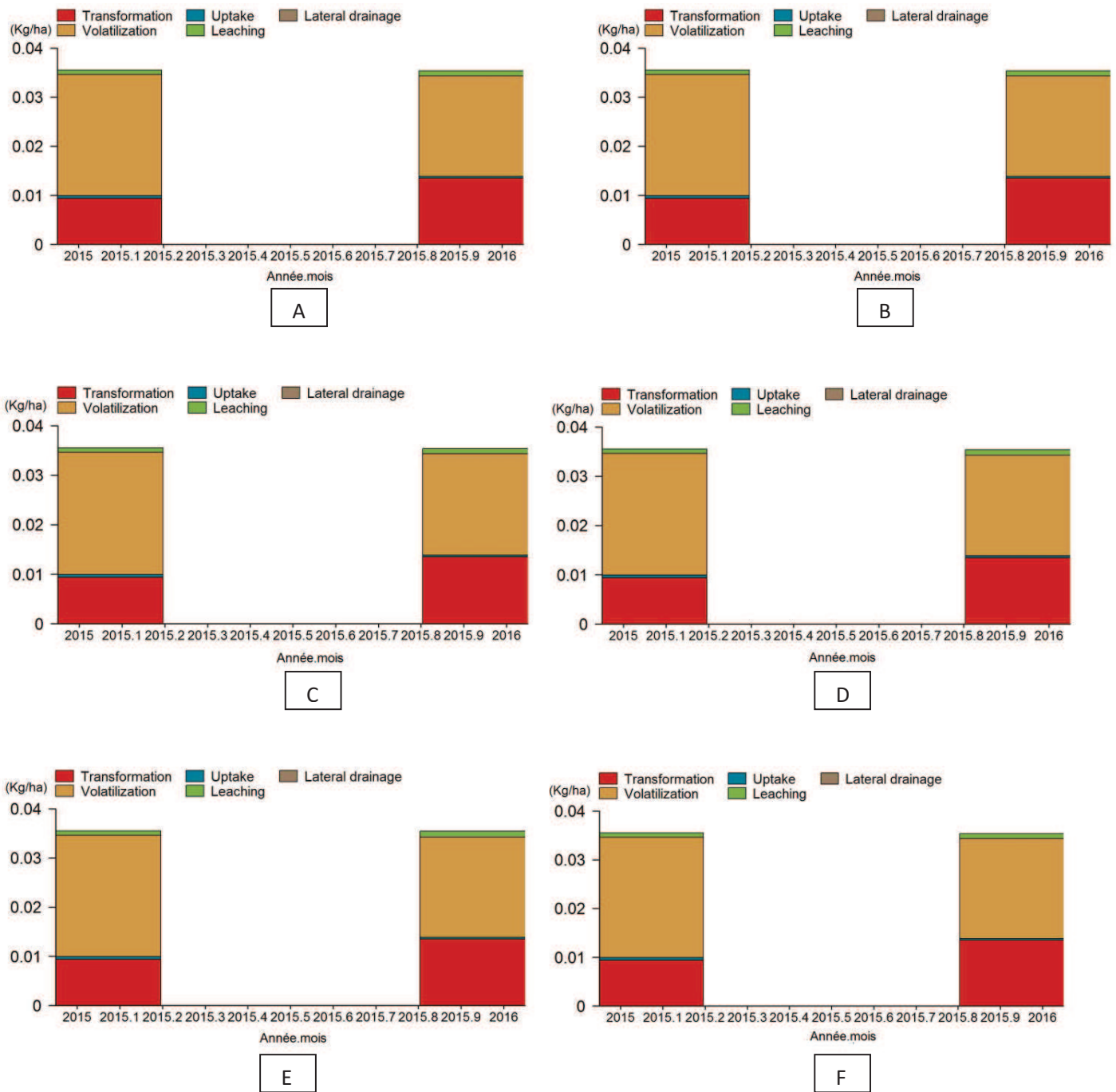


Figure 83: La quantité perdue de la matière active "alfa cypermethrin" la culture de pomme dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

4.5. Analyse de la culture de cerise

En se basant sur l'analyse des substances utilisées dans notre méthodologie de travail, la culture des cerises est parmi les cultures retenues dans notre zone d'étude. Les substances actives les plus utilisées par les agriculteurs pour traiter cette culture contre les ravageurs sont le flutriafol, l'alfa cyperméthrin et le lambda cyhalothrin.

4.5.1. Simulation des quantités des matières actives les plus utilisées sur les cerisiers

Nous avons simulé les quantités et les concentrations des 3 matières actives les plus utilisées au niveau de notre territoire pour le traitement des cerisiers à des dates d'applications différentes dans les types de sol. En comparant les résultats obtenus par jour pour les sols définis (tableau 52), nous constatons que le comportement des herbicides, des insecticides et des fongicides est différent en fonction des sols. Après une année de la date d'application, les sols argileux est le sol qui présentent le plus des résidus en Alfa cyperméthrin et lambda cyhalothrin 7% et 59% respectivement tandis que les sols sableux présentent 4% et 39% respectivement. En ce qui concerne la matière active flutriafol, nous remarquons qu'après une année d'application les résidus de cette matière ne sont pas influencés par la texture du sol et elle atteint 1%.

Tableau 59: Quantité journalières des pesticides dans les sols de 2015 à 2016 (Source: travail de Kanj F., 2017).

| Type de sol | Matière active | Quantité apportée en 2015 (kg/ha) | Quantité accumulée (kg/ha) | Résidu après une année (%) |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Argile limoneux | Flutriafol | 0,18 | 0,001 | 1 |
| | Alfa cyperméthrin | 0,058 | 0,003 | 5 |
| | Lambda cyhalothrin | 0,28 | 0,13 | 46 |
| Argileux | Flutriafol | 0,18 | 0,001 | 1 |
| | Alfa cyperméthrin | 0,058 | 0,004 | 7 |
| | Lambda cyhalothrin | 0,28 | 0,165 | 59 |
| Argile sablonneux | Flutriafol | 0,18 | 0,001 | 1 |
| | Alfa cyperméthrin | 0,058 | 0,0035 | 6 |
| | Lambda cyhalothrin | 0,28 | 0,16 | 27,5 |
| Sableux | Flutriafol | 0,18 | 0,001 | 1 |
| | Alfa cyperméthrin | 0,058 | 0,0025 | 4 |
| | Lambda cyhalothrin | 0,28 | 0,11 | 39 |
| Argile sableux | Flutriafol | 0,18 | 0,001 | 1 |
| | Alfa cyperméthrin | 0,058 | 0,0027 | 4,5 |
| | Lambda cyhalothrin | 0,28 | 0,12 | 47,5 |
| Limon argilo- | Flutriafol | 0,18 | 0,001 | 1 |

| | | | | |
|---------|--------------------|-------|-------|------|
| sableux | Alfa cypermethrin | 0,058 | 0,003 | 5 |
| | Lambda cyhalothrin | 0,28 | 0,12 | 47,5 |

4.5.2. Simulation des devenir de chaque matière active dans les sols de 2015 à 2016 pour la culture de cerise

La substance « Alfa cypermethrin »

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Alfa cypermethrin» varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 60 et le figure 84, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption, de volatilisation et de lixiviation. Les quatre phases de dissipation sont présentées dans tous les types des sols. La phase de lixiviation est plus importante dans les sols sableux que dans les sols argileux. Il est à noter que la quantité lixiviée de cette substance active atteint le 7% dans les sols sableux et le 3% dans les sols argileux.

Tableau 60: Le bilan d'alfa cypermethrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|-----|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|-----|----------------------|-----|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0,058 | 100 | 0,058 | 100 | 0,058 | 100 | 0,058 | 100 | 0,058 | 100 | 0,058 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0,022 | 38 | 0,023 | 40 | 0,021 | 36 | 0,021 | 36 | 0,021 | 36 | 0,021 | 36 |
| Absorbée | 0,001 | 2 | 0,001 | 2 | 0,001 | 2 | 0,001 | 2 | 0,001 | 2 | 0,001 | 2 |
| Lixiviée | 0,003 | 5 | 0,002 | 3 | 0,003 | 5 | 0,004 | 7 | 0,003 | 5 | 0,003 | 5 |
| Volatilisée | 0,032 | 55 | 0,032 | 55 | 0,033 | 59 | 0,032 | 55 | 0,033 | 57 | 0,033 | 57 |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active alfa cypermethrin dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 60 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 84 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de cerise.

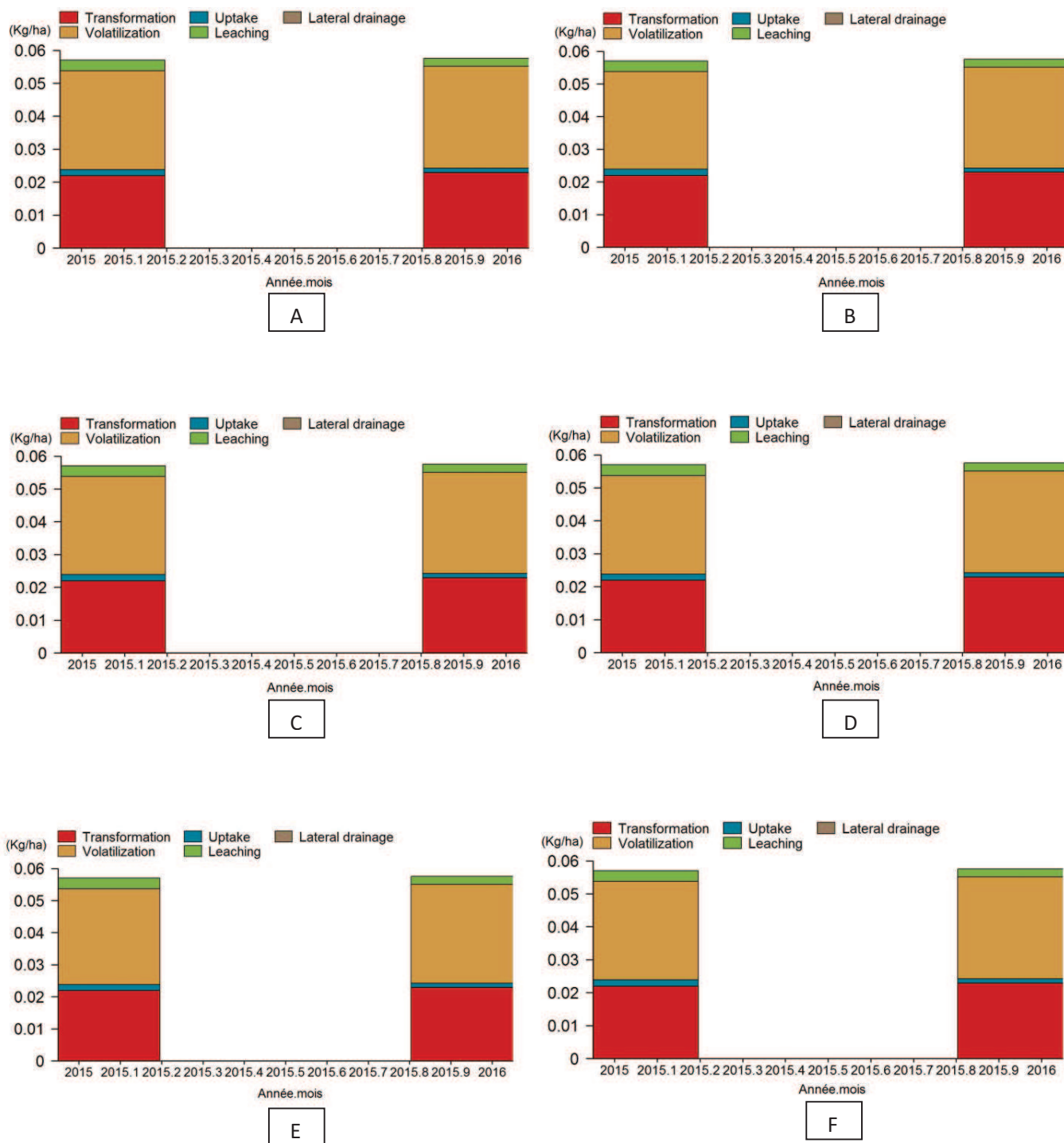


Figure 84: La quantité perdue de la matière active "Alfa cypermethrin" pour la culture cerise dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance « flutriafol »:

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «Flutriafol» varient d'un sol à un autre. D'après le tableau 61, les phases les plus prononcées pour les sols sont celles de transformation, d'absorption, et de lixiviation. Ces 3 phases sont présentes dans tous les types des sols. Mais ce qui est remarquable, la quantité lixivié de cette substance active est très importante par rapport aux autres phases et elle atteint le 94% pour les sols sableux.

Tableau 61: Le bilan du Flutriafol dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Argile limoneux | | Argileux | | Argile sablonneux | | Sableux | | Argile sableux | | Limon argilo-sableux | |
|--------------------|-----------------|------|----------|-----|-------------------|-----|---------|-----|----------------|------|----------------------|-------|
| | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Quantité | | | | | | | | | | | | |
| Appliquée | 0.18 | 100 | 0.18 | 100 | 0.18 | 100 | 0.18 | 100 | 0.18 | 100 | 0.18 | 100 |
| Adsorbée | | | | | | | | | | | | |
| Transformée | 0.01 | 5.5 | 0.02 | 11 | 0.01 | 5.5 | 0.005 | 3 | 0.01 | 5.5 | 0.01 | 5.5 |
| Absorbée | 0.005 | 3 | 0.005 | 3 | 0.005 | 3 | 0.005 | 3 | 0.005 | 3 | 0.005 | 0.005 |
| Lixiviée | 0.165 | 91.5 | 0.155 | 86 | 0.165 | 9.5 | 0.17 | 94 | 0.165 | 91.5 | 0.165 | 0.165 |
| Volatilisée | | | | | | | | | | | | |
| Drainée | | | | | | | | | | | | |

La quantité dissipée de la matière active flutriafol dans chaque type de sol qui a été signalé dans le tableau 61 est issu des résultats du modèle PEARL. La figure 85 montre la quantité perdue par chaque processus de transfert dans l'environnement pour chaque type de sol au niveau du territoire d'étude pour la culture de cerise.

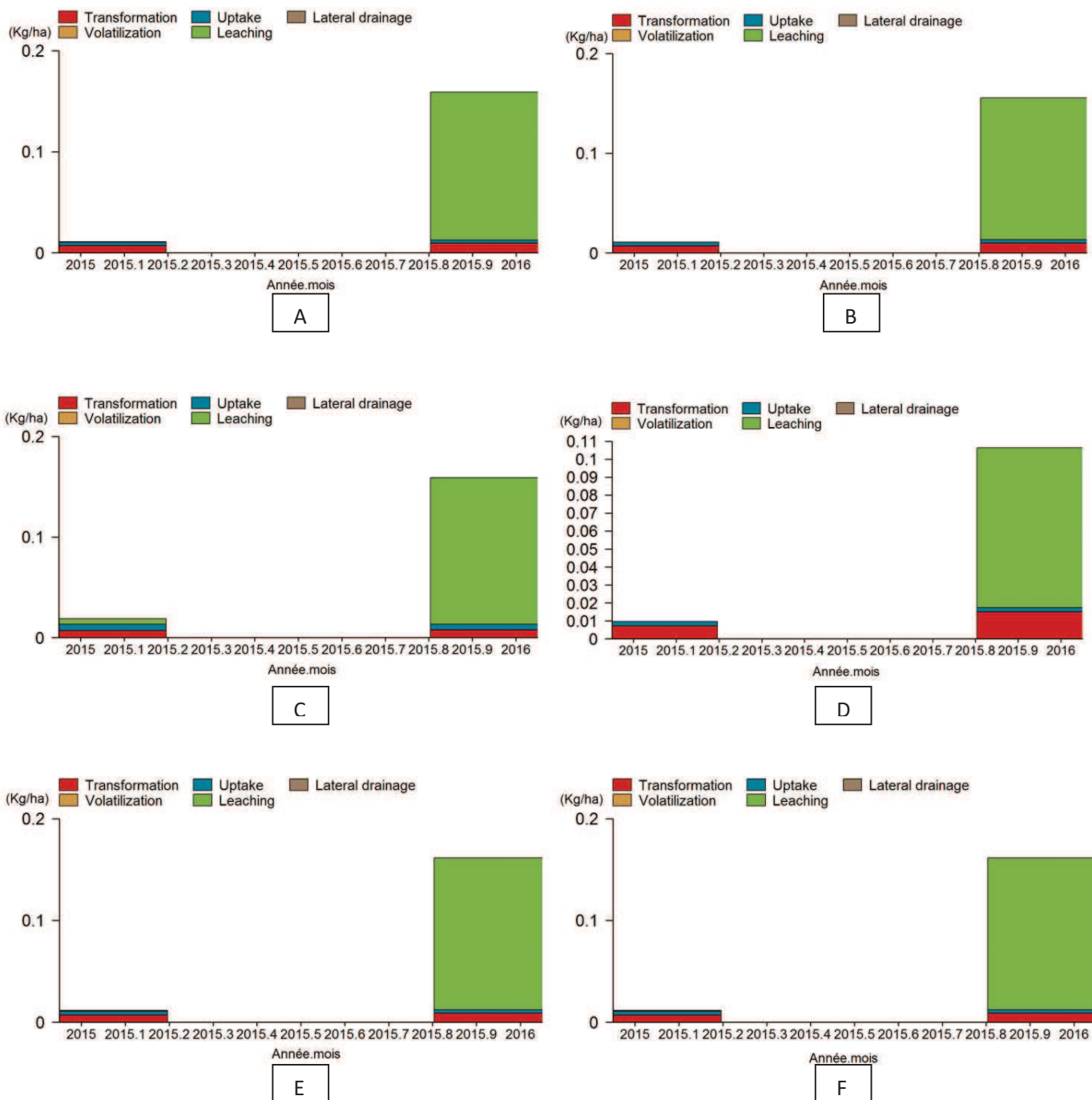


Figure 85: La quantité perdue de la matière active "flutriafol" pour la culture cerise dans les différents types de sol (A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sols sableux)

(Source: travail Kanj F., 2016, modèle PEARL).

La substance «lambda cyhalothrin»

Les résultats de la simulation du devenir de la substance «lambda cyhalothrin» dans les différents types du sol sont décrite dans le tableau 62. D’après ce tableau, une seule phase est prononcés pour tous les sols est la transformation. Cela nous laisse conclure que le devenir de la substance active lambda cyhalithrin n’est pas influencée par le type de sol d’une part et il n’a pas un risque sur les eaux souterraines d’autre part.

Tableau 62: Le bilan du lambda cyhalothrin dans les sols (2015-2016) (Source: réalisation personnelle, Kanj F. 2016)

| Dissipation | Unité | Quantité appliquée | Quantité adsorbée | Quantité transformée | Quantité absorbée | Quantité lixiviée | Quantité volatilisée | Quantité drainée |
|----------------------|---------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Argilo limoneux | (kg/ha) | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argileux | (kg/ha) | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argilo sableux | (kg/ha) | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sableux | (kg/ha) | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Argilo sableux | (kg/ha) | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Limon argilo-sableux | (kg/ha) | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | % | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5. Le transfert des pesticides vers les eaux souterraines : la lixiviation

Dans cette partie, nous allons étudier et détailler la lixiviation de ces substances actives pour analyser la diffusion des PP dans la partie hydrique du sol et sa possibilité de contaminer les eaux souterraines. Comme il a été déjà signalé dans la partie II chapitre 2, il existe plusieurs facteurs qui peuvent affecter le transfert vertical des pesticides dans le sol tels que la préparation de surface, la structure, la teneur en eau, la solubilité de chaque substance dans l’eau et des facteurs externes qui jouent un rôle important comme l’irrigation, le temps d’application et les évènements pluvieux. Pour cela nous étions obligés d’étudier la lixiviation de chaque substance active pour chaque type de sol et pour chaque culture car le comportement de chaque substance diffère d’une culture à l’autre.

Après avoir déterminé les substances actives qui présentent un pourcentage remarquable de dissipation par lixiviation et les cultures traitées par ces substances, nous avons répété la simulation de ces matières actives par type de sol et par culture et nous avons récupéré les quantités lixiviées ($\mu\text{g/l}$) de chaque substance dans chaque type de sol. Les résultats sont présentés dans le tableau 63.

Les cultures qui s'effectuent dans des sols sableux se caractérisent par la rapidité d'infiltration des eaux des pluies et des eaux d'irrigation rendant la nappe d'eau vulnérable à la contamination par les substances actives.

Tableau 63: Quantités lixiviées (µg/l) pour les substances actives retenues (Source: travail de Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL)

| Matière Active | Culture | Quantité moyenne de la [MA] (kg/ha) | ConLeaTgt_Sol_CMvr (µg/l) | ConLeaTgt_Sol_Rgca (µg/l) | ConLeaTgt_Sol_Rgeu (µg/l) | ConLeaTgt_Sol_Areu (µg/l) | ConLeaTgt_Sol_Fleu (µg/l) | ConLeaTgt_Sol_Glca (µg/l) |
|---------------------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Alfa Cypermethrin | Pomme de terre | 0,028 | 3,649 | 3,648 | 3,64 | 3,651 | 3,66 | 3,645 |
| | Cerise | 0,029 | 0,8852 | 0,8887 | 0,8928 | 0,8994 | 0,8844 | 0,8844 |
| | Pomme | 0,018 | 0,2669 | 0,2692 | 0,2715 | 0,2742 | 0,2654 | 0,2665 |
| Chlorpyrifos-éthyl | Cerise | 0,088 | 0,4629 | 0,1602 | 0,3147 | 0,0002006 | 0,07165 | 0,6939 |
| | Pomme | 0,072 | 0,3175 | 0,08749 | 0,1982 | 0,00002992 | 0,0339 | 0,5176 |
| | Vigne | 0,075 | 1,647 | 0,4811 | 0,9187 | 0,005326 | 0,2736 | 3,029 |
| Flutriafol | Cerise | 0,083 | 0,4059 | 0,01641 | 0,1061 | 1,575E-09 | 1,48 | 1,547 |
| | Pomme | 0,074 | 0,23 | 0,001284 | 0,04305 | 0,00000605 | 9,824E-07 | 0,7645 |
| | Vigne | 0,065 | 1,758 | 1,07 | 1,412 | 0,4099 | 1092 | 0,23 |
| Méthomyl | Pomme de terre | 0,241 | 1,248 | 1,036 | 1,143 | 0,4995 | 0,937 | 1,368 |
| | Vigne | 0,265 | 2,008 | 1,591 | 1,817 | 0,6803 | 1,391 | 2,266 |

Afin d'avoir le maximum de détails, nous avons analysé les résultats par culture, et une fois les résultats obtenus, nous avons regroupé l'analyse par substance active au niveau de notre territoire.

Nous avons combiné les résultats de lixiviation des substances actives et les types de sol au niveau de notre zone d'étude pour avoir une vue générale en ce qui concerne la dissipation des substances actives en phase de lixiviation.

5.1. La matière active « chlorpyrifos-éthyl »

La matière chlorpyrifos-éthyl est un insecticide de la famille organophosphorée qui a un risque de contamination des eaux souterraines. D'après la directive européenne (n° 80/778/CEE) le seuil de contamination des eaux souterraines par les organophosphorés pour une seule substance est de l'ordre de 0.1 µg/l.

La figure 86 présente la variation de la quantité lixiviée de cette substance dans chaque type de sol et par culture. D'après les résultats présentés dans la figure 86, les parcelles cultivées de cerise, de pomme et de vigne au niveau de notre zone d'étude présentent un risque de contamination des eaux souterraines par le chlorpyrifos-éthyl. Mais le poids du risque diffère d'un type de sol à un autre.

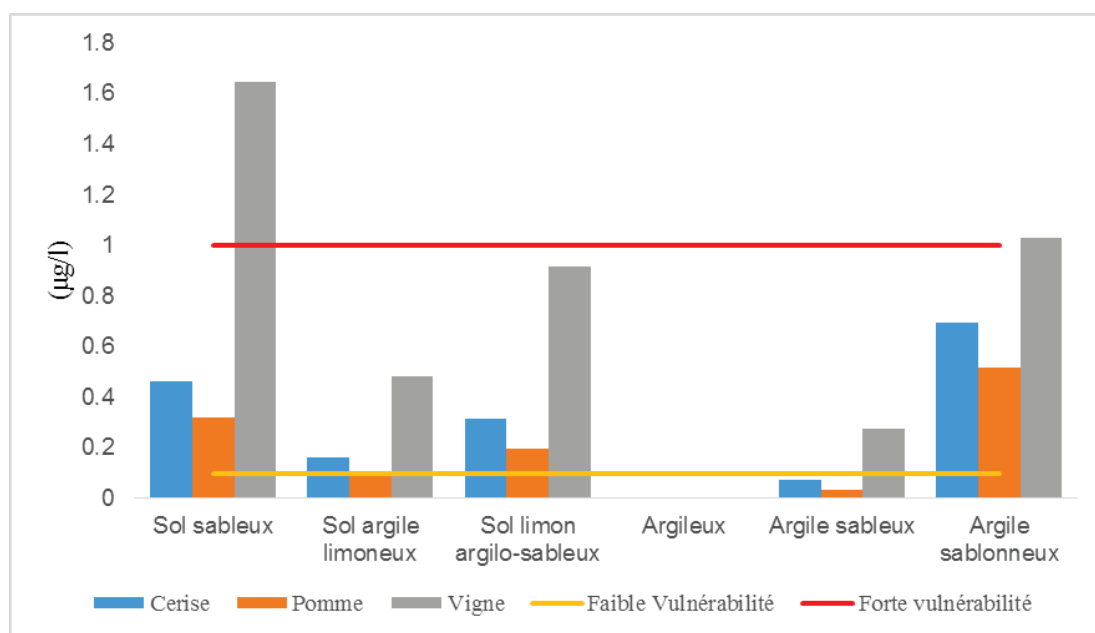


Figure 86: La variation de la quantité lixiviée de la substance active "chlorpyrifos-éthyl" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL).

Dans ce cadre et pour identifier les zones les moins⁵¹ et les plus vulnérables⁵² et cela en fonction du type de sol, nous avons combiné les résultats du modèle PEARL et le type de sol au niveau de notre territoire d'étude afin d'établir une carte générale qui présente la lixiviation de la substance active « chlorpyrifos-éthyl ».

A partir de la figure 87, nous pouvons identifier les zones où nous avons un risque de contamination par la substance chlorpyrifos-éthyl. Les zones les plus vulnérables (> 1 µg/l) sont situées au sud du Ferzol et au nord du Terbol qui se caractérisent par un sol sableux et la prépondérance des vignes. Ce type de sol se caractérise par une conductivité hydraulique élevée de l'ordre de $5,83 \cdot 10^{-5}$ m/s. Cette forte conductivité hydraulique se traduit par le transport rapide

⁵¹ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl > 0.1 µg/l

⁵² Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl > 1 µg/l

des eaux d'infiltration de cette substance active vers les couches profondes. Donc, le risque de contamination est très élevé dans ces deux zones.

Il est remarquable que la quantité lixiviée est située entre 0.1 et 1 µg/l après une année d'application dans la plupart des zones traitées par le Chlorpyrifos-ethyl. Ce taux indique que la qualité des eaux souterraines est mauvaise mais pas contaminée. Cependant, il est important de noter que notre analyse n'a pas pris en considération les années précédentes car l'agriculteur n'a pas un registre de l'application des PP.

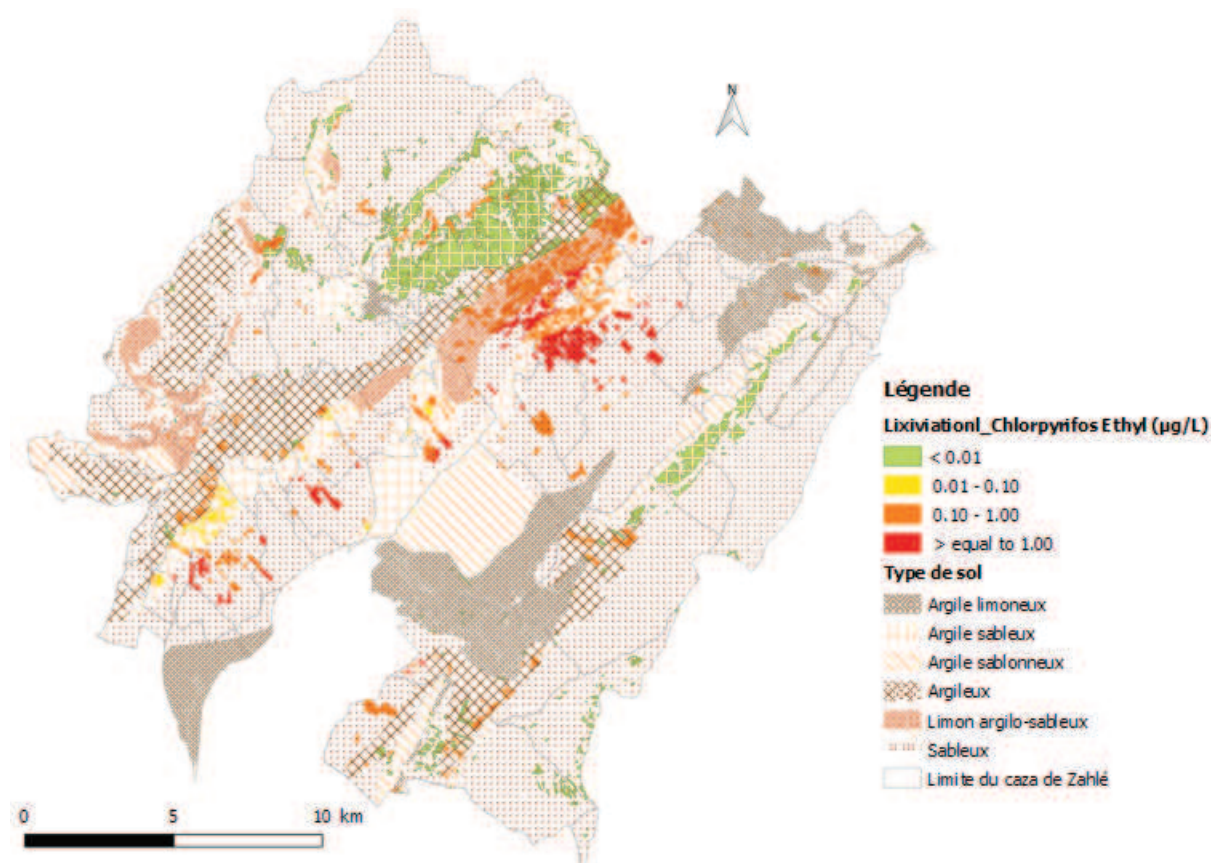


Figure 87: Risque de transfert par lixiviation de la matière active "Chlorpyrifos-éthyl" au niveau du caza de Zahlé (source: Kanj F. 2016-2017)

5.2. La matière active «Alfa cyperméthrin»

La substance alfa cyperméthrin est un insecticide de la famille pyréthriinoïde qui a un risque de contamination des eaux souterraines. D'après la directive européenne (n° 80/778/CEE) le seuil de contamination des eaux souterraines pour une seule substance est de l'ordre de 0.5µg/l.

La figure 88 présente la variation de la quantité lixiviée de cette substance dans chaque type de sol et par culture. D'après les résultats présentés dans la figure 88, les parcelles cultivées de pomme de terre et de cerise présentent un risque de contamination des eaux souterraines par l'alfa cyperméthrin. Mais le poids du risque diffère d'un type de sol à l'autre. La quantité lixiviée est de l'ordre de 3 µg/l pour la culture de pomme de terre et dans tous les types de sol.

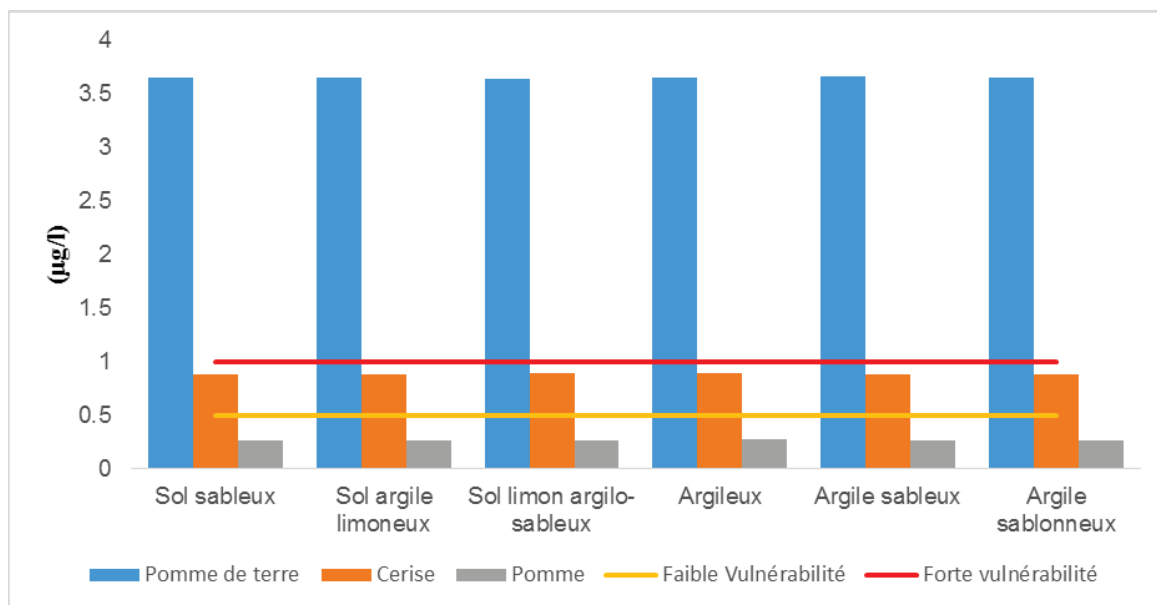


Figure 88: La variation de la quantité lixiviée de la substance active "Alfa cyperméthrin" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL).

Dans ce cadre et pour identifier les zones les moins⁵³ et plus vulnérables⁵⁴ et cela en fonction du type de sol, nous avons combiné les résultats du modèle PEARL et le type de sol au niveau de notre territoire d'étude afin d'établir une carte générale qui présente la lixiviation de la substance active «alfa cyperméthrin» (figure 89).

A partir de cette carte, nous pouvons identifier les zones où nous avons un risque de contamination par la substance l'alfa cyperméthrin. Les zones les plus vulnérables (> 1 µg/l) sont les zones occupées par la pomme de terre (les villages de la plaine du caza) : Quab Elis, Saadnayel, Hoch mandara, Taanayel, Chtoura, Taalbaya, Anjar et Majdal anjar. Comme pour le Chlorpyrifos-éthyl, il est remarquable que la quantité lixiviée est située entre 0.1 et 1 µg/l après une année d'application dans la plupart des zones traitées par Alfa cyperméthrin. Ce taux indique que la qualité des eaux souterraines est mauvaise mais pas contaminée. Cependant, il est important de noter que notre analyse n'a pas pris en considération les années précédentes car l'agriculteur n'a pas un registre de l'application des PP.

⁵³ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl > 0.1 µg/l

⁵⁴ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl > 1 µg/l

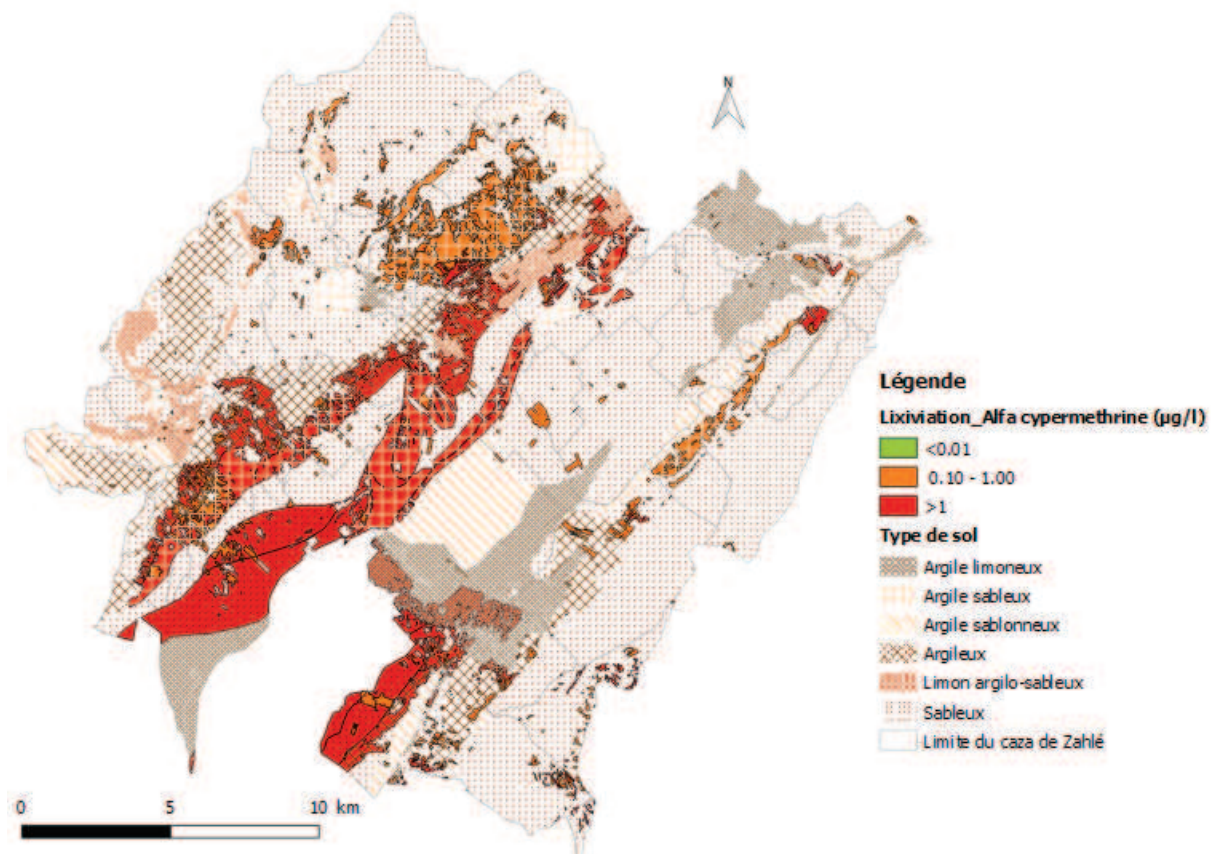


Figure 89: Risque de transfert par lixiviation de la substance active "Alfa cypermethrin" au niveau du caza de Zahlé (source: Kanj F. 2016-2017)

5.3. La substance « flutriafol »

La substance flutriafol est un insecticide de la famille pyréthriinoïdes qui présente un risque de contamination des eaux souterraines. D'après la directive européenne (n^o 80/778/CEE) le seuil de contamination des eaux souterraine pour une seule substance est de l'ordre de 0.5µg/l.

La figure 90 présente la variation de la quantité lixivié de cette substance dans chaque type de sol et par culture. D'après les résultats présentés dans la figure 90, les parcelles cultivées de vigne au niveau de notre zone d'étude présentent un risque de contamination des eaux souterraine par le flutriafol sauf les parcelles à sol argileux et argile sablonneux car elle ne dépasse pas le seuil de contamination. Par contre les parcelles cultivées de cerise présente un risque de contamination des eaux souterraine sur les sols argile sableux et argile sablonneux.

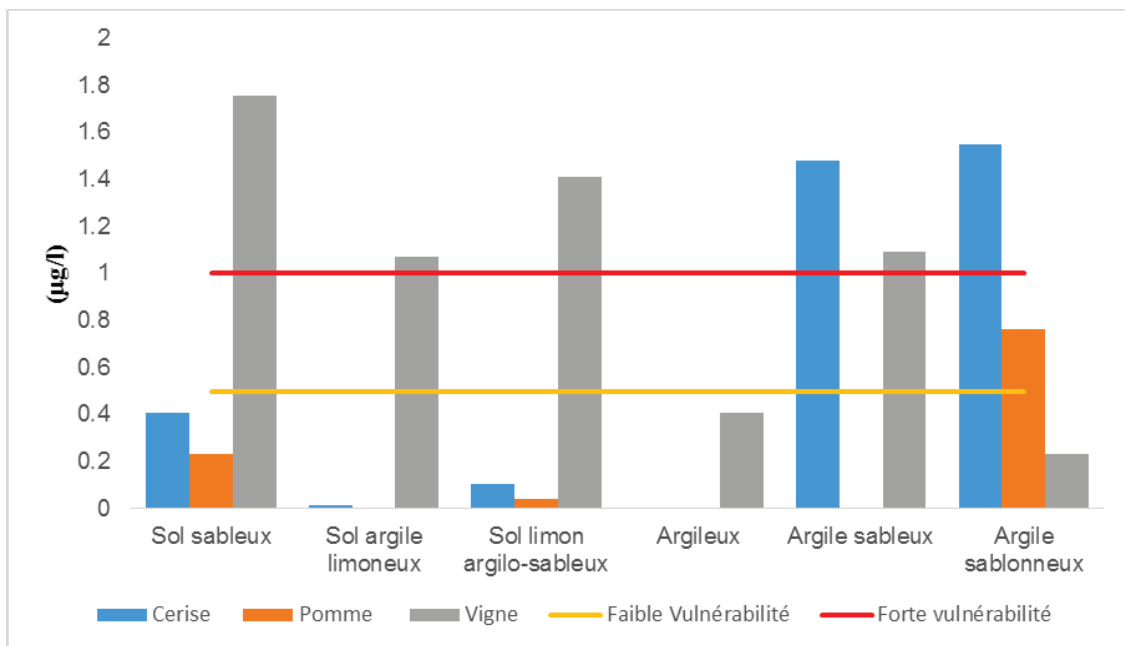


Figure 90: La variation de la quantité lixiviée de la substance active "Flutriafol" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL).

Dans ce cadre et pour identifier les zones les moins⁵⁵ et plus vulnérables⁵⁶ et cela en fonction du type de sol, nous avons combiné les résultats du modèle PEARL et le type de sol au niveau de notre territoire d'étude afin d'établir une carte générale qui présente la lixiviation de la substance active «flutriafol» (figure 91).

A partir de cette carte, nous pouvons identifier les zones où nous avons un risque de contamination par la substance flutriafol. Les zones les plus vulnérables ($> 1 \mu\text{g/l}$), sont les zones occupées par les vignes dans les deux villages de Terbol et Ferzol.

Il est remarquable que la quantité lixiviée soit située entre 0.1 et $1 \mu\text{g/l}$ après une année d'application dans la plupart des zones traitées par le flutriafol. Ce taux indique que la qualité des eaux souterraines est mauvaise mais pas contaminée. Cependant, il est important de noter que notre analyse n'a pas pris en considération les années précédentes car l'agriculteur n'a pas un registre de l'application des PP.

⁵⁵ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl $> 0.1 \mu\text{g/l}$

⁵⁶ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl $> 1 \mu\text{g/l}$

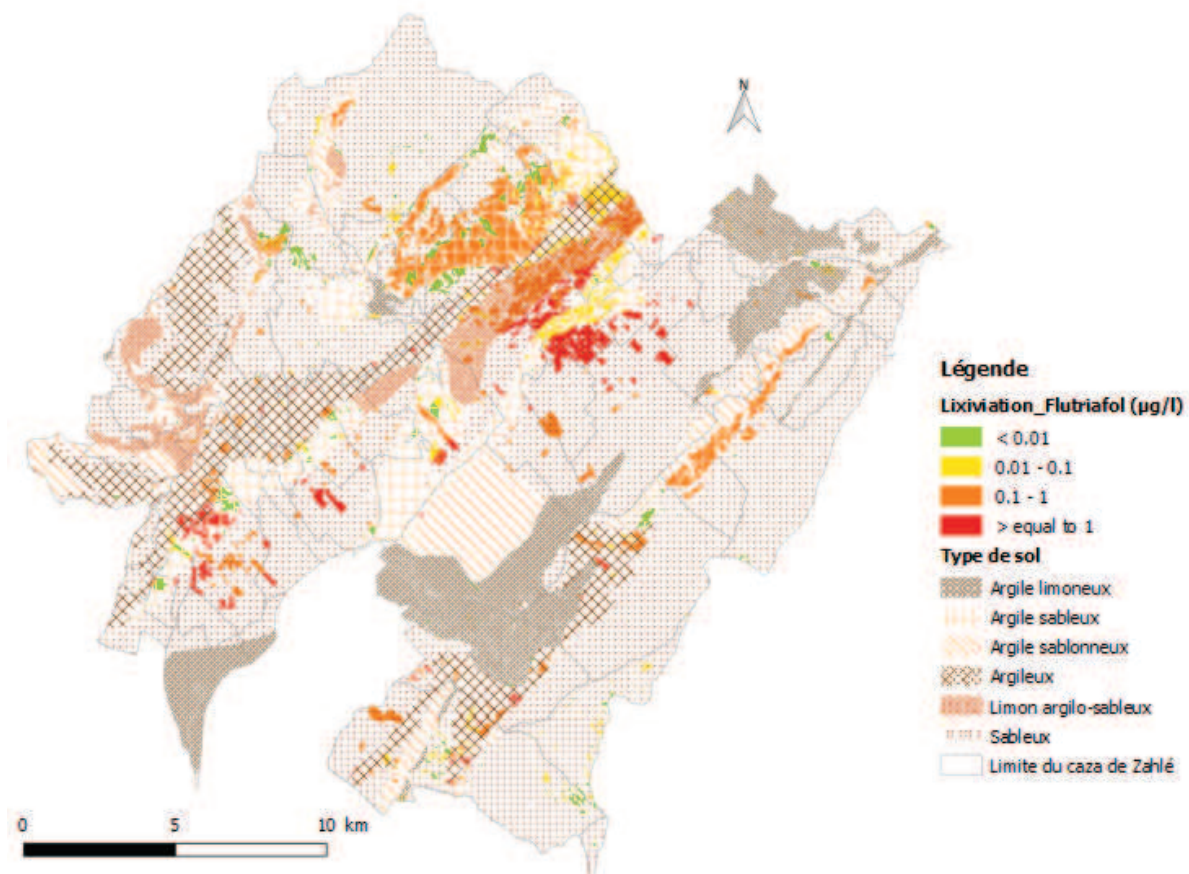


Figure 91: Risque de transfert par lixiviation de la substance active "Flutriafol" au niveau du caza de Zahlé (source: Kanj F. 2016-2017)

5.4. La substance active «Méthomyl»

La substance méthomyl est un insecticide de la famille carbamate qui a un risque de contamination des eaux souterraines. D'après la directive européenne (n° 80/778/CEE) le seuil de contamination des eaux souterraine pour une seule substance est de l'ordre de 0.1µg/l.

La figure 92 présente la variation de la quantité lixiviée de cette substance dans chaque type de sol et par culture. D'après les résultats présentés dans la figure 92, les parcelles cultivées de pomme de terre et vigne au niveau de notre zone d'étude présentent un risque de contamination des eaux souterraines par le méthomyl. Mais le poids du risque est différent d'un type du sol à l'autre. Mais il est remarquable de constater que la vulnérabilité de contamination est très forte.

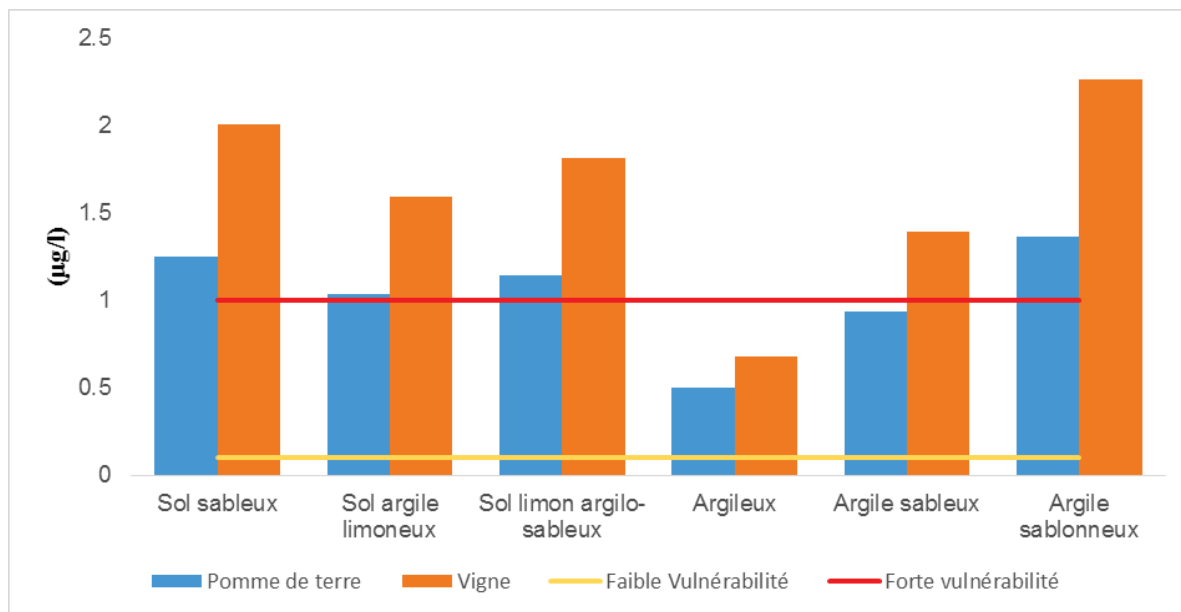


Figure 92: La variation de la quantité lixiviée de la substance active "Méthomyl" dans chaque type de sol et par culture (Source : travail Kanj F. 2016-2017, résultats du modèle PEARL).

Dans ce cadre et pour identifier les zones les moins⁵⁷ et les plus vulnérables⁵⁸ et cela en fonction de type de sol, nous avons combiné les résultats du modèle PEARL et le type de sol au niveau de notre territoire d'étude afin d'établir une carte générale qui présente la lixiviation de la substance active «méthomyl» (figure 93).

A partir de cette carte, nous pouvons identifier les zones où nous avons un risque de contamination par la substance méthomyl. Les zones les plus vulnérables (> 1 µg/l) sont les zones occupées par les vignes dans les deux villages de Terbol et Ferzol et les zones de la plaine occupée par la pomme de terre à base de sols sableux.

Il est remarquable que la quantité lixiviée est située entre 0.1 et 1 µg/l après une année d'application dans la plupart des zones traitées par le Méthomyl. Ce taux indique que la qualité des eaux souterraines est mauvaise mais pas contaminée. Cependant, il est important de noter que notre analyse n'a pas pris en considération les années précédentes car l'agriculteur n'a pas un registre de l'application des PP.

⁵⁷ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl > 0.1 µg/l

⁵⁸ Ce sont les zones où la quantité lixiviée en chlorpyrifos-éthyl > 1 µg/l

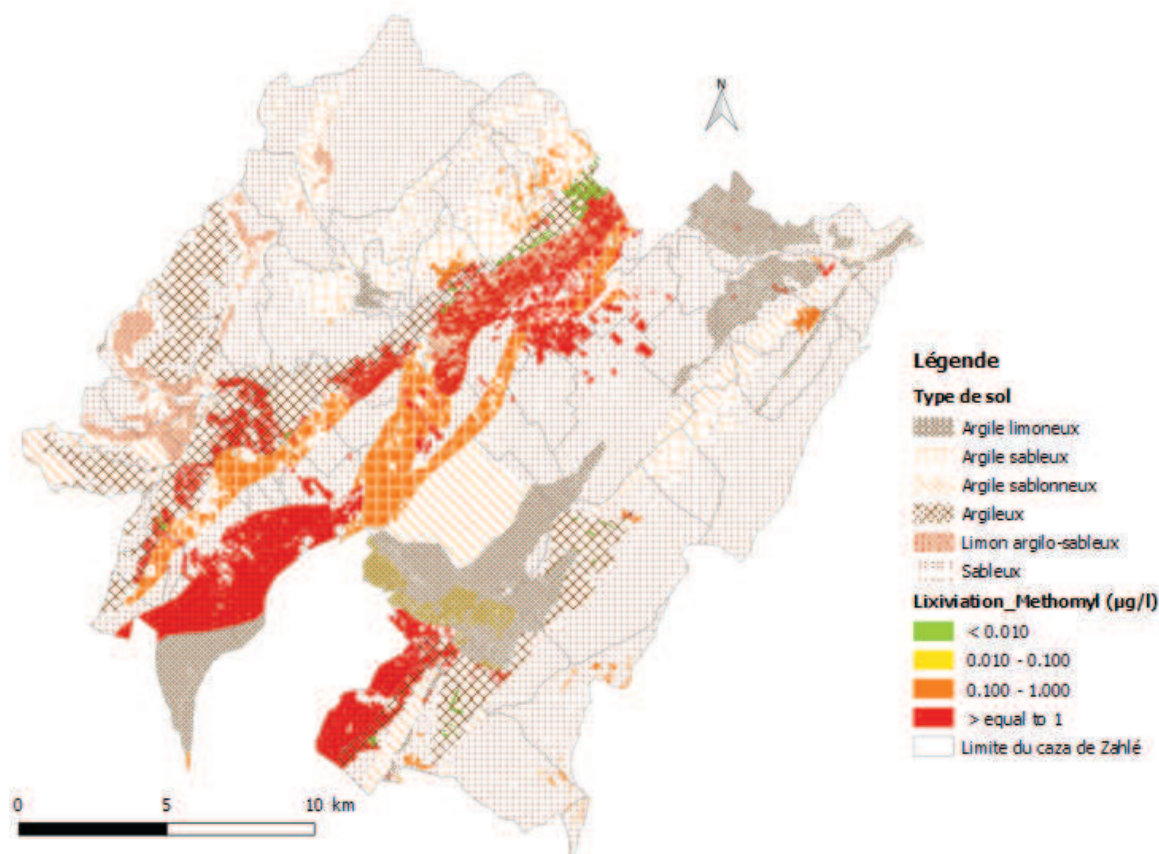


Figure 93: Risque de transfert par lixiviation de la substance active "Méthomyl" au niveau du caza de Zahlé (source: Kanj F. 2016-2017)

Conclusion du chapitre 8

Après une analyse des différents itinéraires techniques des cultures pratiquées dans notre région d'étude, cela nous a permis d'identifier qu'il existe trois cultures comme les plus consommatrices de pesticides : les pommes (IFT= 34.2), les vignes (IFT= 19.3) et la pomme de terre (IFT= 16.1), ce qui nous a permis de localiser les zones à forte pression phytosanitaire.

Nous avons pu identifier les cultures les plus consommatrices de pesticides et les substances actives les plus utilisées afin d'évaluer le risque de ces substances sur l'environnement et spécifiquement sur les eaux souterraines.

La prédiction des concentrations en matière active lixiviée varie d'une culture à l'autre et d'un type de sol à l'autre. Dans notre étude et d'après les caractéristiques des substances actives, la concentration de ces substances lixiviées augmente dans l'ordre suivant :

Méthomyl > Flutriafol > Chlorpyrifis-éthyl > Alfa cypermethrin > Dimethoate > Proquinazid > Glyphosate.

Les sols sont donc plus sensibles à la lixiviation (transfert vers les eaux souterraines) des substances actives : méthomyl et flutriafol, et sont beaucoup moins sensibles aux substances : proquinazid et glyphosate. En effet, lorsque le coefficient de rétention sur la matière organique est très faible (cas du méthomyl avec un K_{om} de $3.36 \text{ dm}^3.\text{kg}^{-1}$) ou que le temps de demi-vie est relativement élevé (cas du flutriafol avec un DT50 de 1350 jours), la substance est plus rapidement lixiviée car il est très peu retenu par la matière organique du sol (cas du méthomyl) ou bien il se dégrade moins vite et reste donc disponible dans le sol pour être éventuellement lixivié lors des précipitations ou durant l'irrigation.

Quand le coefficient de rétention de la substance active sur la matière organique du sol est très élevée et que le temps de demi-vie est faible ce qui est notamment le cas du glyphosate, la concentration en pesticide est plus ou moins faible ($1633 \text{ dm}^3.\text{kg}^{-1}$ et DT50 de 15 jours), la concentration en pesticide lixivié est très faible ($< 0.01 \mu\text{g.l}^{-1}$). Le pesticide dans ce cas est fortement retenu par la matière organique du sol (du fait que son K_{om} est élevée) et plus rapidement dégradé (DT50 de 15 jours).

Par ailleurs seules les substances actives méthomyl, flutriafol, chlorpyrifos-éthyl et alfa cypermethrin permettent de distinguer les régions relativement contrastées du point de vue de la sensibilité de leurs sols à la lixiviation des pesticides. Le fort contraste spatial observé de ces substances montre une bonne corrélation avec le teneur en sable et en matière organique d'une part et la conductivité hydraulique d'autre part.

En effet, pour le méthomyl, à titre d'exemple, nous observons une augmentation des concentrations lixiviées avec l'augmentation de la teneur en sable des sols ($1.362 \mu\text{g.l}^{-1}$ pour le sol sableux). En outre, au niveau de notre zone d'étude où la variation du bilan hydrique (mm/an) est peu variable d'une zone à une autre, les concentrations en pesticides lixiviés diminuent avec l'augmentation des teneurs en matière organique des sols qui, avec la fraction argileuse du sol joue un rôle d'adsorbant (rétention) pour les pesticides.

En outre, nous constatons également que la date d'application des pesticides méthomyl flutriafol est en automne, que PEARL prédit des concentrations en pesticides lixiviés plus importantes que les autres pesticides. Ceci confirme le fait que la fraction de pesticides qui percole en profondeur est extrêmement sensible à la quantité de pluie, surtout au cours de la période qui suit directement l'application du produit. Donc, les importants événements pluvieux qui suivent directement les applications de pesticides sont particulièrement impliqués dans le transfert des pesticides vers les nappes souterraines, surtout avec une texture grossière comme le sol sableux.

Il est à noter qu'il existe un facteur important du devenir des certains pesticides dans le sol qui est le PH du sol. Certains pesticides montrent des comportements de sorption directement dépendant du PH du sol, avec un PH acide (< 5), la concentration lixiviée est faible tandis qu'avec un PH > 5 la concentration est très élevée. Dans notre région d'étude le PH du sol varie entre 6.5 et 7.2 (partie II, chapitre 4, paragraphe 4.3.1), donc nous pouvons constater que le PH n'a pas d'influence sur nos résultats.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Le contexte territorial du caza de Zahlé est caractérisé par un contexte agricole très diversifié où la culture intensive est étendue sur la plupart du territoire. D'après les résultats obtenus en se basant sur notre travail de terrain et spécifiquement en ce qui concerne les pratiques agricoles et les comportements des agriculteurs face à l'utilisation des PP montrent qu'il existe un problème au niveau du savoir-faire, des concepts d'utilisation des PP, de leur dangerosité et des pratiques d'utilisation des PP avant, durant et après chaque traitement. L'objectif principal des agriculteurs est d'accroître leur production afin d'augmenter leur revenus mais malheureusement ils ne prennent pas en considération l'impact de ces PP sur leur santé et sur l'environnement où ils vivent.

Le plus dangereux dans les pratiques agricoles chez la plupart des agriculteurs au niveau du caza de Zahlé se résume au non-respect des délais d'interdiction des délais de rentrée dans le champ après le traitement, ni des doses homologuées et du nombre de traitements pour chaque produit.

De même, il existe un manque d'information auprès de la majorité des agriculteurs concernant les bonnes pratiques d'utilisation des PP et cela est très clair face à l'absence de formations traitant la question des PP, surtout que les agriculteurs suivent des programmes de traitement d'une manière systémique.

Par ailleurs, dans notre étude il est important d'insister sur le fait que les cartes des concentrations en pesticides lixiviés qui ont été réalisées (figures 87, 89, 91 et 93) représentent la sensibilité du premier mètre du sol au transfert des pesticides. Donc il ne s'agit pas de cartes de risques globaux liés à l'usage des pesticides. Au niveau du caza de Zahlé, et pour considérer que les cartes des concentrations des substances actives (méthomyl, flutriafol, chlorpyrifos-éthyl et alfa cyperméthrin) qui ont été réalisées comme des cartes à des fins d'outil d'aide à la décision, il est pertinent de considérer un seuil de probabilité qui permet de couvrir une part importante du risque. Ce seuil de probabilité peut être le 80^e percentile spatial des concentrations en pesticides lixiviés ce qui signifie que 80% de la variabilité spatiale est couverte (FOCUS, 2000 ; FOCUS, 2009). Cette valeur de 80^e percentile est considérée comme la valeur de référence dans le cadre du processus décisionnel. Dans notre cas et dans le cadre de la protection des eaux souterraines vis-à-vis de la pollution des pesticides, rappelons que pour qu'une eau soit potabilisable, il ne faut pas qu'elle présente une concentration d'un seul pesticide donné supérieur à 0.1 µg.l⁻¹. Si le 80^e percentile en concentration de pesticides lixiviés est supérieur à cette valeur cible de 0.1 µg.l⁻¹, nous pouvons admettre que le sol est sensible à la lixiviation du pesticide en question. Concrètement, nous regardons donc si 80% de ces variabilités présentent une concentration en pesticide lixivié inférieur à la concentration limite de 0.1 µg.l⁻¹ pour les eaux souterraines. Nous tolérons donc que 20% des cas dépassent ce seuil limite. Dans le cas de nos types de sol, nous avons établi le tableau des concentrations en pesticides étudiés lixiviés mais cette fois en prenant le 80% des variables prédites par PEARL pour chaque type de sol; les résultats sont figurés dans le tableau ci-dessous.

Table 64: 80^e percentile des concentrations en pesticides lixiviés par culture et par type de sol
(source: travail de Kanj F., 2016-2017).

| Matière Active | Culture | 80 ^e percentile ConLeaTgt_Sol_CMvr (µg/l) | 80 ^e percentile ConLeaTgt_Sol_Rgca (µg/l) | 80 ^e percentileConLeaTgt_Sol_Rgeu (µg/l) | 80 ^e percentile ConLeaTgt_Sol_Areu (µg/l) | 80 ^e percentile ConLeaTgt_Sol_Fleu (µg/l) | 80 ^e percentile ConLeaTgt_Sol_Glca (µg/l) |
|--------------------|---------|--|--|---|--|--|--|
| Alfa Cypermethrin | PT | 2.9192 | 2.9184 | 2.912 | 2.9208 | 2.928 | 2.916 |
| | Cerise | 0.70816 | 0.71096 | 0.71424 | 0.71952 | 0.70752 | 0.70752 |
| | Pomme | 0.21352 | 0.21536 | 0.2172 | 0.21936 | 0.21232 | 0.2132 |
| Chlorpyrifos-éthyl | Cerise | 0.37032 | 0.12816 | 0.25176 | 0.00016048 | 0.05732 | 0.55512 |
| | Pomme | 0.254 | 0.069992 | 0.15856 | 0.000023936 | 0.02712 | 0.41408 |
| | Vigne | 1.3176 | 0.38488 | 0.73496 | 0.0042608 | 0.21888 | 2.4232 |
| Flutriafol | Cerise | 0.32472 | 0.013128 | 0.08488 | 1.26E-09 | 1.184 | 1.2376 |
| | Pomme | 0.184 | 0.0010272 | 0.03444 | 0.00000484 | 7.8592E-07 | 0.6116 |
| | Vigne | 1.4064 | 0.856 | 1.1296 | 0.32792 | 0.8736 | 0.184 |
| Méthomyl | PT | 0.9984 | 0.8288 | 0.9144 | 0.3996 | 0.7496 | 1.0944 |
| | Vigne | 1.6064 | 1.2728 | 1.4536 | 0.54424 | 1.1128 | 1.8128 |

D'après les résultats du tableau 64, nous constatons que le 80^e percentile des concentrations en pesticides étudiés lixiviés est supérieur à la norme de probabilité de 0.1 µg.l⁻¹. Donc, dans un contexte de gestion des ressources en eaux souterraine et sur base des quantités appliquées des pesticides émis, les sols de notre zone d'étude peuvent être considérés comme sensibles au transfert des substances méthomyl, flutriafol, chlorpyrifos-éthyl et alfa cypermethrin vers les eaux souterraines.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette thèse a eu pour objectif de développer un cadre méthodologique et opérationnel d'évaluation du transfert des produits phytosanitaires au niveau de l'environnement. Ce travail doit permettre d'élaborer des propositions de gestion des pratiques agricoles et phytosanitaires d'une manière raisonnée, afin de mettre en œuvre un plan stratégique agricole dans le cadre d'une politique publique de gestion des territoires. Ceci a été réalisé à l'aide d'outils d'aide à la décision et d'évaluation de risque de transfert des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement.

Cet objectif opérationnel a été construit en partant de la problématique générale du travail de recherche :

- Quels outils et méthodes doivent mettre en place les décideurs du territoire pour résoudre le problème de la pollution diffuse d'origine agricole?
- Quels sont les impacts de la pollution diffuse sur l'environnement et en particulier quel est le devenir des pesticides au niveau du sol et des eaux souterraines ?

Pour répondre à l'objectif de la thèse, nous avons tout d'abord focalisé notre réflexion sur l'analyse des méthodes et des outils qui permettent l'évaluation des risques de transfert des produits phytosanitaires. Le choix, en termes de méthode générique, nous a orientés vers la mise en œuvre d'outils de simulation spatialisés. L'originalité de cette démarche a été de mettre en œuvre une méthode de spatialisation des exploitations agricoles à partir d'une typologie des systèmes de production afin d'intégrer ces résultats dans un modèle d'évaluation des risques de transfert des produits phytosanitaires dans le sol et les eaux souterraines. Le choix des données et des méthodes de calculs a été défini pour répondre aux besoins du modèle PEARL retenu dans le but d'évaluer les quantités perdues des produits phytosanitaires dans l'environnement et spatialiser ce risque de transfert au niveau du territoire du caza de Zahlé. Le territoire du caza de Zahlé est caractérisé par la diversité agricole avec des cultures intensives qui couvre 52% de la surface agricole utile. Cette zone est connue par son importance socio-économique, agronomique et environnementale où les agriculteurs eux-mêmes sont responsables de l'aménagement de leur exploitation. C'est dans le cadre de ces enjeux que s'inscrivent les travaux de la thèse.

Nous pouvons retenir de ce travail trois éléments principaux :

- Développement d'une démarche méthodologique de spatialisation d'une typologie d'exploitations agricoles;
- Identification des cultures les plus consommatrices de PP et les zones à forte pression phytosanitaire;
- Identification du risque des PP les plus utilisés au niveau de notre territoire sur le sol, les eaux souterraines et la sensibilité des types de sol existant sur la lixiviation des substances actives.

En conclusion de ce travail nous revenons sur les principaux résultats obtenus et leurs importances avec la suite de la recherche. Dans un premier temps nous précisons les contributions scientifiques apportées par notre approche. Dans un deuxième temps, nous cherchons les articulations et les liens entre les connaissances requises au niveau du territoire du caza de Zahlé et les développements des travaux d'évaluation des quantités perdues des pesticides dans le sol et les eaux souterraines et leurs conséquences en termes de pollution diffuse. Pour finir nous présentons des perspectives de recherche qui nous paraissent intéressantes pour la suite de ce travail.

Les principaux résultats retenus de notre recherche

Au terme de cette recherche, divers constats alternent et se succèdent de manière convergente. Ces différents constats successifs nous ont permis de valider la pertinence et l'apport de l'itinéraire de recherche pluridisciplinaire intégrant des démarches d'analyse géographiques et agronomiques pour la résolution d'une problématique environnementale.

- Typologie spatialisée et indicateur de pression phytosanitaire

L'analyse spatiale d'une typologie de systèmes de production agricole stratifiée nous a permis de comprendre la structure du territoire d'étude et de déterminer les facteurs importants dans la genèse et l'aggravation du risque de pollution diffuse d'origine agricole.

Les travaux de calcul d'indicateur de pression IFT au niveau du territoire du caza de Zahlé a joué un double rôle dans notre travail. D'une part, ils nous ont permis d'identifier quelles sont les cultures les plus consommatrices de pesticides et d'autre part en combinant cet indicateur avec le SIG cela nous a permis d'identifier les zones où la pression phytosanitaire est élevée et de voir la variabilité et l'iniquité spatiale en terme de pollution diffuse. Du fait que l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) ne tiennent pas compte des caractéristiques spécifiques de chaque produit phytosanitaire comme son comportement dans l'environnement, sa solubilité, sa volatilité, sa toxicité par les organismes non ciblés, son écotoxicité pour le milieu ni aussi sa vulnérabilité propre à chaque milieu physique, il s'avère indispensable pour poursuivre et affiner l'analyse du risque, de trouver une méthode qui nous aide à évaluer l'impact des produits phytosanitaires utilisés sur l'environnement et les quantités perdus dans le sol et les eaux souterraines.

- Outil d'évaluation et de gestion du devenir des produits phytosanitaires au niveau du sol et des eaux souterraines

Dans le but d'élaborer une démarche méthodologique pour identifier les zones vulnérables aux risques de contamination du sol et des eaux souterraines par les pesticides permettant aux acteurs et aux décideurs locaux d'identifier les zones où ils doivent intervenir en premier, le modèle PEARL, outil d'évaluation du devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement, a été choisi. Ce modèle permet d'évaluer la transformation des substances actives dans les différents compartiments de l'environnement. C'est un modèle qui permet d'évaluer la concentration en pesticides lixiviés dans les eaux souterraines et la quantité accumulée dans le sol. Il nous a

permis aussi de mettre en évidence que le risque de pollution des compartiments sol et eau est liée à la variabilité spatio-temporelle.

L'utilisation de ce type de modèle nous a permis de prendre en compte l'interaction de nombreux facteurs (pluviométrie, cultures, pratiques culturales, propriétés des molécules, différents processus effectués dans les compartiments du sol...). Notre analyse s'est faite sur une seule année d'application ce qui ne permet pas d'évaluer l'impact de l'accumulation pluriannuelle des polluants notamment par rapport à leurs propriétés de persistance. D'une façon générale, il est clair que le devenir des substances actives dans les sols est fonction des propriétés des matières actives mais aussi des conditions du milieu d'où l'existence de différents processus combinatoires.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors du démarrage du modèle. La phase de collecte des données nécessaires pour alimenter le modèle a été la phase la plus difficile. Durant cette phase, nous avons pu rencontrer plusieurs difficultés liées aux données exigées. Il s'agit de :

- Manque de données (registre de substances actives utilisées auparavant)
- Données à contrôler (statistiques peu fiables, somme SAU différente de la SAU totale, etc.)
- Données de différentes sources (données des sols de sources différentes, dans notre cas nous avons pu prendre les caractéristiques physico-chimiques d'une source et la texture du sol d'une autre source et nous avons dû combiner les deux données afin d'établir une seule base de données spatialisée).
- Pour une analyse globale du transfert des produits phytosanitaires au niveau du territoire du caza de Zahlé, nous avons agrégé à l'échelle régionale les résultats obtenus du diagnostic des pratiques agricoles.

Nous avons utilisé des analyses statistiques pour identifier les produits les plus utilisés sur les cultures les plus consommatrices des PP (cerise, pomme, pomme de terre, vigne et blé) afin de sélectionner les substances actives les plus utilisées (glyphosate, méthomyl, diméthoate, proquinazid, chlorpyrifos-éthyl, alfa cyperméthrin, lambda cyhalothrin).

La prévision des concentrations en substance active lixiviée varie d'une culture à l'autre et d'un type de sol à l'autre sur une année. Quatre substances actives ont été retenues comme des substances qui lixivient le plus pour atteindre les eaux souterraines: méthomyl > flutriafol > chlorpyrifos-éthyl > alfa cyperméthrin. Chacune de ces 4 substances possèdent des caractéristiques différentes mais les 4 substances présentent une possibilité de contamination des eaux car les sols présentent une sensibilité sur ces pesticides. Nos résultats de prévision des concentrations des pesticides lixiviés sur une année nous ont permis d'identifier les zones les plus vulnérables en termes de risque de contaminations par ces pesticides. Ces résultats vont permettre aux décideurs de mettre en place des actions, connaissant les zones les plus polluées, les produits incriminés et le taux de risque estimé par les niveaux de concentration.

- *L'utilité du SIG dans notre démarche méthodologique et l'élaboration du plan stratégique de gestion raisonnée des pratiques phytosanitaires*

Pour présenter spatialement les résultats en tenant compte de l'espace nous avons eu recours à l'outil SIG. Le couplage du SIG avec les résultats de la typologie des systèmes de production nous a permis d'identifier spatialement les systèmes de production tout en prenant en considération les caractéristiques structurelles du territoire. A partir de la spatialisation de l'indicateur de fréquence de traitement (IFT), nous avons pu évaluer la contribution entre les systèmes de production à la pollution diffuse et identifier les zones à forte pression phytosanitaire. De ce fait, l'analyse spatiale nous a montré qu'il existe une inégalité entre les communes et cette inégalité est due à la différence de la SAU, des systèmes de production et des comportements des producteurs en termes d'utilisation des produits phytosanitaires. De même, à partir de la spatialisation des résultats des concentrations prédites des pesticides, nous avons pu évaluer l'impact de ces pesticides sur la qualité des eaux souterraines au niveau de notre zone d'étude.

Ainsi les représentations cartographiques et les analyses spatiales de l'impact des pratiques agricoles élaborées dans ce travail à l'aide des SIG ont permis d'une part d'étudier les caractéristiques pédoclimatiques et agronomique sur la gestion de la pollution diffuse et d'autre part de mettre en œuvre un outil d'aide à l'intervention pour cibler les zones à problème.

Perspectives de recherches

L'agriculture est associée à la notion de territoire, la durabilité environnementale à une problématique collective, ce qui modifie les paramètres de formulation des actions de politiques publiques. L'intérêt environnemental et socio-économique de notre zone d'étude et l'hétérogénéité de cette zone en termes de pratiques agricoles et des comportements des producteurs montre la complexité de la problématique de la pollution diffuse traitée dans un cadre spatial.

Cela exige la construction d'une démarche de gestion intégrée et collective de l'agriculture au niveau du territoire d'étude, en prenant en compte les acteurs locaux, les potentialités et les spécificités de l'environnement physique. La conception d'outils d'aide à la décision et la construction d'une démarche méthodologiques pour la gestion des risques des PP lié à la pollution diffuse, ont permis d'enrichir notre recherche.

D'une part le travail de terrain et la construction de base de données sur les pratiques agricoles des agriculteurs au niveau de notre travail, premier travail réalisé au niveau du territoire libanais, nous a permis de comprendre la situation actuelle et les comportements des agriculteurs face à l'utilisation des PP. D'autre part l'utilisation de l'analyse spatiale dans notre analyse nous a permis d'identifier les zones de risque et les facteurs influençant notre analyse.

Ces outils vont aider à construire un projet collectif grâce à la compréhension des représentations que les usagers et parties prenantes dans la gestion et l'utilisation de l'écosystème se font de sa dynamique et des interactions entre règles d'usages et comportements des acteurs locaux. Malgré les limites et les difficultés rencontrées dans ce travail au niveau

conceptuel et dans la démarche méthodologique nous avons pu identifier les substances actives les plus utilisées sur les cultures les plus consommatrices des PP et prédire les concentrations en pesticides lixiviés sur une année afin d'évaluer le devenir des produits phytosanitaires au niveau du sol et des eaux souterraines et leurs conséquences sur la pollution diffuse d'origine agricole.

Mais plusieurs améliorations peuvent être introduites en vue d'enrichir l'apport scientifique de cette thèse et rendre l'outil utilisé dans ce travail plus fiable et plus générique:

- Développer une analyse plus approfondie de la base de données qui a été établie lors du travail de terrain pour avoir plus d'informations concernant les pratiques agricoles au niveau de notre zone d'étude;
- Validation des résultats prédits par le modèle en prenant des échantillonnages des zones identifiées avec des concentrations en substances actives lixiviées supérieur au seuil limite;
- Notre étude est réalisée sur une année d'application, il serait nécessaire de mener l'étude sur plusieurs années pour évaluer l'état du sol et des eaux souterraines au niveau du territoire;
- Intégration des nouvelles approches telles que la lixiviation des nitrates au niveau des eaux souterraines;
- Simulation avec les autres substances actives et évaluer les risques de ces substances sur les différents compartiments de l'environnement;
- Elaborer un plan stratégique de gestion des pratiques agricoles afin de gérer la pollution diffuse au niveau de notre territoire en se basant sur les résultats obtenus au niveau des comportements des agriculteurs et des pratiques agricoles.

Au cours de notre étude nous n'avons pas traité l'évaluation du risque intrinsèque des produits phytosanitaire mais seulement l'évaluation du transfert des produits phytosanitaires au niveau du sol et des eaux souterraines.

Les travaux de recherche de Ayadi H. en 2014, Le Grusse *et al.*... et Mghirbi 2016 ont permis d'élaborer des modèles de représentation spatialisés de la pollution diffuse due aux produits phytosanitaires avec des indicateurs de pressions et de risques potentiels sur la santé et l'environnement des matières actives avec le logiciel EtoPhy. Il serait donc très pertinent d'associer les outils de modélisation des transferts spatialisés avec l'évaluation spatialisée des risques potentiels des produits phytosanitaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELAOUAHED R., 2014, « Analyse des pratiques phytosanitaires sur les cultures maraichères sous serre cas d'application la région de Souss Massa », Montpellier (France): CIHEAM-IAMM.
- ALEXANDER M., 1981, "Biodegradation of chemicals of environmental concern", *Science*, 211(4478), 132–138.
- AMERY A., 2003, "Media politics of water development: the case of Wazzani spring Lebanon, *Journal of social affairs*, spring, 20 (77), p. 27 – 48.
- ANDRE P. *et al.*, 2002, « Elaboration d'un cadre conceptuel et méthodologique pour l'évaluation intégrée des impacts des projets d'infrastructures linéaires sur la qualité de vie », rapport de recherche, Programme R&D de l'Agence canadienne d'évaluation environnementale, Université de Montréal, Montréal, p. 108.
- ARIAS-ESTEVEZ M. *et al.*, 2008, "The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(4), 247–260.
- Atlas Agricole du Liban, 2004, Ministère de l'Agriculture Libanaise.
- AYADI H. (2013). *Outils de gestion de la pollution phytosanitaire diffuse au niveau d'un territoire : cas d'application zone humide Ramsar de la Merja Zerga au Maroc*. Thèse (Dr en Géographie et Aménagement de l'Espace, spécialité Agronomie) : Université Montpellier 3, (France). 283 p. + annexes 66 p. Thèse soutenue en co-tutelle : CEDoc-IAV Hassan II Rabat (Maroc) et Ecole Doctorale ED 60 Unité de Recherche GRED / LAMES du CIHEAM-IAMM.
- BAILEY G. W. & WHITE, J. L., 1964, "Soil-pesticide relationships, adsorption and desorption of organic pesticides by soil colloids, with implications concerning pesticide bioactivity", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 12(4), 324–332.
- BAILEY G. W., SWANK R.R., & NICHOLSON H. P., 1974, "Predicting pesticide runoff from agricultural land: A conceptual model", *Journal of Environment Quality*, 3(2), 95.
- BAIROCH P., 1978, « Le tiers monde dans l'impasse », Editions Gallimard, Paris.
- BAIROCH P., 1989, « Les trois révolutions agricoles du monde développé : rendements et productivité de 1800 à 1985 », *Revue Annales, économies, sociétés, civilisations-* 44ème année, N° 2, PP 317-353.
- BAIZE D. et JABIOL B., 1995, « Guide pour la description des sols », Paris, INRA.
- BALDY C., 1959, « Contribution à l'étude climatique du Liban », *Geocarrefour*, 34-1, p. 57–73.
- BARRIUSO E., SOULAS G., & SCHIAVON, M. (2000). Rétention et dégradation des pesticides dans le sol. *Hydrogéologie*, 1(1), 49–56.
- BEDOS C. *et al.*, (2002). Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview. *Agronomie*, 22(1), 21–33.

-
- BERGER T., 2001, Agent based spatial models applied to agriculture: a simulation tools for technology diffusion, resources use changes and policy analysis, *Agricultural economics*, 25, (2-3), 245-260;
- BESSAOUD-REQUIER-DESJARDINS, 2011, «L'impossible écologisation des politiques publiques au Maghreb », Communication au colloque National INRA- Unité Ecodéveloppement. Ecologisation des politiques publiques et des pratiques agricoles. Avignon. 1 les 16- 18 mars 2011.
- BETRAND C. et BETRAND G., 2002, *L'environnement à travers territoire et temporalité*, Arguments, 330 p.
- BIGGAR J.W. and NIELSEN D.R., 1962, "Miscible displacement and leaching phenomena", in *Irrigation of agricultural lands*, Madison, Wisconsin, USA, p. 254 – 274.
- BIRABEN J-N., 2006, «Essai sur l'évolution du nombre d'hommes», *Population et Sociétés* n° 394, octobre 2003.
- BLANC P., 2002, «Du Maghreb au Proche-Orient : les défis de l'agriculture », Paris (France) : L'Harmattan. 291 p.
- BLANC P., 2006, « Le Liban, l'eau, la souveraineté », IAMM, été 2006, n° 58.
- BLANC P., ISSA HANA F. S., 2013, « Syrie, Liban, Palestine : la politique au prisme du syndicalisme agricole. Paris (France) : CIHEAM. p. 42-45. (Lettre de Veille du CIHEAM, n. 26).
- BLANCO M. et al., 2009, "Analytical control of adjuvants in herbicide formulations by NIR spectroscopy", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395(3), 839–844.
- BOCKSTALLER C. et al., "Evaluation agrri-environnementale et choix d'indicateur: acquis, enjeux et pistes. », *Innovation agronomiques*, 31, p. 1 – 14.
- BOESTEN J. & VAN DER LINDEN A. M. A., 1991, "Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence", *Journal of Environment Quality*, 20(2), 425.
- BOIFFIN J., 2004, "Territoire: agronomie, géographie, écologie, où on est-on? De point de vue d'un chercheur agronome" *Natures Sciences Sociétés* 12, 307–9
- BOIVIN A. 2003, « *Disponibilité Spatio-temporelle et Transfert des pesticides dans les Sols.* », PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- BOLENS L., 1981, « Agronomes andalous du Moyen-Âge », Librairie Daroz. Genève.
- BOOTHROYD P., 1991, «Developing community planning skills: Applications of a seven-step model », University of British Columbia, CHS Research Bulletin, février 1991, p. 9.
- BORGGGAARD 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(4), 441–456.

-
- BOURGEAULT J., 2009, « Facteur d'adoption de la lutte intégrée dans le secteur maraîcher en Montérégie – Québec », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'environnement : Université du Québec, Montréal.
- BOUSSETTA A. *et al.*, 2015, “Comprendre un paysage et un territoire à travers d'un outil de spatialisation participative: cas de la zone de Mornag-Jbel Ressas,” *SAGEO*;
- BRGM (2000). *Gestion et traitement des sites pollués. Annexe 11, Glossaire*. Montpellier: BRGM, 49 p.
- BRIAND L., 2003, “Les relations de surveillance entre le MFE et le CPE. Une première analyse. », Colloque économie, sociale et solidaire, Rennes : Presses universitaires de Rennes.
- BROWN C.D. *et al.*, 2000, Brown, C. D., Hollis, J. M., Bettinson, R. J., & Walker, A. (2000). Leaching of pesticides and a bromide tracer through lysimeters from five contrasting soils. *Pest Management Science*, 56(1), 83–93.
- BRUSSEAU M.L. and RAO P.S., 1990, « Influence of sorbate structure on non-equilibrium sorption of organic compounds », *Environmental science and technology*, 25, p. 1501 1506.
- BUCKINGHAM E., 1907, “Studies on the movement of soil moisture”, Bull. 38, USDA, Bureau of Soils, Washington D.C.
- CALVET R. (1989). Adsorption of organic chemicals in soils. *Environmental Health Perspectives*, 83, 145–177.
- CALVET R. (2003). *Le sol : propriétés et fonctions*. France Agricole Editions.
- CALVET R., 1988, « Études sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère : comptes rendus des travaux effectués dans le cadre de l'Action Thématique Programmée "Eau". », Editions Quae.
- CALVET R., BARRUISSO E., BEDOS C., BENOIT P., CHARMAY M.- P., & COQUET Y., 2005, «*Les pesticides dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*». France Agricole Editions.
- CANTATO O. *et al.*, 2010, “Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques” (23^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, France) ;
- CAPILLON A. et MANICHON H., 1978, “La typologie des exploitations agricoles, un outil pour le conseil technique” (Institut national agronomique de Paris-Grignon, France);
- CAPILLON A. et MANICHON H., 1991, “Guide de l'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes”, *Relance agronomique* ;
- CAPILLON A., 1985, « Connaitre la diversité des exploitations, un préalable à la recherche de références techniques régionales », *Agriscopes*, 6 : 31-40 ;
- CARRINGER R.D. *et al.*, 1975, « Adsorption-desorption of selected pesticides by organic matter and montmorillonite: *J. Agric.*”, *Food Chem*, 23, p. 568 – 572.

-
- CHALHOUB M. *et al.*, 2009, «Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un sol de Bekaa (Liban) sur la rive du fleuve de Litani », Etude de gestion des sols, volume 16, 2, p. 67 – 84.
- CHAMOPEAUX C., 2006, « Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures, évolution de l'indicateur de fréquence de traitement à travers d'enquêtes : « pratiques culturelles » du SCEES entre 1994 et 2001, In : INRA, rapport d'étude commandité par MAP (DGFAR).
- CHARBONNIER E. *et al.*, (2015). *Pesticides : des impacts aux changements de pratiques*. Versailles (France) : Editions Quae. 400 p. (Savoir Faire).
- CHARMET G. *et al.*, 2017, « Agriculture et alimentation durables : trois enjeux dans la filière céréales », Versailles (France) : Editions Quae. 190 p. (Matière à Débattre et Décider).
- CHBIB C. *et al.*, 2016, «Evaluation de la contamination des eaux souterraines par les pesticides organochlorés dans la zone d'Akkar – Nord du Liban. », Thèse de doctorat, Université de Lille – France.
- CHBIB C. *et al.*, 2016, « Evaluation de la contamination des eaux souterraines par les pesticides Organochlorés dans la zone d'Akkar – Nord du Liban » (46^{ème} congrès du groupe français des pesticides, Bordeaux, France)
- CHECHILE R., 1991, « Introduction to environmental decision-making » in R.A. Chechile et S. Carlisle 1991: 1 – 13.
- CHEVET J-M, 1996, «Quelle révolution agricole en Angleterre ? », Histoire et mesure, n° 3/4, vol XI.
- CHEVILLARD A. *et al.*, 2012, « Controlling pesticide release via structuring agropolymer and nanoclays based materials », Journal of Hazardous Materials, 205–206, 32–39.
- CIHEAM - PLAN BLEU, 2009, «Repenser le développement rural en Méditerranée», Paris. Presses de Sciences Po - Voir le chapitre 2 relatif aux ressources naturelles de Florence Pintus, Méditerranée.
- CNRS (National Council for Scientific Research), 2007, « Final Report of the project on: Towards an Ecosystem Approach to the Sustainable Management of the Litani Watershed. », I RC, CNRS, SA, LRA
- COLSON F., 1985, «Les états généraux du développement agricole: un temps fort du thème de la diversité de l'agriculture et de la pluralité du développement» *In Agriscope*, n° 5;
- COMAIR F., 2011, « L'efficacité d'utilisation de l'eau et approche économique », Etude nationale Liban, Plan Bleu, Juillet 2011.
- CONSO F., 2002, «Toxicologie: impact des produits phytosanitaires sur la santé humaine », p. 659 – 698, ACTA, Ministre de l'écologie et du développement durable, Paris.
- COREY E. J., 1977, « A new synthetic route to Perhydrohistrionicotoxin », Chimie organique et chimie biologique, vol 60, issue 7, p. 2294 – 2302.

CORPEN, 1996, *Qualité des eaux et produits phytosanitaires. Proposition pour une démarche de diagnostic*. Paris: CORPEN (Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les Phosphates et les Produits Phytosanitaires provenant des Activités Agricoles). 120 p.

http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_1996_02_qualite_eau_phyto.pdf

CORWIN D. L. *et al.*, 1999, Introduction assessing nonpoint source pollution in the vadose zone with advanced information technologies. In L. Corwin, K. Loague, & R. Ellsworth (Eds.), *Geophysical Monograph Series*, volume 108 (pp. 1–20). Washington, D. C. : American Geophysical Union.

Cours des Compte Européenne, Rapport spécial n° 21/2017: Le verdissement: complexité accrue du régime d'aide au revenu et encore aucun bénéfice pour l'environnement.

CUNNINGHAM S. D. *et al.*, 1997, « Phytoremediation of contaminated water and soil. In *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*, volume 664 of *ACS Symposium Series* (pp. 2–17)”, American Chemical Society, dissolved organic matter on pesticide sorption. *Science of The Total Environment*, 298(1–3), 147–161.

DARCY H., 1856, “Recherche expérimentale”, loi de Darcy, document pour l’histoire de technique, p. 214.

DARWICH S., KANJ F. et SAYED AHMAD E., 2016, “Etude sur l’agriculture familiale a petite echelle au Proche-Orient et Afrique du Nord, pays focus : Liban. », CIRAD – CIHEAM-IAMM.

DE VAUMAS E., 1951, « La structure du Moyen Orient d’après Etienne de Vaumas. », *Géo-carrefour*, 1951, 26-3, p. 367 – 375.

DEFFONTAINE J-P. et LARDON S., 1994, *Acteurs et Territoires Locaux: Vers Une Géographie de l’aménagement*, Ed. Quae

DEMPSTER J.-P., 1975, « *Animal Population Ecology* », Academic Press London

DEVILLERS J. *et al.*, 2005, « Indicateur pour évaluer les risques à l’utilisation des pesticides », Paris : Lavoisier, p. 278.

DOMANGE N. (2011). *Les pollutions diffuses d’origine agricole comme processus de contamination de l’eau en France*. 44 p. Colloque académique Education au Développement Durable : Activités Humaines et Pollutions, 2011/03/30, Boulogne Billancourt (France). http://www.edd.acb-versailles.fr/IMG/pdf/Colloque_edd_intervention_m_domange.pdf

DUBEY AK. *et al.*, 2009, “Alzheimer's amyloid-beta rescues yeast from hydroxide toxicity”, *J Alzheimers Dis* 18(1):31-3.

DUCHAUFFOUR PH., 1970, « Note sur l’évolution des sols calcimorphes de l’étage montagnard humide », *Science du sol*, 3, p. 151 – 163.

-
- DUCHOIT S., 2007, “Prise en compte de l’agregation des cultures dans la simulation du transfert radiatif: importance pour l’estimation de l’indice foliaire (lai), de la parcelle au paysage”, Thèse de doctorat: universite de Toulouse, p. 139.
- DUFFY C.J. and LEE D.H., 1992, “Base flow response from non-point source contamination: simulated spatial variability in source, structure and initial condition”, water resources research, 28, p. 905 – 914.
- DUR J.-C. *et al.*, 1998, “Influence of adsorption-desorption phenomena on pesticide runoff measured under controlled condition”. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 327(6), 405–411.
- DUVERNOY I. et AXES F., 1995, “Diversité de fonctionnement des exploitations agricoles et organisation de l’espace: méthode de diagnostic par des indicateurs spatiaux,” *Théo Quant* ;
- ECRIN (Echange et Coordination Recherche-Industrie), 2002, « La modélisation des transferts des pesticides dans l’environnement. », Paris : ECRIN, p. 207.
- EDWARDS G. R. *et al.*, 1993, “Grazing preference for pasture species by sheep is affected by endophyte and nitrogen fertility”, *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 55: 137-141
- EL FADEL M. *et al.*, 2000, “Water resources in Lebanon: characterization, water balance, and constraints”, *Int. J. Water Resour. Develop.* 16, 4, 615-638, DOI: 10.1080/713672540.
- EL FADEL M. *et al.*, 2003, “Rapport Water Quality Assessment of the Upper Litani Bassin and Lake Qaraoun, Lebanon”, Forward program, Integrated Water and Coastal Resources Mangement- Indefinite Quantity Contract, Bureau for Asia and Near East, U.S. Agency for International Development.
- EL SIBAI A.M., 2004, “Isolation and characterization of an isoproturon-mineralizing *Methylopila* sp TES from French agriculture soil.”, *FEMS microbiology letter*, 239, p. 103-110.
- FADLLALAH A.R., 2001, « Le Liban étude géographique », 437p. La maison de la renaissance, Beyrouth.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2013, “La situation mondiale de l’alimentation et de l’agriculture ».
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2010, « Directives concernant l’élaboration de politiques en matières de gestion des ravageurs et des pesticides », Code international de conduite pour la distribution et l’utilisation des pesticides, FAO p. 44.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2014, « le programme spécial de la sécurité alimentaire », La lutte contre les ravageurs.
- FAO, 1979, « radiation journalière est calculée à partir du rayonnement global mesuré directement dans la même station
- FAOSTAT, 2013, <http://www.fao.org/faostat/en/#data;>

-
- FARMER D, et al., 1995, “A comparison of the fate and effects of two pyrethroid insecticides (lambda-cyhalothrin and cypermethrin) in pond mesocosms” *Ecotoxicology* 4:219–244.
- FLURY M., 1996, “Experimental evidence of transport of pesticides through field soils – A review”, *Journal of Environmental Quality*, 25, 25-45
- FOCUS, 2001, “FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC.”, report of the FOCUS working group on surface water scenarios, EC Document Reference SANCO/4802/2001-rev.2.245 p.
- FOOTPRINT – Functional tools for pesticide risk assessment and management. Home page. [online] (2009-05-22) Available from: <http://www.eu-footprint.org> [2009-09-15]
- FREMONT A. *et al.*, 1984, « *Géographie sociale* », Paris : Masson.
- FREUNDLICH H., 1906, “uber die adsorption in losungen. *Z. Phys.*”. *Chem.*, A (57), 385–470.
- FRISSEL M. J., and BOLT G.H., 1962, “Interaction between Certain Ionizable Organic Compounds (herbicides) and Clay Minerals”, *Soil Sci.*, 94: 284-291.
- GAILLARDON P., et XING, 1996, Influence of soil moisture on long-term sorption of diuron and isoproturon by soil, *Pestic. Sci.* 47, 347–354.
- GEVAO B. *et al.*, 2000, Bound pesticide residues in soils: a review. *Environmental Pollution*, 108(1), 3–14.
- GEVAO B., SEMPLE, K. T., & JONES, K. C. (2000). Bound pesticide residues in soils: a review. *Environmental Pollution*, 108(1), 3–14.
- GHALEB F., *et al.*, 2007, « Atlas du Liban: territoires et sociétés », Presses d’Ifpo.
- GILBERT N. *et al.*, 2001, « Innovation networks – simulation approach », *Artificial societies and social simulation*, 4:3,
- GIRARD N. *et al.*, 2015, “Analyzing indicators for combining natural resources management and production-oriented activities”, *Environment Development and Sustainability*, 17 (1), 155-172.
- GIRARDIN P. *et al.*, “Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems”, *Journal of sustainable agriculture*, 13 (4), p. 5 – 21.
- GOBAT JM. *et al.*, 1998, « Le sol vivant », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- GOUY V. & BELAMIE R., 1993, “Using the creams pesticides transfer submodel at a rainfall simulation scale”, *Water Science and Technology*, 28(3-5), 679–683.
- GRAS C. *et al.*, 1994, “Influence of air volatility, air temperature and air humidity at the volatilization of trifluralin from soil.”, *Chemospher*, 28, p. 491 – 499.
- GRIL J.-J. *et al.*, 1999, Processus de transfert superficiel des produits phytosanitaires, de la parcelle au bassin versant. *La Houille Blanche*, (5), 76–80.

-
- GROSS H., 2011, «Analyse managériale des rapports entre nature des outils et action pour la gestion agri-environnementale : Le cas de la gestion durable des ressources pastorales », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, p. 193
- GRUNDMANN S. *et al.*, (2011). Impact of soil water regime on degradation and plant uptake behaviour of the herbicide isoproturon in different soil types. *Chemosphere*, 82(10), 1461–1467.
- GUILLAUME J. *et al.*, 2018, “Référentiel sur les outils de la recherche pour réduire les pollutions de l’eau par les pesticides”, rapport final, Agence française pour la biodiversité, INRA.
- GUIMONT S., 2005, *Devenir des pesticides dans les sols en fonction de l’état d’humidité et du mode de circulation de l’eau dans le sol*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- GUSTAFSON D. H., 1990, “The Quality Assessment Index (QAI) for Measuring Nursing Home Quality”, *Health Services Research*, 25 (1), p. 97-127.
- HADDAD H., 1981, “Anatomie de la francophonie libanaise”, Une francophonie différentielle, Harmattan, Paris, Université de de Saint Joseph, Beyrouth ;
- HAJJAR Z. K., 1997, “Lebanese Water and Peace in the Middle East”, *Dar el ilm lilmalayin*, Beirut, Lebanon.
- HATCHUEL A. et WEIL, B., 1992, « L’expert et le système – Gestion des savoirs et métamorphose des acteurs dans l’entreprise industrielle », suivi de quatre histoires de systèmes-experts, *Economica*, Paris, P. 263
- HAUSWIRTH D. *et al.*, 2015, “Apports des typologies d’exploitations aux démarches de conception en agriculture de conservation: une étude de cas dans le Nord de Vietnam,” *Cahiers Agricoles* 24, n° 2 ;
- HAYO M. et VAN DER WERF G., 1997, “ Evaluer l’impact des pesticides sur l’environnement”, INRA, station d’agronomie, BP 507, 68021 Colmar;
- HOUET T., 2010, “Modélisation prospective spatialisée à l’échelle locale: approche méthodologique”, *Revue Internationale de Géomatique X (n.d.): 1 à X*
- HOWARD A., 2007, “The soil and health: a study of organic agriculture”, University Press of Kentucky
- IBN AWWAM, 1977, « Livre de l’agriculture » ou « Kitab el-filaha », Tunisie, 1, p111.
- ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Area), 2017, “Science for resilient livelihoods in dry area” online.
- IFEN (Institut français de l’environnement). (1996). *Indicateurs de performance environnementale de la France: édition 1996 -1997*. Paris: Lavoisier Tec & Doc. 125 p.
- IFEN (Institut français de l’environnement). (1997). *Agriculture et environnement les indicateurs : édition 1997-1998*. Paris: Lavoisier Tec & Doc. 72 p.

-
- JAMET F. ET BAUER F., 1979, « Symposium HDP », conf. Shock waves in coordination matter, pulman, wash, Paris, p. 409.
- JARDONNET E., 2002, « Agriculture raisonnée : une troisième voie entre l'intensif et le biologique », *Le Monde*
- JARVIS N.J., 1995, "Simulation of soil water dynamics and herbicide persistence in a silt loam soil using the MACRO model", *Ecological Modelling*, 81(1), 97–109.
- JARVIS N.J., 2007, "A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality", *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523–546.
- JARVIS N.J., *et al.*, 1994, "Simulation of dichlorprop and bentazon leaching in soils of contrasting texture using the MACRO model", *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 29(6), 1255–1277.
- JENSEN L.T. *et al.*, 2003, "The *Saccharomyces cerevisiae* high affinity phosphate transporter encoded by PHO84 also functions in manganese homeostasis.", *J Biol Chem* 278(43):42036-40
- JURASK R. *et al.*, 2009, Uptake and persistence of pesticides in plants: Measurements and model estimates for imidacloprid after foliar and soil application. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 683–689.
- KAOUANI A., EL JAMALI S. & TALBI M., 2007, « Analyse en composantes principales. Une méthode factorielle pour traiter les données didactiques », *Radisma*, n°2, 18 p.
- KATAGI T. *et al.*, 2008, « Surfactant effects on environmental behavior of pesticides. », In D. M. Whitacre (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, number 194 in *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (pp. 71–177). Springer New York.
- KHAN M.S., 1973, "Food of tiger frog *Rana tigerina* Daudin." *Biologia* , 19:93-107 ;
- KHOURY Y. *et al.*, 1975, « Méthode de préparation de la carte scolaire : la каза de Zahlé-Liban », un projet de recherche de l'IPE dirigé par Jacques Hallak, Paris : Institut international de planification de l'éducation.
- KOHNE AW. *et al.*, 2008, "Is soil quality improvement by legume cover crops a function of the initial soil chemical characteristics", *Nutrition Cycle Agroecosyst.*, 82: 89–105.
- KOUANI A. *et al.*, 2007, "Analyse En Composantes Principales: Une Méthode Factorielle Pour Traiter Les Données Didactiques", *Radisma* ;
- KOUZAYHA A., 2011, « Développement des méthodes analytiques pour la détection et la quantification de traces des HAP et des pesticides dans l'eau. Application à l'évaluation de la qualité des eaux libanaises », thèse de doctorat – spécialité : chimie analytique et environnement, Université de Bordeaux 1.
- LANDAIS E. *et al.*, 1996, *De l'activité agricole au paysage, une démarche de modélisation*, Rencontres recherche ruminants, Paris, Ed. Institut élevage;

LARDON S., 2012, «Géo-agronomie, paysage et projet territoires: sur les traces de Desfontaines », Quae;

LARI, 2016, « Lebanese Agricultural Research Institut », Tall Amara – Bekaa, Liban.

LAURENT C. et MAIGROT J.-L., 1994, « Ménage activités agricoles et utilisation du territoire du local au global à travers les RGA. », Cahiers d'étude et de recherche francophone, Agriculture, 3 : p. 93 – 107.

LAURENT C., 1992, “L’agriculture et son territoire dans la crise. Analyse et démenti des prévisions sur la déprise des terres agricoles à partir d’observations réalisées dans le pays d’Auge”, thèse de doctorat de sciences économiques, Université Paris VII, 415p. + annexes

LAWES J.-B. *et al.*, 1882, « Soil Nitrogen », Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, Beltsville, Maryland.

LE GRUSSE P. *et al.*, 2009, « Tram gestion de la toxicite en zone Ramsar », Rapport scientifique, APR Pesticide.

LE GRUSSE P., MANDART E., AYADI H., BOUAZIZ A., CHTAINA N., DOUKKALI R., LE BARS M., MGHIRBI O., ELLEFI K., FABRE J., BORD J.-P., 2015, Outils et méthodes de gestion des risques liés à l’utilisation des pesticides sur un territoire : les résultats du projet TRam. In : GFP (France). *Congrès du Groupe Français des Pesticides 2015 : recueils des résumés*. p. 104-105. 45. Congrès du Groupe Français des Pesticides : Devenir et Impact des Pesticides : Verrous à Lever et Nouveaux Enjeux, 2015/05/27-29, Versailles (France). Communication orale : résumé et diaporama. Session 6 «Pesticides et société : perception et évaluation du risque».

LE GUEN R. *et al.*, 2012, « L’exploitation agricole à l’aube du XXI siècle », EDUCAGRI, 2012 ;

LEBART L. *et al.*, 1995, «Statistiques exploratoire multifonctionnelle », Edition Dunod, Paris, p. 32 – 205.

LEISTRA M., TIKTAKA., 2001, « PEARL model for pesticide behavior and emissions in soil-plant system ; description of the process in FOCUS PEARL v 1.1.1. », Alterra External research report, Wageningen University, the Netherlands.

LENNARTZ B., 1999, “Variation of herbicide transport parameters within a single field and its relation to water flux and soil properties”, *Geoderma*, 91(3–4), 327–345.

LEVY D., 1994, “How the Dismal Science Got its Name: Debating Racial Quackery”, *Journal of the History of Economic Thought*, 23, 01, (5)

LEVY J. et LUSSAULT M., 2003, « Dictionnaire de la géographie et de l’espace des sociétés », Ed. Belin.

LIMING prénom 2008

LIN C. H. *et al.*, (2003). Bioremediation and biodegradation. *J. Environ. Qual*, 32, 1992–2000.

LOIRET, 2016, « Météo 45 », online.

LOUCHART X. & VOLTZ M., 2006, « Aging effects on the availability of herbicides to runoff transfer », *Environmental Science & Technology*, 41(4), 1137–1144.

LOUCHART X., 1999, « Transfert de pesticides dans les eaux de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant viticole », Montpellier: INRA/ENSAM, laboratoire de science du sol, p. 263.

LRA, 1999, « Technical report », Litani River Authority.

LUCAS N. *et al.*, 2008, « Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – a review ». *Chemosphere*, 73(4), 429–442.

MACKAY D., et PATERSON S., 1982, « Fugacity revisited. *Environ. Sci. Technol.* », 16, 654–660.

MADHUN Y.A. *et al.*, 1986 a, « Degradation of the herbicides bromacil, diuron, and chlortuluron in soil », *Chemospher – Elsevier*, vol. 16, p. 1003 – 1011.

MADRIGAL MONARREZ I., 2004, « *Rétention de pesticides dans les sols des dispositifs tampon, enherbés et boisés : rôle des matières organiques* ». PhD thesis, Paris, Institut national agronomique Paris-Grignon.

MAGDELENAT C., 2009, « Mise au point d'un indicateur de risque de contamination des eaux de surface par les pesticides, à l'échelle du petit bassin versant », thèse d'ingénieur: CEMAGREF Lyon, p. 94.

MAKKINK G.F., 1957, Testing the penman formula by means of lysimeters », *J. int. water eng.*, 11, p. 277 – 288.

MALASSIS L., 2004, « L'épopée inachevée des paysans du monde », Edition Fayard, Paris, 524p.

MALONE R.W. *et al.*, 2004b, « Residual and contact herbicide transport through field lysimeters via preferential flow », *Journal of Environmental Quality*, 33(6), 2141–2148.

MAMY L. & BARRIUSO E., 2007, « Desorption and time dependent sorption of herbicides in soils », *European Journal of Soil Science*, 58(1), 174–187.

MANTIGAUD J-C., 2004, « Les filières fruits et légumes frais au Liban : structures, fonctionnement et perspectives », FAO.

MARIN-BENITO J.M. *et al.*, 2013, « Use of raw or incubated organic wastes as amendments in reducing pesticide leaching through soil columns », *Science of The Total Environment*, 463–464, 589–599.

MENDRAS H., 1970, « La fin des paysans. Changement et innovations dans les sociétés rurales françaises », A. Colin, Paris.

MGHIRBI O., BORD J.-P., LE GRUSSE P., MANDART E., FABRE J., 2018, « Mapping for the management of diffuse pollution risks related to agricultural plant protection practices: case of

the Etang de l'Or catchment area in France". *Environmental Science and Pollution Research*, 08/03/2018, Online, p. 1-21.

MILLS A. C. and BIGGAR J. W., 1969, "Solubility-temperature effect on the adsorption of T- and ~3-BHC from aqueous and hexane solutions by soil materials.", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33, 210-216.

Ministère d'économie et de commerce, 2015, www.economy.gov.lb.

Ministère d'économie et de commerce, 2016, www.economy.gov.lb

Ministère de l'agriculture libanaise, département de protection, 2016.

MOE/LEDO/ECODIT, 2001, « Lebanon state of the environment report », p.246.

MONINO, J.L. 2000, « Méthodes de sondage », Montpellier : université Montpellier I – Faculté de Sciences Economiques, Cours de l'université Montpellier I – Faculté de Sciences Economiques, année universitaire 1999-2000. 42 p.

MOUILEH Z., 2012, «Evaluation des pratiques phytosanitaires à l'aide d'indicateurs de pression et de toxicité sur l'homme : application dans le sous bassin versant de la Merja Zerga au Maroc, Mémoire (Master of Science): CIHEAM-IAMM, Montpellier. 147 p. (Master of Science: Professional, n. 819).

MOUSSA HAIDAR C., 2014, «Evaluation de la qualité des eaux du bassin supérieur de la rivière de Litani, Liban : Approche hydrogéochimique », Thèse doctorat, Université de Lorraine.

MULLEN, A.J, *et al.*, 1992, "Effects of freezing and storage on the phenolics, ellagitannins, flavonoids and antioxidant capacity of red raspberries", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (18): p. 5197-5201

NACP, 2002, "Environment status in Lebanon", part I.

NAVARRO S. *et al.*, 2013, « Review. An overview on the environmental behavior of pesticide residues in soils". *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(3), 357–375.

NORRIS R.F. *et al.*, 2003, "Concepts in integrated Pest Management", Pearson education, p. 586.

NOVAK S.M. *et al.*, 2003, "Modelling metolachlor exports in subsurface drainage water from two structured soils under maize (eastern france)", *Journal of Hydrology*, 270(3–4), 295–308.

NOVOTNY V., 1999, "Diffuse pollution from agriculture - A worldwilde outlook," *Water Science and Technology* 39, no. 3: 1–13;

NYE P.H., 1979, "Diffusion of ions and uncharged soluted in soils and soil clays", In *Advances in Agronomy*, Academic Press, New York, USA, p. 225 – 272.

OCDE (Paris, France). (2016). *Perspectives d'avenir pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde*. Paris (France) : OCDE. 121 p.

-
- OCDE, 1993, «Corps central d'indicateurs de l'OCDE pour les examens des performances environnementales», Rapport de synthèse du groupe sur l'état de l'environnement, Paris: OCDE, p. 36.
- OCDE, 1999, «Indicateurs environnementaux pour l'agriculture. Question clés et conception », Séminaire de York, vol 2. Paris: OCDE, p. 221.
- OERTLI B. et *al.*, 2004, «1st European Workshop: conservation and monitoring of pond biodiversity», *Archiv. Sci.*, 57, 2-3.
- OMS et PNUD, 1990, «Santé et l'environnement: pour une collectivité active en recherche», CRDI.
- OSTY P-L., 2008, «Raisonnement à partir de cas et agronomie de territoires, », *Anthropologie des connaissances* 2, no. 2: 169–93 ;
- PEDRO G., 2007, « Sol, humus et nutrition des plantes : de la chimie agricole à l'agrogéochimie (du 19ème au 20ème siècle)», in Robin *et al.*, *Histoire et agronomie, entre rupture et durée déjà citée*, p 121-136.
- PERICHON C., 1995, «Elevage en Marais et organisation spatiale» Mise en Œuvre d'opération agriculture environnement dans les marais de l'Ouest" (ADEMAR) ;
- PIGNATELLO J., 1999. The measurement and interpretation of sorption and desorption rates for organic compounds in soil media. *ADVANCES IN AGRONOMY, VOL 69*, 69, 1–73.
- PIGNATELLO J.J. & XING B., 1996, Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. *Environmental Science & Technology*, 30(1), 1–11.
- PINGAULT N., 2009, « Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquence de traitement », *Notes et études socio-économiques*, 32, 61-94.
- POULAIN D., (sous la direction), 2004, «Histoires et chronologies de l'agriculture française», Ellipses, Paris. Article « Nourrir les cultures : les engrais ».
- QUIGLEY R.M., and FERNANDEZ F., 1989, "Clay/organic interactions and their effect on the hydraulic conductivity of barrier clays", *Proceedings of the Inter-national Symposium on Contaminant Transport in Groundwater*, Stuttgart, Germany, p. 117–124.
- RAKOTOMALA R., 2005, "TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche", in *Actes de EGC'2005, RNTI-E-3*, vol. 2, pp. 697-702 ;
- RAKOTOMALALA R., 2005, "Arbres de décision", *Modulad*, 33, p. 163 – 187.
- RAMMAL H., 2007, "A technical Report on the Post-Conflict impact on agriculture of coastal zone of the Litani basin", Pahl-Wostl, D., 2007. *Terrain analysis*. Mc-Graw-Hill Inc. NY. P. 438.
- RAO P.S. *et al.*, 1974, « Estimation of pesticide retention and transformation parameters required in non-point source models », In *Environmental impact of non-point source of pollution*, Overcash, M.R. and J.M. Davidson, EDS. Ann Arbor science publishers.

-
- RAT *et al.*, 2005, « Transfert des pesticides vers les eaux souterraines , modélisations à l'échelle d'un bassin versant, cas d'étude du bassin de la Veste », Paris : Ecoles des Mines, centre de Géoscience.
- REGNAULT H. et ARNAULD DE SARTRE X., 2012, « Les révolutions agricoles en perspective », REGNAULT-ROGER C., (Editeurs), Éditions France Agricole.
- REGNAULT-ROGER C., 2005, « Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement », Tec et Doc Lavoisier, Paris, ISBN 2-7430-0785-0, pp 1013,
- RENAUD F. *et al.*, 2004, "A lysimeter experiment to investigate temporal changes in the availability of pesticide residues for leaching", *Environmental Pollution*, 131(1), 81–91.
- RGA « Recensement Générale Agricole », 2010, (Ministère de l'Agriculture Libanaise) ;
- RICCO R., "TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche", in Actes de EGC'2005, RNTI-E-3, vol. 2, pp.697-702, 2005.
- RICHARDS L.A. 1931, "Capillary conduction of liquids in porous medium", *Physics* 1:318–333.
- RIFAI A., 2013, « Etude de la dégradation par photolyse directe de pesticides - Caractérisation structurale et toxicité potentielle des photoproduits », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique ParisTech.
- ROBIN P., AESCHLIMANN JP., FELLER C. (Editeurs scientifiques), 2007, « Histoire et agronomie : entre rupture et durée », IRD, Collections. Paris.
- RODRIGUEZ-RODRIGUEZ C.E. *et al.*, 2013, « On-farm biopurification systems : role of white rot fungi in depuration of pesticide-containing wastewaters », *FEMS Microbiology Letters*, 345(1), 1–12.
- ROUSSEAU S., 2004, « Capabilités, risque et vulnérabilité. » In : DUBOIS J.L. LACHAND J.P., MANTAND J.M., POUILLE A. « Pauvreté et développement socialement durable... », Bordeaux : presses universitaires de Bordeaux, p 11-22, colloque international, 22-23/11/2001, Bordeaux.
- ROY B., 1985, "Méthodologie multicritère d'aide à la décision", Paris, Economica, p. 423.
- ROZELIER M., 2011, « L'envolée du bio », Commerce de Levant, Mars 2011.
- SALAH D., 2012, « Gestion du risque environnemental des produits phytosanitaires lié à la variabilité des sols. Application sur des systèmes de production du bassin de l'Étang de l'Or. », Montpellier (France): CIHEAM-IAMM. 92 p. (Master of Science, n. 121).
- SAMUEL O. *et al.*, 2007, " Indicateur de risque des pesticides du Québec-IRPeQ-Santé et Environnement Québec." Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation/ Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs/ Institut National de Santé Publique du Québec: 44 p [<http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/602-IndicateurDeRisqueDesPesticides.pdf>]

-
- SAMUEL O. et SAINT LAURENT I., 2001, “Indicateur de risqué des pesticides”, Québec, IRPeQ, santé et environnement ;
- SCHOEN R. *et al.*, 1999a, “Preferential flow and solute transport in a large lysimeter, under controlled boundary conditions”. *Journal of Hydrology*, 215(1), 70–81.
- SCHOEN R. *et al.*, 1999b, “Modelling of solute transport in a large undisturbed lysimeter, during steady-state water flux”, *Journal of Hydrology*, 215(1), 82–93.
- SCHROLL R. & KUEHN S., 2004, Test system to establish mass balances for ¹⁴C labeled substances in soil plant atmosphere systems under field conditions. *Environmental Science & Technology*, 38(5), 1537–1544.
- SCHWARZENBACH R.P. *et al.*, 2003, “Environmental organic chemistry”, John Willey and sons, New York, USA.
- SENESI N. (1992). Binding mechanisms of pesticides to soil humic substances. *Science of the total Environment*, 123, 63–76.
- SHUMACHER W., 1864, “Dies physic des Bodens”, Wiegandt and Hempet, Berlin.
- SIMON J., 1990, « Evaluer l’impact sur l’environnement, une approche originale par l’analyse multicritère et la négociation », Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 261.
- SINGH B. K. & WALKER A., 2006, Microbial degradation of organophosphorus compounds. *FEMS Microbiology Reviews*, 30(3), 428–471.
- SOULAS G., 1993, “Evidence for the existence of different physiological groups in the microbial community responsible for 2, 4-d mineralization in soil”, *Soil biology and biochemistry*, 25(4), 443–449.
- SOULAS G. (1985). La dégradation dans le sol aspects microbien et cinétiques. *Science du sol*, 2, 43–57.
- SOUTHWICK L.M. *et al.*, 2003, « Atrazine and metolochlor in surface runoff under typical rainfall conditions in Southern Louisiana », journal of agricultural and food chemistry, vol 51, p. 5355 – 5361.
- SOUTHWICK SM. *et al.*, 1990, “Noradrenergic and serotonergic function in posttraumatic stress disorder.”, *Arch Gen Psychiatry*, 54:749–758.
- SPARK K. & SWIFT R., 2002, Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption. *Science of The Total Environment*, 298(1–3), 147–161.
- SPIKKERUD E., 2002, "Pesticides aquatic risk indicators: testing the OECD indicators REXTOX, ADSCOR and SYSCOR and the Norwegian aquatic risk indicator with estimates of use data from Norway." In <http://www.oecd.org/dataoecd/6/17/2752913.pdf>.
- STEYLER A. et ZIMMERMANN B., 2004, Influence sociale et diffusion de l’innovation, *Mathematics and social sciences*, 168 (4), p. 43-54 ;

-
- THENAIL C., 1996, “Exploitations agricoles et territoires: contribution à la structuration de la mosaïque paysagère”, thèse de doctorat, Université de Rennes, France.
- TIKTAK A. et al., 2000, “Manual of focus PEARL version 1”, RIVM report 711401008 alterra report 28, National institute of public health and environment.
- TIKTAK A. *et al.*, 2003, RIVM report « Monitoring dark in pesticide registration »
- TIKTAK A. *et al.*, 2012, “Simulation of movement of pesticides towards drains with a preferential flow version of PEARL”, *Pest Management Science*, 68(2), 290–302.
- TINDALL, J. A. & VENCILL W. K. (1995). Transport of atrazine, 2,4-d, and dicamba through preferential flowpaths in an unsaturated claypan soil near centralia, missouri. *Journal of Hydrology*, 166(1–2), 37–59.
- TRADMAP, 2017, « Statistiques du commerce pour le développement international des entreprises », online.
- TREVISAN M. *et al.*, 2000 a, « Pesticide leaching potentiel in the Trasimeno lake area – Assessment of uncertainty associated with the simulation process.», in A. Walker (ed) 2001, BCPC symposium Proc.
- VAN BENIUM W. *et al.*, 2006, “Lysimeter experiment to investigate the potential influence of diffusionlimited sorption on pesticide availability for leaching”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(24), 9152–9159.
- VAN DAM J.C. *et al.*, 1997, « Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-Atmosphere-Plant environment. Wageningen Agricultural University, Department Water resources, p153.
- VAN DEN BERG F. *et al.* 1999, « Emission of pesticides into the air. », *Water Air Soil Pollut* 115:195–218
- VAN DER LINDEN T. *et al.*, 2003, Comparison of geoparl with the single scenario approach in pesticide registration. In *PESTICIDE IN AIR, PLANT, SOIL & WATER SYSTEM* (pp. 499–506).
- VAN EERD L.L. et al., 2003, “Pesticide metabolism in plants and microorganisms”, *Weed Science*, 51(4), 472–495.
- VAN GENUCHTEN M.TH. and WIERENGA R.J., 1976, “Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytic solution.”, *Soil science society of America journal*, 40, p. 473 – 480.
- VAN LEEUWEN C.J. & HERMENS J.L.M., 1996, “Risk assessment of chemicals: an introduction”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- VERNIER F., 2007, « Définition d’objets spatiaux de référence pour le calcul d’indicateurs agro-environnementaux à différentes échelles », www.esrfrance.fr/sig2007/Cemagref.htm.
- WILFRIED Q., 2014, « Modélisation du devenir des pesticides dans le sol à partir d’un modèle agronomique : évaluation à long terme », thèse doctorat, université Pierre et Marie Curie.

WOLTERS A. *et al.*, 2003, Pesticide volatilization from soil: Lysimeter measurements versus predictions of European registration models. *Journal of Environmental Quality*, 32(4), 1183–1193.

YADURAJO A., 1998, “Stated that solarization increased the NO₃-N and NH₄-N concentrations compared to non-solarized areas in India.

YARON B., 1989, “General principles of pesticide movement to groundwater”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 26(3–4), 275–297.

YATES S. R., 2009, “Analytical solution describing pesticide volatilization from soil affected by a change in surface condition”, *Journal of environmental quality*, 38(1), 259–267.

YOUSSEF *et al.*, 2015, “Occurrence and levels of pesticides in South Lebanon water”, *Chemical speciation and bioavailability*, vol. 27, n 2, p. 62 – 70.

YOUSSEF L. *et al.*, 2012, “Occurrence and levels of pesticides in South Lebanon water”, *Chemical speciation and bioavailability*, 27 (2), 62 -70.

ZAHM F., 2003, "Méthodes de diagnostic des exploitations agricoles et indicateurs panorama et cas particuliers appliqués à l'évaluation des pratiques phytosanitaires." *Ingénieries EAT 33*: pp.13-34.

ZAHM F. et GASSIAT A., 2009, "Les indicateurs d'évaluation des mesures agro-environnementales : retour d'expérience et conséquences du nouveau cadre communautaire " Colloque 9ème journées Françaises de l'évaluation, SFE, Marseille, : 14 p.

ZAPATA A.*et al.*, 2009, “Evaluation of operational parameters involved in solar photo-fenton degradation of a commercial pesticide mixture”, *Catalysis Today*, 144 (1-2), 94–99.

ANNEXES

Annexe 1

Descriptifs résumés des outils et des méthodes de gestion de qualité de ressources en eau contaminé par les pesticides

1. ARPEGES

L'outil ARPEGES a été développé par Gauroy *et al.* (2014) pour estimer un « potentiel de contamination » par des pesticides d'un bassin versant **local d'une masse d'eau** de surface dans toute la France métropolitaine. Le potentiel est calculé par croisement de plusieurs bases de données nationales. La vulnérabilité intrinsèque du milieu (déclinée en types d'écoulement : ruissellement, drainage agricole, écoulements latéraux subsurface et dérive atmosphérique), les caractéristiques physico-chimiques des molécules et la pression phytosanitaire sont prises en compte. Cet outil a été testé pour estimer le risque de non atteinte des objectifs environnementaux (RNAOE) dans le cadre de la mise à jour des Etats des Lieux (EDL) en 2013 (Petit et Pouvreau, 2015). Il a été adapté récemment pour rendre compte d'un potentiel de contamination pour quelques substances actives d'intérêt pour l'ANSES, prises isolément. Ce travail a permis de confronter les résultats de la méthode aux données observées au sein des réseaux de surveillance et interprétées à l'échelle de HER. L'Irstea applique actuellement ARPEGES pour 15 substances actives en vue de l'Etat des Lieux 2019. L'outil a été recodé sous une forme qui permet sa prise en main et son utilisation en autonomie par les Agences de l'Eau.

2. HYPE

Le logiciel HYPE (Croiset et Lopez, 2014) permet de réaliser une étude statistique des chroniques d'évolution de la qualité des eaux souterraines. Des tendances des concentrations en polluant peuvent ainsi être calculées. Pour cela le logiciel procède à une sélection et mise en oeuvre automatique de la méthode statistique la plus adaptée au jeu de données disponible. Il a été mobilisé pour la caractérisation de l'état qualitatif des masses d'eau souterraines et l'évaluation du risque de non atteinte des objectifs environnementaux (RNAOE) dans le cadre de la réalisation de l'Etat Des Lieux de 2013

3. Indice de Développement et de Persistance de Réseaux (IDPR)

L'IDPR (Mardhel et Gravier, 2005) a été conçu pour évaluer la capacité des formations géologiques à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface. Il est utilisé pour réaliser des cartes de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines, et donc des nappes, vis-à-vis des pollutions diffuses. L'indice (score de 0 à 2000) traduit de manière indirecte les notions de flux de pollution éventuelle vers les eaux souterraines ou les eaux superficielles. En effet, il mesure une potentialité d'infiltration (ou de ruissellement) des eaux de pluies sur un territoire donné à l'échelle d'une zone hydrologique (bassin versant BD Carthage), d'un système aquifère ou d'un

domaine géologique. Cet indice est mobilisé par des questionnaires de ressources en eau notamment pour estimer la pression « potentielle » vis-à-vis des pollutions diffuses.

4. Indice de Fréquence de Traitement (IFT)

L'IFT (Pingault et al. 2009) est un indicateur permettant d'estimer l'intensité de l'utilisation des produits phytosanitaires à l'échelle d'une campagne culturale à partir des doses appliquées par hectare rapportée à la dose homologuée. Il correspond ainsi au nombre de doses homologuées appliquées sur une parcelle pendant une campagne culturale. Il peut être calculé pour une culture ou une substance active à l'échelle d'une parcelle ou d'un territoire. Une calculatrice en ligne³⁴ a été développée. L'IFT est mobilisé dans de nombreuses méthodes de diagnostic et d'évaluation des pratiques phytosanitaires.

5. INDIGO

INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2006) se présente comme un « tableau de bord agri-environnemental » constitué de huit indicateurs, dont l'I-Phy pour l'évaluation des risques de transfert de pesticides vers les eaux de surface, eaux souterraines et l'air. La méthode se base sur des données liées aux contextes des parcelles et aux itinéraires techniques. Le logiciel assiste l'utilisateur pour réaliser les analyses multicritères et présente chaque indicateur sous forme d'un indice. Cet outil est utilisé pour réaliser des diagnostics d'exploitation et repérer des pistes d'amélioration pour orienter le conseil

6. I-Phy

L'indicateur I-Phy (Bockstaller et al. 2008) évalue les risques de contamination des eaux de surface, des eaux souterraines et de l'air et le risque lié à la dose utilisée. Ces risques sont ensuite agrégés pour chaque substance active utilisée lors d'un traitement. Le résultat de l'I-Phy résulte finalement de l'agrégation des risques par substance active pour un programme de traitement et dans une parcelle donnée. L'indicateur I-Phy est l'indicateur « phytosanitaire » de la méthode INDIGO. Une nouvelle version de l'indicateur basée sur une approche de métamodélisation a été développée (Lindahl et Bockstaller, 2012).

7. MACRO

Le modèle MACRO (Larsbo et Jarvis, 2003) est un modèle mécaniste monodimensionnel décrivant les transferts d'eau et de pesticides dans l'environnement. Sa principale originalité par rapport à d'autres modèles « pesticides » réside dans sa capacité à prendre en compte l'influence des écoulements préférentiels sur les transferts verticaux des pesticides dans les sols. Cependant différentes situations culturales ne sont pas décrites par le modèle (comme par exemple : interculture, réduction travail du sol, résidus de récolte) et des simulations pluriannuelles pour décrire des rotations ne sont pas prévues dans la version actuelle. Il est largement utilisé en Europe dans le cadre de l'homologation des produits phytosanitaires. Il a été utilisé pour simuler les transferts dans différents contextes agricoles et pédoclimatiques dans plusieurs pays (France, Danemark, Suède) par différentes équipes de recherche.

8. MACRO - MARTHE

Les modèles MACRO (Larsbo et Jarvis, 2003) et MARTHE (Thiéry, 1990) ont été utilisés pour simuler le transfert de pesticides, en particulier l'acétochlore et l'atrazine, depuis la surface du sol, à travers la zone non saturée et dans la nappe, avec prise en compte de la croissance des plantes (Gigleux, 2009). La zone non saturée est représentée entièrement par le modèle MACRO dont les résultats sont utilisés comme données d'entrée du modèle MARTHE. L'auteur a procédé à plusieurs simulations avec MACRO en différents points du bassin d'alimentation de l'aquifère en simplifiant la représentation du sol. Les temps de calculs sont de plusieurs jours pour simuler des écoulements sur une période de vingt ans.

9. Méthode d'analyse agro-anthropologique des pratiques phytosanitaires

Une méthode d'analyse agro-anthropologique a été conçue par Michelin et al. (2012) pour identifier les déterminants des choix de pratiques effectués par les agriculteurs. Elle permet d'évaluer d'une part les marges de manoeuvre techniques des exploitations agricoles, et d'autre part le potentiel d'adaptation « acceptable » par l'agriculteur, en lien avec sa perception de son système d'exploitation et en fonction de son système de valeurs. La méthode se compose de plusieurs étapes dans lesquelles interviennent plusieurs techniques socio-anthropologiques (analyse historique, observation participante, entretiens ouverts et semi-directifs). Une typologie de systèmes de production basée sur des caractéristiques techniques et anthropologiques peut finalement être établie. La méthode a été appliquée dans le cas de l'application de rodenticides pour lutter contre le campagnol terrestre. Il n'existe cependant pas de guide méthodologique pour sa mise en oeuvre.

10. Méthode d'évaluation des pratiques phytosanitaires à partir des carnets de plaine

La méthode d'évaluation des pratiques phytosanitaires et de leur évolution à partir des carnets de plaine a été développée par Schott et al. (2014). Cette méthode s'appuie sur l'outil OSITOP (Outil de Saisie des Itinéraires Techniques Orientés Pesticides ; Nicola et al. 2012) pour faciliter la saisie d'itinéraires techniques en lien avec l'usage des pesticides à l'échelle parcellaire. Il est donc alimenté par des données obtenues à partir d'enquêtes réalisées auprès d'agriculteurs ou de leurs carnets de plaine. OSITOP permet de constituer de manière simple une base de données des traitements phytosanitaires³⁶. Cette méthode est appliquée afin de comparer l'évolution de la pression phytosanitaire liée à deux cultures au sein d'un bassin versant.

11. Méthode d'évaluation du potentiel de contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires

Cette méthode, encore en cours de conception (Rouzies et al. 2017), vise à évaluer le risque de contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires à l'échelle d'un petit bassin versant. La méthode permet d'agrèger à l'échelle d'un bassin versant les flux de phytosanitaires modélisés à l'échelle de la parcelle, en intégrant l'influence des éléments du paysage (routes, fossés, talus, zones tampons) et les pratiques agricoles sur les flux transférés. La méthode fait intervenir un découpage du bassin versant en éléments homogène, une modélisation, très modulaire, représentant le comportement de chaque élément et un couplage dynamique des

éléments. Elle a été testée dans deux bassins instrumentés et est toujours en cours de développement.

12. Méthode de construction de rotations-types en fonction des types de sol

Cette méthode conçue par Vernier et Rousset (2014) consiste à spatialiser des cultures et rotations principales à partir d'une typologie simplifiée des sols. Ces informations sont projetées à l'échelle de l'îlot du RPG. L'objectif est de produire une cartographie représentant la réalité de l'agriculture sur une zone géographique trop large pour envisager d'enquêter tous les agriculteurs. Des itinéraires techniques, notamment les pratiques phytosanitaires, peuvent ensuite être attribués à chaque rotation-type à partir des informations disponibles et d'une expertise locale. La méthode a été mobilisée dans le cadre d'un projet de modélisation de scénarios d'évolution des pratiques agricoles.

13. Méthode de diagnostic Territ'eau

La méthode de diagnostic (Guiet et al. 2013, Gascuel-Oudoux et al. 2013) présentée sur la plateforme Territ'eau, permet de délimiter les zones à risques vis-à-vis de la pollution par les produits phytosanitaires (en distinguant les herbicides et hors herbicides). Cette méthode, reprend le diagnostic parcellaire du risque de contamination des eaux superficielles par les produits phytosanitaires (DPR), en y intégrant les pressions et en le développant à l'échelle du paysage. Elle se base sur le diagnostic de la connectivité des parcelles, par une approche terrain et sur des données liées aux pratiques agricoles. Les données récoltées par analyse du paysage et par enquête auprès d'agriculteurs permet de calculer des indicateurs de pression, de transfert et d'impact. Les résultats sont présentés dans un premier temps à l'échelle des parcelles enquêtées puis du bassin versant en intégrant la connectivité hydrologique du paysage. Une cartographie des pressions est élaborée par parcelles ou groupes de parcelles. Cette méthode a été appliquée sur plusieurs bassins versants dans le cadre de démarches visant à améliorer la qualité de masses d'eau de surface en région bretonne.

14. Méthode de formalisation de types de pratiques des agriculteurs

Cette méthode, conçue par Girard (2006), vise à représenter la diversité des pratiques des agriculteurs d'un territoire et améliorer les connaissances des conseillers agricoles. Elle se base principalement sur la réalisation d'entretiens auprès d'un échantillon d'agriculteurs préalablement défini. Une typologie d'agriculteurs est construite à partir d'une analyse de la similarité des pratiques entre les cas étudiés. Cette méthode a été mobilisée pour la réalisation d'inventaire de pratiques en lien avec une problématique environnementale liée à la gestion d'un territoire. Elle n'a cependant pas encore été utilisée dans le cadre de l'étude de pratiques phytosanitaires.

15. Méthode de reconstitution des séquences de cultures à partir du RPG

Cette méthode (Leenhardt et al. 2012) permet de reconstituer les séquences de culture d'un territoire à partir des données spatialisées du RPG (Registre Parcellaire Graphique ; voir : <http://www.geoportail.gouv.fr/>). Elle consiste à établir une filiation des îlots PAC puis des parcelles culturales entre années pour reconstituer les séquences à l'échelle de l'unité élémentaire

spatiale de mise en oeuvre des séquences. Les séquences une fois reconstituées sont classées en rotation type à partir de règles de décision automatiques basées sur les connaissances expertes. La base de données sur les séquences (environ 11,5 millions de séquences dans 6 millions d'îlots) et rotations est disponible sur demande auprès de l'Observatoire du Développement Rural.

16. Méthode de spatialisation de la BNV-d

La méthode de spatialisation de la BNV-d présentée dans Carles et al. (2015) vise à estimer les quantités de substances actives potentiellement utilisées à partir des données de vente des produits phytosanitaires. Le modèle de spatialisation mis au point permet d'extraire les quantités de substances potentiellement utilisées sur une zone choisie par l'utilisateur (découpage administratif prédéfini ou shape uploadé). La méthode utilisée s'appuie sur la réalisation d'une carte d'occupation des sols agricoles et urbains. De cette carte on déduit des coefficients de répartition des produits phytosanitaires en fonction des surfaces sur lesquelles ils sont autorisés et des doses auxquels ils sont homologués. La méthode est actuellement en cours de validation.

17. Méthode multicritère d'aide à la décision

Un modèle d'analyse multicritère d'aide à la décision (conçu à partir du logiciel ELECTRE TRI-C ; Almeida-Dias et al. 2010) a été employé par Macary *et al.* (2014) afin de caractériser des zones à risque potentiel contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires à l'échelle du parcellaire d'un petit bassin versant. Six critères en lien avec la vulnérabilité du milieu (pente, connectivité, type de sols), les pressions phytosanitaires (IFT) et l'état d'éventuels dispositifs environnementaux (bande enherbée, zone tampon, ripisylve, etc.) ont été utilisés. Ils sont renseignés à partir d'observations de terrain et d'enquêtes. Sur la base de ces critères le modèle effectue un tri des parcelles et les classe en différentes catégories correspondant à des risques de transfert. Bien que cet outil ait été testé sur des territoires à enjeu, celui-ci n'a pas été diffusé par l'auteur pour des raisons de propriété de l'outil d'analyse.

18. Méthode statistique d'analyse des données issues des réseaux de surveillance des eaux de surface

La méthode statistique développée par Gauroy et al. (2012) permet d'établir des profils de contamination types à l'échelle d'une Hydro-Ecorégions³⁷ (HER), correspondant à des graphes d'évolution de la contamination par molécule au cours d'une année ou d'une période donnée à cette échelle. Ces profils donnent des indications sur les ordres de grandeur des concentrations retrouvées dans le milieu et les périodes de contamination plus élevée. Elle permet notamment de rendre compte des différenciations spatiales et temporelles de la contamination entre HER. Cette méthode, basée sur le regroupement des données du réseau de surveillance à l'échelle de la HER, a été conçue pour pallier la moindre représentativité temporelle des mesures acquises sur une station prise isolément du fait de la faible fréquence des analyses associées. Plusieurs applications ont été envisagées notamment pour ajuster les programmes de surveillance de la qualité de l'eau, en ciblant les périodes où la contamination est la plus élevée.

19. Outils d'analyse territorialisée des parcellaires des exploitations agricoles concernées par une AAC

Deux indicateurs ont été conçus pour caractériser les territoires à enjeu eau en fonction des parcellaires agricole : le « poids » de l'exploitation dans le territoire et le « concernement » de chaque agriculteur présent sur le territoire (Barataud et Durpoix, 2014). Ces indicateurs permettent de calculer la part de chaque exploitant sur la SAU du territoire à enjeu eau et la part de la SAU de l'exploitant dans le territoire par rapport à celle se trouvant à l'extérieur de celui-ci. L'analyse des résultats peut permettre d'adapter la mise en oeuvre des actions en fonction de la configuration de l'AAC et des statuts d'agriculteurs ou bien d'anticiper sur la taille et la sélection du collectif d'agriculteurs à mobiliser. Une base de données, appelée DEAUMIN'EAU, a été créée en 2016. Elle regroupe un certain nombre d'information concernant les AAC du bassin Rhin-Meuse, dont les résultats de ces indicateurs.

20. Outil de modélisation du transport de pesticide dans les processus de ruissellement et d'érosion basé sur OpenLISEM

Le modèle hydrologique et d'érosion événementiel LISEM (Limbourg Soil Erosion Model ; (De Roo *et al.* 1996) est actuellement utilisé pour développer un modèle de transport de pesticides, complètement distribué. Il est conçu pour être utilisé à l'échelle de petits bassins versants agricoles. Ce modèle disposera d'une résolution temporelle fine à échelle événementielle et prendre en compte le transport des pesticides dans la phase particulaire. Pour le moment, il n'y a pas d'applications envisagées.

21. PASTIS

Le modèle PASTIS (Prediction of Agricultural Solute Transfer In Soils ; Lafolie, 1991) a été développé par l'INRA pour disposer d'une simulation mécaniste des transferts de masse (eau, solutés, gaz) et d'énergie (chaleur) couplés à divers processus biogéochimiques dans la zone non saturée du sol (cycle du carbone, de l'azote etc.). Il permet de quantifier les flux de masses à l'interface sol-atmosphère (eau, gaz) et vers les couches profondes (eau, solutés). Les équations du modèle sont intégrées à la plateforme de modélisation **Sol Virtuel**.

22. PEARL

Le modèle PEARL (Leistra *et al.* 2001) est un modèle mécaniste monodimensionnel décrivant les transferts d'eau et de pesticides dans l'environnement. Le modèle PEARL utilise le même formalisme que MACRO pour la simulation des flux d'eau et de solutés mais ne considère pas la double perméabilité des sols. Par contre il prend en compte le compartiment atmosphérique. Il est possible de décrire des successions de cultures via l'outil FROGS38 mais pas les situations culturales (telles que l'interculture et les résidus de récolte). Il est largement utilisé en Europe dans le cadre de l'homologation des produits phytosanitaires. Il a également été utilisé pour simuler les transferts dans différents contextes agricoles et pédoclimatiques dans plusieurs pays (France, Pays-Bas, Allemagne).

23. PESTDRAIN

Le modèle conceptuel PESTDRAIN (Branger *et al.* 2009) permet de simuler les flux d'eau et le transport de pesticides dans les zones saturées et non saturées du sol dans les zones agricoles drainées à l'échelle de la parcelle. Le modèle a été testé pour les pesticides isoproturon et diflufenicanil sur une parcelle expérimentale de la station de La Jaillière. Il n'a cependant pas encore été diffusé car encore en cours de développement.

24. PeSTICS

PeSTICS (Queyrel *et al.* 2016) est un module complémentaire du modèle STICS39 (Brisson *et al.* 1998). Il simule les transferts verticaux d'eau et de pesticides à l'échelle de la parcelle. Les équations de PeSTICS sont basées sur des formalismes de différents modèles déjà existants, essentiellement AgriFlux40 (Banton *et al.* 1993), LEACHP (Hutson *et Wagenet*, 1993) et PEARL (Leistra *et al.* 2001). Le modèle de transfert de l'eau est à réservoir et est basé sur le modèle LIXIM (Mary *et al.* 1999). Le transfert des pesticides solubles d'une couche à l'autre s'effectue par advection-dispersion, et suit le même principe que le transfert des nitrates.

25. PeSTICS-MODCOU

L'outil PeSTICS-MODCOU, en cours de conception, vise à simuler les transferts de pesticides à l'échelle d'un bassin versant de la surface du sol jusqu'à la nappe. Il résulte du chaînage du modèle PeSTICS (Queyrel *et al.* 2016 ; cf. la fiche du modèle), qui simule les transferts verticaux d'eau et de pesticides à l'échelle de la parcelle, et du modèle hydrogéologique MODCOU⁵⁹ (Ledoux *et al.* 1989), procédant au transfert passif des pesticides dans l'aquifère. Des premiers essais ont été réalisés à partir de données recueillies sur le bassin versant de l'Orgeval⁴² sur l'application de six molécules sur une durée de vingt ans. Le modèle a été appliqué sur une seule unité de simulation, ce qui revient à assimiler le bassin à une parcelle unique, supposée homogène. La dynamique et les niveaux de concentrations en pesticides simulées dans les écoulements, dans les sols ou en rivière, ont été confrontés aux mesures de terrain disponibles. Les concentrations simulées sont supérieures aux observations mais restent dans le même ordre de grandeur sur les périodes où les observations sont disponibles (Queyrel *et al.* 2014 et 2015). Cet outil permet donc d'estimer la persistance de pesticides dans le milieu souterrain, plusieurs années après leur interdiction. A terme le modèle pourrait être utilisé pour évaluer le risque de contamination des nappes que comporte l'usage de pesticides à l'échelle d'un bassin hydrographique.

26. PHYTOPIXAL

Cette méthode conçue par Macary *et al.* (2014) vise à établir un zonage du risque de contamination des eaux de surface par les pesticides utilisés en agriculture. Elle peut être appliquée à plusieurs échelles. Le calcul du risque est réalisé au départ à l'échelle d'un pixel de 30 m² à partir d'un SIG et du traitement d'images satellites. Pour obtenir une évaluation à des

⁵⁹ Le modèle distribué MODCOU a été développé par le Centre de géosciences de Mines ParisTech. Il couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de reproduire, entre autres, les débits simulés aux rivières et les niveaux piézométriques des aquifères représentés. Un module de surface assure le bilan hydrique des précipitations entre évaporation, ruissellement et infiltration et un module souterrain assure le transfert dans les formations aquifères et les échanges nappe-rivière.

échelles plus grandes, les résultats obtenus à l'échelle du pixel sont agrégés. Le croisement des différents paramètres retenus (liés au milieu et aux pratiques agricoles) se fait par la méthode des scores. Cette méthode a été appliquée pour la définition de zones prioritaires pour la mise en oeuvre d'actions pour diminuer les pollutions des masses d'eau de surface par les pesticides.

27. RPG Explorer

Le logiciel RPG Explorer (Levasseur *et al.* 2015) a été conçu pour faciliter l'exploitation des données du RPG pour les gestionnaires de territoires agricoles. Il intègre la reconstitution des séquences de cultures à partir des données spatialisées du RPG. Il permet aussi de calculer des assolements de rotation pouvant constituer des données d'entrée de modèles agronomiques. Il permet enfin de reconstituer des évolutions de parcelles d'exploitations pour mieux cerner les évolutions sur les AAC. Plus simplement RPG Explorer permet de produire des statistiques sur un territoire donné sur les assolements des exploitations. Une typologie d'exploitation peut être affectée à partir de ces assolements ou directement importée. Le territoire peut ainsi être segmenté par type d'exploitation. Cet outil est actuellement utilisé sur différentes AAC comme outil d'aide au diagnostic de l'agriculture locale (connaissance initiale ou suivi des évolutions qui peut potentiellement être relié aux programmes d'actions mis en oeuvre).

28. SACADEAU

Le modèle SACADEAU (Gascuel-Oudoux *et al.* 2009) permet de tester des scénarios de changements de pratiques agricoles en lien avec la qualité de la ressource en eau. Il associe un modèle qui simule le transfert de l'eau et des herbicides depuis l'application sur la parcelle jusqu'à l'exutoire du bassin versant et un modèle décisionnel qui permet de simuler les stratégies de désherbage en fonction des contraintes liées au traitement (exploitation, milieu et climat). Les résultats des simulations peuvent être visualisés sur SIG. Ce modèle a produit des connaissances sur les relations entre applications et qualité de l'eau, à partir de simulations sur un bassin versant en Bretagne. Les résultats de simulation sont analysés par des méthodes de fouilles de données permettant d'identifier les motifs spatiaux impliqués dans la contamination des eaux (Trepas *et al.* 2012). Des algorithmes de recommandations d'action ont été élaborés. Les développements sont de l'ordre de la recherche (Trepas *et al.* 2013).

29. SIRIS-Pesticides (Système d'Intégration des Risques par Interaction des Scores pour les pesticides)

L'outil SIRIS-Pesticides (Le Gall *et al.* 2007) permet de classer des substances actives en fonction d'un risque de contamination (note allant de 0 à 100) calculé à partir d'une méthode de calcul mobilisant des informations liées à l'usage de la molécule (à partir des quantités de produits phytosanitaires utilisées contenant la molécule) et de son comportement dans l'environnement. Une base de données, intégrée à l'outil, permet au logiciel de recueillir les informations relatives aux propriétés physico-chimiques des molécules et à la composition des produits phytosanitaires. 467 substances y sont décrites. L'outil a été utilisé pour définir les listes des molécules à rechercher dans les analyses de qualité de l'eau dans le cadre des réseaux de surveillance des masses d'eau de surface et souterraines.

30. STICS-MACRO

Un nouveau modèle, STICS-MACRO (Lammoglia *et al.* 2016), a été développé à partir d'un chaînage des modèles STICS (Brisson *et al.* 1998) et MACRO (Larsbo et Jarvis, 2003) pour évaluer *a priori* de nouveaux itinéraires techniques par rapport à leurs impacts sur la qualité des eaux et ainsi faciliter la conception de systèmes de culture. Ce modèle permet d'évaluer les flux de pesticides dans les systèmes de cultures en intégrant les pratiques agricoles et les conditions environnementales. Le modèle STICS simule le développement de la culture et fournit des variables associées au développement des cultures. Ces variables sont ensuite transmises comme données d'entrée au modèle MACRO qui fournit en sortie les flux d'eau et de pesticides dans les systèmes de culture. Cet outil est actuellement calibré à partir des mesures effectuées sur des sites expérimentaux de l'INRA où sont actuellement développés des systèmes de culture innovants. Ce modèle pourrait à terme être intégré à l'environnement de modélisation MicMac-Framework en cours de construction.

31. SWAT

Descriptif résumé et fiche de renseignement non validés.

Le modèle agro-hydrologique semi-distribué SWAT (Soil and Water Assessment Tool ; Neitsch *et al.* 2009) permet de représenter les interactions entre sol, système de culture, hydrologie et gestion des barrages à des résolutions spatiale et temporelle fines. Il inclut notamment un modèle de croissance des plantes et de rendement. Le déclenchement des opérations techniques (semis, fertilisation, phytosanitaire, récolte) par culture peut être aussi spécifié. Le bassin versant est découpé en Unités de Réponse Hydrologique (HRU) qui correspondent à des surfaces, au sein des sous-bassins, homogènes en termes de classe de sol, de pente et d'occupation du sol. Elles sont considérées avoir un comportement hydrologique homogène (ruissellement, évapotranspiration, etc.). Le modèle SWAT a été utilisé en France dans le cadre de projets de recherche pour caractériser les dynamiques de transferts de pesticides à l'échelle de bassins versants agricoles. Par exemple, Boithias (2012) a montré que ce modèle est adapté à la modélisation du transfert du S-metolachlor et du trifluralin dans les phases dissoutes et particulaires. Le modèle peut être utilisé à l'échelle de bassin versant d'une superficie comprise entre 100 et 10.000 km².

32. TyPol

L'outil TyPol (Servien *et al.* 2014) permet de classer des contaminants organiques en fonction des propriétés qui sont déterminantes dans les mécanismes responsables de leur comportement dans l'environnement, de leur passage dans les organismes vivants et de leurs effets toxicologiques. Cette classification s'opère à travers une analyse statistique. Cet outil permet donc d'extrapoler des connaissances au sein d'une classe de composés à partir des résultats obtenus sur quelques molécules. Il ne tient pas compte des conditions du milieu mais seulement des potentialités déduites des relations statistiques entre des descripteurs moléculaires et des paramètres comportementaux. Il peut être mobilisé pour évaluer *a priori* le comportement de produits de transformation de quelques pesticides.

33. WATSFAR

Le modèle mécaniste monodimensionnel WATSFAR (Crevoisier *et al.* 2009) permet de simuler les flux des transferts d'eau de surface et solutés vers les eaux souterraines. Ce modèle inclut le concept de double perméabilité (flux préférentiels). Il est actuellement mobilisé pour la construction d'un outil de simulation pour faciliter l'homologation de produits phytosanitaires dans le contexte agropédoclimatique des Départements d'Outre-Mer en France.

Annexe 2

Enquêtes auprès des Agriculteurs au niveau du caza de Zahlé

N° de l'enquête :

Nom de l'agriculteur :.....

Numéro de téléphone :.....

| |
|-------------------|
| I- Famille |
|-------------------|

A - Structures et force de travail agricole

Q1. Statut de l'exploitation :

1. chef d'exploitation individuel
2. chef d'exploitation individuel (conjoint)
3. autre (à préciser)

Q2. Age du chef d'exploitation (C.E.) _____ ans

Q3- Village:.....

Q4. Formation initiale agricole : 1- oui 2- non

Q5- Origine du chef d'exploitation

1. Commune
2. Communes voisines
3. Caza
4. Autre Caza
5. Autre Mohafaza
6. Autres

Q6- Formation générale:

- 1- Niveau primaire
- 2- Niveau secondaire
- 3- Niveau universitaire
- 4- Autres

Q7- Activité agricole du C.E.:

- 1- Plein temps
- 2- Temps partiel

Q8- Nombre de personnes à charge (inclus CE) : _____

Q9. Nombre total d'actifs agricoles familiaux (inclus CE) : _____

II- Structures foncières

Q10- Date du début de l'activité agricole :

Q11- Mode d'acquisition du noyau initial de l'exploitation :

1. héritage
2. héritage collectif
3. achat
4. Location
5. Bail Oral
6. mixte
7. autre (préciser) :

Q12- Superficie du noyau initial de l'exploitation : dn

Q13- La surface agricole utile totale (SAU)dn

Q14- Surface en jachères : dn

Q15- SAU irriguée dn

Q16- SAU qui peut être irriguée dn

Q17- Surface en friches (non cultivée et hors SAU) : dn

Q18- Avez-vous des serres ? 1- Oui 2- Non

Q19 A- Si Oui, combien de serres vous possédez ?

Q19 B- Quelles type de culture vous cultivez dans les serres ?

| Nombre des parcelles | Type de cultures |
|----------------------|------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Q20- Où se situent les terres en friches:

- 1- Sur la commune

-
-
- 2- Sur une autre commune
 - 3- Dans un autre Caza
 - 4- Dans un autre Mohafazat

Q21- SAU en faire valoir direct : dn

Q22- SAU en faire valoir indirect: dn

a- SAU MDFI : Métayage : dn

b- SAU MDFI : Fermage : dn

Q23- S'il y a eu agrandissement, par quel moyen et de quelle superficie :

1. Achat dn
2. Prise en métayage ou locationdn
3. héritagedn
4. aménagement foncier / remembrementdn
5. autredn
6. Bail oral

Q24- S'il y a eu une réduction, de quelle façon et de combien :

1. vente dn
2. mise métayage ou location dn
3. mise en friche dn
4. utilisation non agricole dn
5. cessation à famille dn
6. autredn
7. pas de réduction

Parcelles que vous possédez ?

Q26-

| Numéro de la parcelle | Cultures | Types de sol | Localisation de la parcelle (a) | Accès à l'eau |
|-----------------------|----------|--------------|---------------------------------|---------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Q27- Localisation sur la carte ?

III- Production végétale et charges

Q28-

| Numéro de parcelle | Type de culture | Surface (dn) | Production (kg/dn) | Main d'œuvre engagé par culture | | Rotation de culture (oui / non) Si oui, préciser les cultures | Date d'installation | Date de récolte |
|--------------------|-----------------|--------------|--------------------|---------------------------------|------------|--|---------------------|-----------------|
| | | | | Nb MO | Nb de jour | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | 1 | | |
| | | | | | | 2 | | |
| | | | | | | 3 | | |
| | | | | | | 4 | | |
| | | | | | | 1 | | |
| | | | | | | 2 | | |
| | | | | | | 3 | | |
| | | | | | | 4 | | |

Q29- Charges :

A- Irrigation :

| Numéro de parcelle | Culture | Quantité de l'eau d'irrigué (m3/dn) | Origine de l'eau (a) | Système d'irrigation (b) | Période d'irrigation | Cout de l'eau estimé (L.L./dn) | Moment d'utilisation de l'eau |
|---------------------------|----------------|--|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

a- (1): Lac;

(2): Canal;

(3): Puit;

(4): Autre

b- (1): Submersion;

(2): Aspersions;

(3): Goutte à goutte

(4): Autre

B- Input :

| Type | Culture 1 Kg/dn (1) | Prix (L.L.)/kg (2) | Total (L.L.) (1)*(2) | Culture 2 Kg/dn (3) | Prix (L.P.) (4) | Total (L.L.) (3)*(4) | Culture 3 Kg/dn (5) | Prix (L.L.)/Kg (6) | Total (L.L.) (5)*(6) | Total (L.L.) (1*2) + (3*4) + (5*6) |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| Graines | | | | | | | | | | |
| Plantes | | | | | | | | | | |
| Préparation de la terre | | | | | | | | | | |
| Fuels | | | | | | | | | | |
| Lubrifiants | | | | | | | | | | |
| Location d'équipement | | | | | | | | | | |
| Autres dépenses | | | | | | | | | | |

| Type | Culture 4 Kg/dn (1) | Prix (L.L.)/kg (2) | Total (L.L.) (1)*(2) | Culture 5 Kg/dn (3) | Prix (L.P.) (4) | Total (L.L.) (3)*(4) | Culture 6 Kg/dn (5) | Prix (L.L.)/Kg (6) | Total (L.L.) (5)*(6) | Total (L.L.) (1*2) + (3*4) + (5*6) |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|---|
| Graines | | | | | | | | | | |
| Plantes | | | | | | | | | | |
| Préparation de la terre | | | | | | | | | | |
| Fuels | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Lubrifiants | | | | | | | | | | |
| Location d'équipement | | | | | | | | | | |
| Autres dépenses | | | | | | | | | | |

B- Pesticides et Fertilisants

B1- Pesticides :

| | Culture 1 Parcelle : | Culture 2 Parcelle : | Culture 3 Parcelle : | Culture 4 Parcelle : | Culture 5 Parcelle : | Culture 6 Parcelle : |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <u>Nom commerciale du produit 1</u> | | | | | | |
| Type du produit (herbicides, fongicides, insecticides, molluscicide...) | | | | | | |
| Matières actives et la concentration | | | | | | |
| Cible | | | | | | |
| Saison appliqué | | | | | | |
| Type d'application (a) | | | | | | |
| Date de traitement | | | | | | |
| Profondeur (m) | | | | | | |

| | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Quantité appliqué (kg/dn) | | | | | | |
| Nombre de passage | | | | | | |
| Prix (L.L./Kg) ou (L.L./L) | | | | | | |

(a) – 1 : Injection, 2 : incorporé au sol, 3 : sur la surface du sol, 4 : sur la couverture végétale

| | Culture 1 Parcelle : | Culture 2 Parcelle : | Culture 3 Parcelle : | Culture 4 Parcelle : | Culture 5 Parcelle : | Culture 6 Parcelle : |
|--|---|---|---|---|---|---|
| <u>Nom commerciale du produit 2</u> | | | | | | |
| Type du produit (Herbicide, fongicides, insecticides, molluscicide...) | | | | | | |
| Matières actives et la concentration | | | | | | |
| Cible | | | | | | |
| Saison appliqué | | | | | | |
| Type d'application (a) | | | | | | |
| Date de traitement | | | | | | |
| Profondeur (m) | | | | | | |
| Quantité appliqué (kg/dn) | | | | | | |
| Nombre de passage | | | | | | |

| | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Prix (L.L./Kg) ou (L.L./L) | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|

(a) – 1 : Injection, 2 : incorporé au sol, 3 : sur la surface du sol, 4 : sur la couverture végétale

| | Culture 1 Parcelle : | Culture 2 Parcelle : | Culture 3 Parcelle : | Culture 4 Parcelle : | Culture 5 Parcelle : | Culture 6 Parcelle : |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <u>Nom commerciale du produit 3</u> | | | | | | |
| Type du produit (Herbicide, fongicides, insecticides, molluscicide...) | | | | | | |
| Matières actives et la concentration | | | | | | |
| Cible | | | | | | |
| Saison appliqué | | | | | | |
| Type d'application (a) | | | | | | |
| Date de traitement | | | | | | |
| Profondeur (m) | | | | | | |
| Quantité appliqué (kg/dn) | | | | | | |
| Nombre de passage | | | | | | |
| Prix (L.L./Kg) ou (L.L./L) | | | | | | |

(a) – 1 : Injection, 2 : incorporé au sol, 3 : sur la surface du sol, 4 : sur la couverture végétale

B2- Engrais :

| | Culture 1 Parcelle : | Culture 2 Parcelle : | Culture 3 Parcelle : | Culture 4 Parcelle : | Culture 5 Parcelle : | Culture 6 Parcelle : |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <u>Nom du produit 1</u> | | | | | | |
| Type du produit (liquide, granules) | | | | | | |
| Engrais minéral ou organique ? | | | | | | |
| Formulation | | | | | | |
| Saison appliqué | | | | | | |
| Type d'application (a) | | | | | | |
| Date de traitement | | | | | | |
| Profondeur (m) | | | | | | |
| Quantité appliqué (kg/dn) | | | | | | |
| Nombre de passage | | | | | | |
| Prix (L.L./Kg) ou (L.L./L) | | | | | | |

(a) – 1 : Injection, 2 : incorporé au sol, 3 : sur la surface du sol, 4 : sur la couverture végétale

| | Culture 1 Parcelle : | Culture 2 Parcelle : | Culture 3 Parcelle : | Culture 4 Parcelle : | Culture 5 Parcelle : | Culture 6 Parcelle : |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <u>Nom du produit 2</u> | | | | | | |
| Type du produit (liquide, granules) | | | | | | |

| | | | | | | |
|--------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Engrais minéral ou organique ? | | | | | | |
| Formulation | | | | | | |
| Saison appliqué | | | | | | |
| Type d'application (a) | | | | | | |
| Date de traitement | | | | | | |
| Profondeur (m) | | | | | | |
| Quantité appliqué (kg/dn) | | | | | | |
| Nombre de passage | | | | | | |
| Prix (L.L./Kg) ou (L.L./L) | | | | | | |

(a) – 1 : Injection, 2 : incorporé au sol, 3 : sur la surface du sol, 4 : sur la couverture végétale

| | Culture 1 Parcelle : | Culture 2 Parcelle : | Culture 3 Parcelle : | Culture 4 Parcelle : | Culture 5 Parcelle : | Culture 6 Parcelle : |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Nom du produit 3 | | | | | | |
| Type du produit (liquide, granules) | | | | | | |
| Engrais minéral ou organique ? | | | | | | |
| Formulation | | | | | | |
| Saison appliqué | | | | | | |
| Type d'application (a) | | | | | | |
| Date de traitement | | | | | | |
| Profondeur (m) | | | | | | |

| | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| Quantité appliquée (kg/dn) | | | | | | |
| Nombre de passage | | | | | | |
| Prix (L.L./Kg) ou (L.L./L) | | | | | | |

(a) – 1 : Injection, 2 : incorporé au sol, 3 : sur la surface du sol, 4 : sur la couverture végétale

III- Production animale et charges

Q30- Avez-vous de la production animale : 1- Oui 2-Non

Q31- Si oui, quel le but de cette production: 1- Autoconsommation 2- Commercialisation

Q32-

| | Nombre de têtes | Nom du produit desherbage | Saison appliquée | Type d'application (a) | Date de traitement | Profondeur (m) | Quantité appliqué (kg/dn) |
|--------------|-----------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|------------------------------|
| Ovin | | | | | | | |
| Caprin | | | | | | | |
| Bovin lait | | | | | | | |
| Bovin viande | | | | | | | |

IV- Moyen de production

Q33- Combien de tracteur vous possédez :.....

Q34- Avez-vous une machine de traite ? 1- oui 2- non

Q35- Avez-vous un pulvérisateur ? 1- oui 2- non

Q36- Main d'œuvre :

A- Coût de la main d'œuvre salariale permanente : (1*2)=

1- Nombre de main d'œuvre salariale permanente :

2- Prix mensuel/ personne :

B- Coût de la main d'œuvre salariale occasionnelle : (1*2)

1- Nombre de la main d'œuvre salariale occasionnelle (inclus main d'œuvre pour l'irrigation occasionnelle) :.....

2- Nombre de jour de travail/an :

C- Origine de la main d'œuvre occasionnelle :

1- Commune ou commune voisine

2- Autre région

3- Etranger

V- Concernant la question des produits phytosanitaires

Q37- Bénéficiez-vous de l'appui d'un conseil agricole concernant l'utilisation des produits phytosanitaires?

1- oui 2- non

Q38- si oui de quel organisme

1- ONG

2- Centre agricole de Zahlé

3- Chambre d'agriculture Zahlé

4- coopérative

5- autre

Q39- Vous lisez l'étiquette du produit ? 1- oui 2- Non

Q40- Comment vous savez la quantité appliquée d'un produit ? -----

Q41- Vous utilisez les produits phytosanitaires d'une manière :

1- Systématique 2- Préventive 3- Raisonnée

Q42- Vous avez un programme d'application des produits phytosanitaires ?

1- Oui 2- Non

Q43- Vous savez comment mélanger le produit phytosanitaire ? 1- Oui 2- Non

Q44- D'où vous achetez les produits phytosanitaires ?

Q45- Est-ce qu'il y aura lieu des formations qui traitent la question des produits phytosanitaires ?

1- Oui 2- Non

Q46- Si oui, est ce que vous assister à ce type de formation ? 1- Oui 2- Non

Annexe 3

Plan d'échantillonnage

1. Groupe I

- Système d'orientation agricole: Viticulture et Oléiculture
- Village: Ali Nahri, Majdel Anjar, Mreijet et Nasryet Rizk
- Nombre total des exploitations : 435 exploitations (agriculteurs)

| Groupe de surface (dn) | Nombre d'exploitations | Echantillonnage (10%) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|
| [0.4-3] | 195 | 19 |
|]3-25] | 176 | 17 |
|]25-100] | 43 | 4 |
| <u>>100</u> | <u>21</u> | <u>2</u> |

Total a enquêté : 42 Agriculteurs

2. Groupe II

- Système d'orientation agricole : Maraichage et culture industrielle
- Village : Choubruket tabet, Chtoura, Houch Mandara, Houch Kaysar, Houch Ghanam, Jdita, Kfarzabadd, Qabb Elias, Riyak, Saadnayel, Tcheflik Quinano, Terbol et Zahlé
- Nombre total des exploitations : 1133 exploitations (agriculteurs)

| Groupe de surface (dn) | Nombre d'exploitations | Echantillonnage (10%) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|
| [0.5-13] | 449 | 44 |
|]13-40] | 316 | 31 |
|]40-150] | 240 | 24 |
| >150 | 127 | 12 |

Total a enquêté : 111 Agriculteurs

3. Groupe III

- Système d'orientation agricole : Céréaliculture
- Village : Bar Elias, Dalhamyet, Hoshmash, Makse, Nasryet Zahlé, Taanayel, Tal Akhdar et Zahlé Aradi
- Nombre total des exploitations : 389 exploitations (Agriculteurs)

| Groupe de surface (dn) | Nombre d'exploitations | Echantillonnage (10%) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|
| [0.1-15] | 85 | 8 |
|]15-50] | 81 | 8 |
|]50-200] | 137 | 13 |
|]200-1000] | 70 | 7 |
| >1000 | 15 | 1 |

Total a enquêté : 37 Agriculteurs

4. Groupe IV

- Système d'orientation agricole : Arboriculture
- Village : Anjar, Ain Kafarzabad, Boueirj, Deir Ghazal, Hezerta, Ksara, Massa, Quadi Arayech, Qaa El Rim, Qousaya, Raait et Taalbaya
- Nombre total des exploitations : 1203 exploitations (Agriculteurs)

| Groupe de surface (dn) | Nombre d'exploitations | Echantillonnage (10%) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|
| [0.1-10] | 643 | 64 |
|]10-20] | 251 | 25 |
|]20-70] | 253 | 25 |
| >70 | 47 | 4 |

Total a enquêté : 118 Agriculteurs

5. Groupe V

- Système d'orientation agricole : Viticulture
- Village : Ablah, Fourzol, Nabi Ayla, Niha Zahle, Zahle Karak Nouh et Touaite.
- Nombre total des exploitations : 822 exploitations (Agriculteurs)

| Groupe de surface (dn) | Nombre d'exploitations | Echantillonnage (10%) |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| [1-13] | 352 | 35 |
|]13-40] | 284 | 28 |
|]40-150] | 138 | 13 |
| >150 | 47 | 4 |

Total a enquêté : 80 Agriculteurs

Annexe 4

Les valeurs des IFT par culture et par région

| Culture_Village | Village | Surface (dn) | IFT H tot | IFT HH tot | IFT tot |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------|
| PT_Barr Elias | Barr Elias | 380 | 2.15 | 13.56 | 15.71 |
| PT_Choubryet Tabet | Choubryet Tabet | 70 | 2.12 | 14.31 | 16.43 |
| PT_Chtoura | Chtoura | 107 | 2.14 | 14.14 | 16.28 |
| PT_Dalhamyet | Dalhamyet | 130 | 2.31 | 13.98 | 16.28 |
| PT_Forzol | Forzol | 185 | 2.27 | 13.92 | 16.18 |
| PT_Hosh Kaysar | Hosh Kaysar | 150 | 2.12 | 14.20 | 16.31 |
| PT_Hoshmosh | Hoshmosh | 700 | 2.27 | 14.44 | 16.71 |
| PT_Jdita | Jdita | 30 | 2.06 | 14.69 | 16.75 |
| PT_Kafarzabad | Kafarzabad | 331 | 2.24 | 18.30 | 20.54 |
| PT_Maalaka | Maalaka | 165 | 2.24 | 12.97 | 15.21 |
| PT_Massa | Massa | 10 | 2.32 | 14.22 | 16.54 |
| PT_Nabi Ayla | Nabi Ayla | 355 | 2.34 | 6.38 | 8.72 |
| PT_Nasryet Rizk | Nasryet Rizk | 50 | 2.30 | 14.00 | 16.30 |
| PT_Quab Elias | Qabb Elias | 331 | 2.17 | 14.09 | 16.27 |
| PT_Rait | Rait | 340 | 2.22 | 14.93 | 17.15 |
| PT_Ryak | Ryak | 45 | 2.12 | 14.26 | 16.39 |
| PT_Saadnayel | Saadnayel | 131 | 2.33 | 14.38 | 16.71 |
| PT_Taalbaya | Taalbaya | 80 | 2.10 | 16.20 | 18.30 |
| PT_Taanayel | Taanayel | 102 | 2.10 | 15.53 | 17.62 |
| PT_Tall Al Akhdar | Tal Alakhdar | 340 | 2.30 | 13.13 | 15.43 |
| PT_Terbol | Terbol | 455 | 2.22 | 13.49 | 15.71 |
| PT_Zahle | Zahle | 3020 | 2.30 | 16.12 | 18.42 |
| PT_Zahle Aradi | Zahle Aradi | 135 | 2.15 | 14.28 | 16.44 |
| Raisin_Ablah | Ablah | 255 | 2.27 | 15.43 | 17.70 |
| Raisin_Barr Elias | Barr Elias | 12 | 2.21 | 15.97 | 18.18 |
| Raisin_Boueirej | Boueirej | 7 | 2.20 | 15.71 | 17.90 |
| Raisin_Deir Ghazal | Deir Ghazal | 32 | 2.11 | 13.48 | 15.60 |
| Raisin_Forzol | Forzol | 1051 | 2.20 | 14.95 | 17.15 |
| Raisin_Hezerta | Hezerta | 21 | 2.15 | 16.10 | 18.26 |
| Raisin_Kafarzabad | Kafarzabad | 36 | 2.12 | 14.95 | 17.07 |
| Raisin_Ksara | Ksara | 100 | 2.10 | 8.90 | 11.00 |
| Raisin_Maalaka | Maalaka | 504 | 2.22 | 15.34 | 17.56 |
| Raisin_Majdal Anjar | Majdal Anjar | 109 | 2.19 | 15.26 | 17.45 |
| Raisin_Massa | Massa | 150 | 2.31 | 15.11 | 17.42 |
| Raisin_Nabi Ayla | Nabi Ayla | 114 | 2.16 | 14.15 | 16.30 |
| Raisin_Nasryet Zahle | Nasryet Zahle | 130 | 2.19 | 15.81 | 18.01 |

| | | | | | |
|-------------------------------|-----------------|--------|------|-------|-------|
| Raisin_Niha | Niha | 173 | 2.16 | 13.80 | 15.96 |
| Raisin_Qaa El Rim | Qaa El Rim | 52 | 2.15 | 18.68 | 20.83 |
| Raisin_Qabb Elias | Qabb Elias | 40 | 2.18 | 18.26 | 20.44 |
| Raisin_Saadnayel | Saadnayel | 7 | 2.14 | 18.36 | 20.50 |
| Raisin_Taalbaya | Taalbaya | 52 | 2.26 | 19.18 | 21.45 |
| Raisin_Terbol | Terbol | 13 | 2.21 | 16.16 | 18.37 |
| Raisin_Toueite | Toueite | 145 | 2.15 | 18.27 | 20.43 |
| Raisin_Wadi El Arayech | Wadi Arayech | 6 | 2.16 | 14.04 | 16.19 |
| Raisin_Zahle | Zahle | 1806 | 2.21 | 17.54 | 19.75 |
| Prune_Ainkafarzabad | Ainkafarzabad | 12.5 | 1.50 | 9.60 | 11.10 |
| Prune_Anjar | Anjar | 85 | 1.63 | 9.92 | 11.55 |
| Prune_Boueirej | Boueirej | 11 | 1.61 | 10.27 | 11.88 |
| Prune_Deir Ghazal | Deir Ghazal | 3 | 1.61 | 10.79 | 12.40 |
| Prune_Hezerta | Hezarta | 3 | 1.50 | 9.83 | 11.33 |
| Prune_Jdita | Jdita | 12 | 1.56 | 10.74 | 12.30 |
| Prune_Kafarzabad | Kafarzabad | 2 | 1.60 | 9.50 | 11.10 |
| Prune_Qaa El Rim | Qaa El Rim | 2 | 1.66 | 9.83 | 11.48 |
| Prune_Qabb Elias | Qabb Elias | 44 | 1.64 | 10.27 | 11.91 |
| Prune_Saadnayel | Saadnayel | 30 | 1.50 | 10.60 | 12.10 |
| Prune_Taalbaya | Taalbaya | 2 | 1.58 | 10.29 | 11.87 |
| Prune_Wadi Al Arayech | Wadi Al Arayech | 3 | 1.66 | 10.64 | 12.30 |
| Salade_Anjar | Anjar | 28 | 0.37 | 4.72 | 5.09 |
| Salade_Barr Elias | Barr Elias | 152.5 | 0.37 | 4.76 | 5.13 |
| Salade_Dalhamyet | Dalhamyet | 290 | 0.50 | 3.85 | 4.35 |
| Salade_Kafarzabad | Kafarzabad | 50.25 | 0.54 | 4.56 | 5.10 |
| Salade_Maalaka | Maalaka | 120 | 0.46 | 4.12 | 4.58 |
| Salade_Qabb Elias | Qabb Elias | 109.25 | 0.35 | 5.24 | 5.59 |
| Salade_Saadnayel | Saadnayel | 255 | 0.36 | 4.66 | 5.02 |
| Salade_Taanayel | Taanayel | 21 | 0.36 | 4.56 | 4.92 |
| Salade_Tall Akhdar | Tall Akhdar | 50 | 0.32 | 3.86 | 4.18 |
| Salade_Terbol | Terbol | 35 | 0.52 | 4.30 | 4.83 |
| Salade_Zahle | Zahle | 5 | 0.34 | 4.54 | 4.88 |
| Blé_Ainkafarzabad | Ain Kfarzabad | 12 | 1.40 | 1.00 | 2.40 |
| Blé_Barr Elias | Barr Elias | 445 | 1.49 | 0.53 | 2.03 |
| Blé_Chtoura | Chtoura | 80 | 1.45 | 0.59 | 2.05 |
| Blé_Forzol | Forzol | 150 | 1.40 | 0.67 | 2.07 |
| Blé_Hosh Ghanam | Hosh Ghanam | 60 | 1.50 | 0.60 | 2.10 |
| Blé_Hoshmosh | Hoshmosh | 750 | 1.42 | 0.53 | 1.96 |
| Blé_Kafarzabad | Kafarzabad | 17 | 1.46 | 0.67 | 2.14 |
| Blé_Maalaka | Maalaka | 200 | 1.40 | 0.53 | 1.93 |
| Blé_Massa | Massa | 585 | 1.46 | 0.79 | 2.26 |

| | | | | | |
|-------------------------------|-----------------|------|------|------|-------|
| Blé_Nasryet Rizk | Nasryet Rizk | 95 | 1.44 | 0.97 | 2.41 |
| Blé_Qabb Elias | Qabb Elias | 72 | 1.42 | 0.60 | 2.02 |
| Blé_Rait | Rait | 30 | 1.50 | 0.50 | 2.00 |
| Blé_Ryak | Ryak | 5 | 1.43 | 1.00 | 2.43 |
| Blé_Saadnayel | Saadnayel | 10 | 1.42 | 0.50 | 1.92 |
| Blé_Taanayel | Taanayel | 360 | 1.50 | 0.63 | 2.12 |
| Blé_Tall Akhdar | Tall Akhdar | 180 | 1.40 | 0.50 | 1.90 |
| Blé_Terbol | Terbol | 675 | 1.43 | 0.73 | 2.16 |
| Blé_Zahle | Zahle | 7 | 1.44 | 0.50 | 1.94 |
| Orge_Forzol | Forzol | 30 | 1.30 | 1.00 | 2.30 |
| Orge_Kafarzabad | Kafarzabad | 2 | 1.40 | 1.10 | 2.50 |
| Orge_Maalaka | Maalaka | 50 | 1.43 | 1.00 | 2.43 |
| Orge_Nasryet Rizk | Nasryet Rizk | 10 | 1.35 | 0.50 | 1.85 |
| Orge_Qabb Elias | Qabb Elias | 57 | 1.52 | 0.70 | 2.22 |
| Orge_Taanayel | Taanayel | 21 | 1.43 | 1.00 | 2.43 |
| Orge_Terbol | Terbol | 50 | 1.56 | 0.70 | 2.26 |
| Oignon_Barr Elias | Barr Elias | 100 | 1.90 | 8.45 | 10.35 |
| Oignon_Choubryet Tabet | Choubryet Tabet | 140 | 1.98 | 7.23 | 9.21 |
| Oignon_Chtoura | Chtoura | 6 | 1.90 | 8.23 | 10.13 |
| Oignon_Maalaka | Maalaka | 40 | 1.98 | 6.34 | 8.32 |
| Oignon_Nabi Ayla | Nabi Ayla | 50 | 1.65 | 7.10 | 8.75 |
| Oignon_Ryak | Ryak | 10 | 1.56 | 6.34 | 7.90 |
| Oignon_Taanayel | Taanayel | 9 | 1.45 | 7.23 | 8.68 |
| Oignon_Terbol | Terbol | 200 | 1.45 | 8.10 | 9.55 |
| Mais_Kafarzabad | Kafarzabad | 40 | 1.51 | 0.45 | 1.96 |
| Mais_Maalaka | Maalaka | 235 | 1.76 | 0.56 | 2.32 |
| Mais_Nasryet Rizk | Nasryet Rizk | 10 | 1.89 | 0.23 | 2.12 |
| Mais_Qab Elias | Qab Elias | 46 | 1.75 | 0.33 | 2.09 |
| Mais_Saadnayel | Saadnayel | 30 | 1.60 | 0.38 | 1.98 |
| Mais_Terbol | Terbol | 50 | 1.65 | 0.45 | 2.10 |
| Ail_Barr Elias | Barr Elias | 80 | 1.83 | 8.32 | 10.15 |
| Ail_Maalaka | Maalaka | 20 | 1.76 | 7.34 | 9.10 |
| Aubergine_Anjar | Anjar | 44 | | | 4.37 |
| Aubergine_Barr Elias | Barr Elias | 5 | | | 4.34 |
| Aubergine_Jdita | Jdita | 7 | | | 4.23 |
| Aubergine_Taanayel | Taanayel | 3 | | | 4.56 |
| Cerisier_Ablah | Ablah | 13 | 0.95 | 8.84 | 9.79 |
| Cerisier_Ain Kfarzabad | Ain Kfarzabad | 37.5 | 0.94 | 7.15 | 8.09 |
| Cerisier_Anjar | Anjar | 89 | 1.06 | 6.81 | 7.86 |
| Cerisier_Boueirej | Boueirej | 101 | 0.98 | 7.63 | 8.62 |
| Cerisier_Deir Ghazal | Deir Ghazal | 85 | 0.90 | 7.02 | 7.92 |

| | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|------|------|-------|-------|
| Cerisier_Forzol | Forzol | 241 | 0.82 | 8.13 | 8.96 |
| Cerisier_Hezarta | Hezarta | 69 | 0.95 | 7.52 | 8.47 |
| Cerisier_Maalaka | Maalaka | 12 | 1.10 | 6.35 | 7.45 |
| Cerisier_Massa | Massa | 22 | 0.80 | 6.70 | 7.50 |
| Cerisier_Naby Ayla | Naby Ayla | 62 | 1.06 | 7.91 | 8.98 |
| Cerisier_Qaa El Rim | Qaa El Rim | 182 | 0.87 | 7.69 | 8.56 |
| Cerisier_Rait | Rait | 50 | 0.91 | 6.54 | 7.45 |
| Cerisier_Taalbaya | Taalbaya | 163 | 0.96 | 7.89 | 8.85 |
| Cerisier_Toueite | Toueite | 30 | 1.03 | 6.87 | 7.90 |
| Cerisier_Wadi Al Arayech | Wadi Al Arayech | 65 | 0.94 | 7.68 | 8.62 |
| Olivier_Ain Kfarzabad | Ain Kfarzabad | 19.5 | | | 4.48 |
| Olivier_Boueirej | Boueirej | 6 | | | 3.90 |
| Olivier_Deir Ghazal | Deir Ghazal | 5 | | | 4.00 |
| Olivier_Forzol | Forzol | 300 | | | 4.65 |
| Olivier_Ksara | Ksara | 1.3 | | | 3.67 |
| Olivier_Majdal Anjar | Majdal Anjar | 48 | | | 4.39 |
| Olivier_Naby Ayla | Naby Ayla | 7 | | | 4.57 |
| Olivier_Nasryet Rizk | Nasryet Rizk | 20 | | | 4.50 |
| Olivier_Qaa El Rim | Qaa El Rim | 2 | | | 4.30 |
| Olivier_Taalabaya | Taalabaya | 2 | | | 3.70 |
| Olivier_Terbol | Terbol | 6 | | | 4.10 |
| Abricot_Ain Kfarzabad | Ain Kfarzabad | 12.5 | 1.11 | 10.09 | 11.20 |
| Abricot_Niha | Niha | 3 | 1.12 | 10.98 | 12.10 |
| Abricot_Qaa El Rim | Qaa El Rim | 31 | 1.17 | 10.75 | 11.92 |
| Abricot_Taalbaya | Taalbaya | 26 | 1.18 | 10.62 | 11.80 |
| Abricot_Wadi Al Arayech | Wadi Al Arayech | 1 | 1.43 | 10.47 | 11.90 |
| Amandier_Boueirej | Boueirej | 12 | | | 6.91 |
| Amandier_Deir Ghazal | Deir Ghazal | 80 | | | 6.79 |
| Amandier_Forzol | Forzol | 6 | | | 6.67 |
| Amandier_Ksara | Ksara | 12 | | | 6.70 |
| Amandier_Massa | Massa | 5 | | | 6.86 |
| Amandier_Naby Ayla | Naby Ayla | 35 | | | 6.55 |
| Amandier_Niha | Niha | 98 | | | 6.72 |
| Amandier_Toueite | Toueite | 40 | | | 7.20 |
| Amandier_Wadi Arayech | Wadi Arayech | 13 | | | 6.62 |
| Carotte_Maalaka | Maalaka | 44 | 3.05 | 6.21 | 9.27 |
| Carotte_Saadnayel | Saadnayel | 5 | 3.00 | 6.30 | 9.30 |
| Carotte_Terbol | Terbol | 40 | 3.11 | 6.65 | 9.76 |
| Avoine_Forzol | Forzol | 30 | | | 1.20 |

| | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|-------|------|-------|-------|
| Avoine_Maalaka | Maalaka | 10 | | | 1.20 |
| Avoine_Nasryet Rizk | Nasryet Rizk | 25 | | | 1.25 |
| Avoine_Qabb Elias | Avoine Qabb Elias | 50 | | | 1.34 |
| Pois Vert_Barr Elias | Barr Elias | 2 | 1.32 | 2.98 | 4.30 |
| Pois Vert_Kafarzabad | Kafarzabad | 13 | 1.35 | 2.68 | 4.03 |
| Pois Vert_Maalaka | Maalaka | 20 | 1.42 | 2.79 | 4.21 |
| Pois Vert_Qabb Elias | Qabb Elias | 13 | 1.34 | 2.70 | 4.04 |
| Pois Vert_Saadnayel | Saadnayel | 13 | 1.39 | 2.79 | 4.18 |
| Pois Vert_Zahle | Zahle | 11 | 1.45 | 3.09 | 4.54 |
| MelPas_Dalhamyet | Dalhamyet | 2 | 0.37 | 6.96 | 7.33 |
| MelPas_Forzol | Forzol | 10 | 0.43 | 6.24 | 6.67 |
| MelPas_Ksara | Ksara | 0.4 | 0.30 | 10.70 | 11.00 |
| MelPas_Rait | Rait | 2 | 0.35 | 5.32 | 5.67 |
| MelPas_Tall Akhdar | Tall Akhdar | 50 | 0.34 | 9.26 | 9.60 |
| MelPas_Terbol | Terbol | 50 | 0.40 | 6.90 | 7.30 |
| Concombre_Barr Elias | Barr Elias | 30 | 1.32 | 13.68 | 15.00 |
| Concombre_Forzol | Forzol | 10 | 1.18 | 11.66 | 12.83 |
| Concombre_Ksara | Ksara | 0.4 | 0.76 | 9.13 | 9.89 |
| Concombre_Maalaka | Maalaka | 135 | 1.09 | 10.93 | 12.02 |
| Concombre_Qabb Elias | Qabb Elias | 5 | 1.32 | 12.68 | 14.00 |
| Concombre_Rait | Rait | 50 | 1.21 | 11.23 | 12.44 |
| Concombre_Ryak | Ryak | 20 | 1.10 | 10.90 | 12.00 |
| Concombre_Taanayel | Taanayel | 20 | 1.11 | 12.19 | 13.30 |
| Concombre_Terbol | Terbol | 105 | 1.20 | 11.30 | 12.51 |
| Tomate_Anjar | Anjar | 74 | 1.37 | 13.46 | 14.83 |
| Tomate_Barr Elias | Barr Elias | 28 | 1.33 | 12.89 | 14.22 |
| Tomate_Dalhamyet | Dalhamyet | 3 | 1.21 | 10.79 | 12.00 |
| Tomate_Forzole | Forzole | 52 | 1.37 | 12.11 | 13.48 |
| Tomate_Hosh Kaysar | Hosh Kaysar | 20 | 1.11 | 12.89 | 14.00 |
| Tomate_Jdita | Jdita | 10 | 1.10 | 11.30 | 12.40 |
| Tomate_Kafarzabad | Kafarzabad | 12 | 1.23 | 12.12 | 13.35 |
| Tomate_Ksara | Ksara | 0.4 | 0.87 | 8.13 | 9.00 |
| Tomate_Maalaka | Maalaka | 5 | 0.87 | 10.13 | 11.00 |
| Tomate_Qabb Elias | Qabb Elias | 46 | 1.22 | 11.62 | 12.84 |
| Tomate_Saadnayel | Saadnayel | 3 | 1.32 | 12.68 | 14.00 |
| Tomate_Terbol | Terbol | 112 | 1.70 | 16.10 | 17.81 |
| Persil_Barr Elias | Barr Elias | 10 | 0.00 | 1.88 | 1.88 |
| Persil_Dalhamyet | Dalhamyet | 5 | | 2.30 | 2.30 |
| Persil_Kafarzabad | Kafarzabad | 40.25 | | 2.28 | 2.28 |
| Persil_Maalaka | Maalaka | 10 | | 2.60 | 2.60 |
| Persil_Qabb Elias | Qabb Elias | 40.25 | | 2.29 | 2.29 |

| | | | | | |
|----------------------------|-------------|------|------|-------|-------|
| Persil_Qabb Elias | Qabb Elias | 30 | | 2.63 | 2.63 |
| Choux_Barr Elias | Barr Elias | 40 | 0.52 | 4.81 | 5.32 |
| Choux_Kafarzabad | Kafarzabad | 202 | 0.57 | 8.11 | 8.68 |
| Choux_Maalaka | Maalaka | 10 | 0.43 | 7.34 | 7.77 |
| Choux_Qaab Elias | Qaab Elias | 252 | 0.43 | 5.08 | 5.51 |
| Choux_Saadnayel | Saadnayel | 100 | 0.60 | 4.06 | 4.65 |
| Laitue_Barr Elias | Barr Elias | 12 | 0.31 | 4.35 | 4.66 |
| Laitue_Hosmosh | Hosmosh | 85 | 0.31 | 6.56 | 6.86 |
| Laitue_Kafarzabad | Kafarzabad | 146 | 0.22 | 4.20 | 4.42 |
| Laitue_Maalaka | Maalaka | 50 | 0.30 | 5.63 | 5.93 |
| Laitue_Nabi Ayla | Nabi Ayla | 20 | 0.21 | 4.79 | 5.00 |
| Laitue_Qabb Elias | Qabb Elias | 146 | 0.24 | 5.66 | 5.90 |
| Laitue_Ryak | Ryak | 10 | 0.23 | 5.77 | 10.00 |
| Laitue_Saadnayel | Saadnayel | 80 | 0.29 | 6.03 | 6.32 |
| Laitue_Terbol | Terbol | 100 | 0.30 | 7.03 | 7.33 |
| LV_Barr Elias | Barr Elias | 25.5 | 0.24 | 11.80 | 12.04 |
| LV_Dalhamyet | Dalhamyet | 50 | 0.43 | 5.87 | 6.30 |
| LV_Kafarzabad | Kafarzabad | 62.5 | 0.26 | 5.17 | 5.43 |
| LV_Maalaka | Maalaka | 23 | 0.32 | 4.97 | 5.29 |
| LV_Massa | Massa | 40 | 0.12 | 3.08 | 3.20 |
| LV_Qabb Elias | Qabb Elias | 64.5 | 0.23 | 4.81 | 5.04 |
| LV_Rait | Rait | 43 | 0.31 | 4.43 | 4.74 |
| LV_Saadnayel | Saadnayel | 55 | 0.26 | 10.93 | 11.19 |
| LV_Zahle | Zahle | 15 | 0.23 | 5.11 | 5.34 |
| Peche_Anjar | Anjar | 35 | 1.74 | 15.94 | 20.68 |
| Peche_Barr Elias | Barr Elias | 10 | 1.65 | 17.35 | 19.00 |
| Peche_Hoshmandara | Hoshmandara | 8 | 1.50 | 18.40 | 19.90 |
| Peche_Jdita | Jdita | 153 | 1.75 | 15.33 | 17.08 |
| Peche_Kafarzabad | Kafarzabad | 52 | 1.69 | 22.18 | 23.88 |
| Peche_Maalaka | Maalaka | 48 | 1.60 | 13.70 | 15.30 |
| Peche_Niha | Niha | 6 | 1.65 | 15.85 | 17.50 |
| Peche_Qabb Elias | Qabb Elias | 52 | 1.65 | 15.51 | 17.16 |
| Peche_Saadnayel | Saadnayel | 41 | 1.76 | 14.59 | 16.35 |
| Pommier_Anjar | Anjar | 297 | 1.85 | 13.11 | 14.96 |
| Pommier_Bouerej | Bouerej | 19 | 1.85 | 14.27 | 16.12 |
| Pommier_deir ghazal | deir ghazal | 4 | 1.80 | 15.60 | 17.40 |
| Pommier_Forzol | Forzol | 460 | 1.80 | 16.70 | 18.50 |
| Pommier_Hezarta | Hezarta | 55 | 1.81 | 14.30 | 16.11 |
| Pommier_Hosmosh | Hosmosh | 30 | 1.78 | 15.22 | 17.00 |
| Pommier_Jdita | Jdita | 70 | 1.90 | 16.60 | 18.50 |
| Pommier_Kafarzabad | Kafarzabad | 18 | 1.84 | 11.22 | 13.06 |

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------|------|------|-------|-------|
| Pommier_Maalaka | Maalaka | 40 | 1.80 | 15.33 | 17.13 |
| Pommier_Nabi Ayla | Nabi Ayla | 14 | 1.85 | 16.08 | 17.93 |
| Pommier_Niha | Niha | 42 | 1.82 | 16.36 | 18.18 |
| Pommier_Qaa El Rim | Qaa El Rim | 63 | 1.86 | 14.35 | 16.21 |
| Pommier_Qaab Elias | Qaab Elias | 18 | 1.84 | 10.50 | 12.34 |
| Pommier_Saadnayel | Saadnayel | 16 | 1.83 | 15.50 | 17.33 |
| Pommier_Taalabaya | Taalabaya | 53 | 1.81 | 16.31 | 18.12 |
| Pommier_Terbol | Terbol | 10 | 1.80 | 13.31 | 15.11 |
| Pommier_Toueite | Toueite | 25 | 1.78 | 19.45 | 21.23 |
| Pommier_Wadi Arayech | Wadi Arayech | 17.5 | 1.86 | 15.01 | 16.87 |
| Pommier_Zahle | Zahle | 1219 | 1.78 | 13.63 | 15.41 |



Annexe 5

Distribution des cultures par exploitation agricole enquêtée

| Région | Culture | Surface (dn) | Culture | Surface (dn) | Culture | Surface (dn) | Culture | Surface (dn) | Culture | Surface (dn) | Culture | Surface (dn) | Culture | Surface (dn) |
|------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
| Kafarzabad | Vigne | 15 | Pois Vert | 8 | Lentille vert | 7 | Pomme | 6 | | | | | | |
| Kafarzabad | pêche | 14 | Pomme | 2 | | | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Pomme de terre | 100 | | | | | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Laitue | 20 | Salade | 50 | Pomme de terre | 20 | Choux | 150 | Prune | 5 | pêche | 7 | Pomme | 8 |
| Kafarzabad | Pomme de terre | 70 | Lentille vert | 30 | Courgette | 20 | Mais | 30 | Laitue | 20 | | | | |
| Kafarzabad | Prune | 30 | pêche | 20 | Pomme de terre | 100 | Blé | 10 | Laitue | 20 | Persil | 20 | | |
| Kafarzabad | Persil | 10 | Menthe vert | 20 | Laitue | 20 | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Laitue | 50 | Choux | 50 | Choux fleur | 50 | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Vigne | 2 | Pois vert | 5 | Lentille vert | 5 | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Pomme de terre (L) | 8 | Pomme de terre (B) | 3 | Tomates | 3 | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Pomme de terre | 10 | Lentille vert | 10 | Mais | 6 | Vigne | 10 | | | | | | |
| Kafarzabad | Prune | 2 | Persil | 10 | Laitue | 10 | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Pomme de terre (L) | 4 | Tomates | 1 | | | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Pêche | 4 | Pomme de terre (B) | 10 | Blé | 10 | Lentille vert | 4 | | | | | | |
| Kafarzabad | Blé | 2 | Orge | 2 | | | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Lentille vert | 1 | Courgette | 0.5 | Laitue | 0.5 | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Mais | 10 | Blé | 5 | | | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Vigne | 6 | | | | | | | | | | | | |
| Kafarzabad | Pomme de terre (B) | 4 | Lentille vert | 2 | Choux | 2 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------|------|--------------------|------|----------------|------|-----------|------|--------------------|-----|--------|---|--|
| Zahle | Pomme de terre (B) | 20 | Pomme | 5 | | | | | | | | | |
| Zahle | Vigne (rouge) | 5 | Vigne (blanc) | 2 | | | | | | | | | |
| Zahle | Blé | 3 | Blé | 4 | Lentille vert | 8 | | | | | | | |
| Zahle | Pomme | 3 | Pomme | 4 | Pomme | 3 | Pomme | 4 | | | | | |
| Taanayel | Concombre | 20 | Pomme de terre (B) | 40 | | | | | | | | | |
| Taanayel | Blé | 50 | Orge | 21 | Chicoré | 21 | Aubergine | 3 | Pomme de terre (B) | 12 | Oignon | 9 | |
| Taanayel | Blé | 60 | | | | | | | | | | | |
| Taanayel | Blé | 50 | Pomme de terre (B) | 50 | | | | | | | | | |
| Taanayel | Blé | 200 | | | | | | | | | | | |
| Makse | Blé | 285 | | | | | | | | | | | |
| Makse | Blé | 150 | | | | | | | | | | | |
| Ain Kafarzabad | Blé | 12 | Cerise | 10 | | | | | | | | | |
| Ain Kafarzabad | Prune | 12.5 | Cerise | 12.5 | Olive | 12.5 | Abricot | 12.5 | | | | | |
| Ain Kafarzabad | Cerise | 10 | Olive | 5 | | | | | | | | | |
| Ain Kafarzabad | Cerise | 5 | | | | | | | | | | | |
| Ain Kafarzabad | Olive | 2 | | | | | | | | | | | |
| Ksara | Amande vert | 12 | | | | | | | | | | | |
| Ksara | Vigne | 100 | | | | | | | | | | | |
| Ksara | Tomates | 0.4 | Concombre | 0.4 | Melon | 0.4 | Olive | 1.3 | | | | | |
| Tall Akhdar | Blé | 100 | Blé | 80 | Haricot sec | 50 | Melon | 50 | Pomme de terre (B) | 340 | | | |
| Massa | Amande vert | 2 | | | | | | | | | | | |
| Massa | Cerise | 22 | Amande vert | 3 | | | | | | | | | |
| Massa | Blé | 150 | Lentille vert | 40 | Pomme de terre | 10 | Vigne | 150 | | | | | |
| Choubryet Tabet | Pomme de terre (B) | 70 | Oignon | 140 | | | | | | | | | |
| Deir Ghazal | Vigne | 30 | | | | | | | | | | | |
| Deir Ghazal | Cerise | 25 | Amande vert | 35 | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------|-----|--------------------|-----|-------------|----|---------|----|-------|---|--------|---|--|--|
| Deir Ghazal | Prune | 3 | Pomme | 4 | Vigne | 2 | | | | | | | | |
| Deir Ghazal | Cerise | 30 | Amande vert | 25 | Olive | 5 | | | | | | | | |
| Deir Ghazal | Cerise | 30 | Amande vert | 20 | | | | | | | | | | |
| Hoshmoch | Blé | 100 | Pomme de terre (B) | 60 | | | | | | | | | | |
| Hoshmoch | Blé | 600 | Pomme de terre (B) | 580 | Laitue | 75 | | | | | | | | |
| Hoshmoch | Blé | 50 | Pomme de terre (B) | 60 | Laitue | 10 | | | | | | | | |
| Nabi Ayla | Vigne | 10 | Olive | 5 | Pomme | 5 | | | | | | | | |
| Nabi Ayla | Vigne | 30 | Cerise | 10 | Amande vert | 10 | | | | | | | | |
| Nabi Ayla | Cerise | 10 | Prune | 10 | Vigne | 25 | | | | | | | | |
| Nabi Ayla | Vigne | 20 | Pomme de terre (B) | 55 | Oignon | 50 | Laitue | 20 | | | | | | |
| Nabi Ayla | Pomme de terre (B) | 300 | Oignon | 50 | | | | | | | | | | |
| Nabi Ayla | Vigne | 20 | Amande vert | 15 | Cerise | 45 | | | | | | | | |
| Nabi Ayla | Vigne | 4 | Olive | 2 | Amande vert | 2 | Grenade | 4 | Pomme | 2 | Cerise | 2 | | |
| Nabi Ayla | Vigne | 20 | Cerise | 5 | Amande vert | 8 | Pomme | 7 | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 2 | Cerise | 3 | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 13 | | | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 11 | | | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 12 | Cerise | 10 | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 25 | Pomme | 10 | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 38 | | | | | | | | | | | | |
| Ablah | Vigne | 145 | | | | | | | | | | | | |
| Terbol | Pomme de terre (B) | 30 | Tomates | 5 | Radis | 15 | | | | | | | | |
| Terbol | Blé | 60 | Carotte | 40 | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------|-----|--------------------|-----|----------------|-----|-----------|-----|-------|----|---------|-----|-----------|----|
| Terbol | Blé | 15 | | | | | | | | | | | | |
| Terbol | Lentille | 20 | Pomme de terre (B) | 25 | | | | | | | | | | |
| Terbol | Pomme de terre (B) | 200 | Laitue | 100 | | | | | | | | | | |
| Terbol | Pomme de terre (B) | 100 | | | | | | | | | | | | |
| Terbol | Blé | 50 | Olive | 6 | Vigne | 13 | Pomme | 10 | Prune | 10 | Tomates | 7 | Concombre | 5 |
| Terbol | Blé | 150 | Mais | 50 | Orge | 50 | | | | | | | | |
| Terbol | Blé | 400 | Pomme de terre | 100 | Tomate | 100 | Concombre | 100 | Melon | 50 | Oignon | 200 | Courgette | 50 |
| Hoshmandara | Pomme | 30 | Pêche | 8 | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 8 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 3 | Cerise | 2 | Amande vert | 2 | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 60 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 60 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 20 | Cerise | 4 | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 21 | Amande vert | 4 | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 5 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 10 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Blé | 40 | Vigne | 110 | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 10 | Pomme de terre | 15 | Tomate | 5 | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 50 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Cerise | 35 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Blé | 100 | Vigne | 150 | Pomme de terre | 50 | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 15 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 40 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 35 | | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 17 | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|--------|-----|-----------|---|--|--|--|
| Ferzole | Vigne | 50 | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Blé | 10 | Vigne | 20 | Pomme de terre | 20 | Tomate | 5 | Concombre | 5 | | | |
| Ferzole | Vigne | 30 | Concombre | 5 | Courgette | 5 | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 40 | Cerise | 200 | Pomme | 460 | Olive | 300 | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 5 | Tomate | 30 | | | | | | | | | |
| Ferzole | Orge | 30 | Avoine | 30 | Pastèque | 10 | | | | | | | |
| Ferzole | Tomate | 2 | Pomme de terre | 100 | Vigne | 38 | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 40 | | | | | | | | | | | |
| Ferzole | Vigne | 14 | Tomate | 10 | Courgette | 10 | | | | | | | |
| Hosh Ganam / Mayslun | Blé | 60 | Pomme de terre | 80 | | | | | | | | | |
| Nasryet Rizk | Blé | 50 | Pomme de terre | 50 | | | | | | | | | |
| Nasryet Rizk | Blé | 40 | Orge | 10 | Avoine | 10 | | | | | | | |
| Nasryet Rizk | Blé | 5 | Avoine | 5 | | | | | | | | | |
| Nasryet Rizk | Mais | 10 | Avoine | 10 | | | | | | | | | |
| Nasryet Rizk | Pomme de terre | 14 | | | | | | | | | | | |
| Rait | Lentille | 3 | Melon | 2 | | | | | | | | | |
| Rait | Pomme de terre | 100 | Courgette | 70 | Concombre | 50 | | | | | | | |
| Rait | Pomme de terre | 60 | | | | | | | | | | | |
| Rait | Cerise | 50 | | | | | | | | | | | |
| Rait | Pomme de terre | 100 | Blé | 30 | Lentille | 40 | | | | | | | |
| Rait | Pomme de terre | 80 | | | | | | | | | | | |
| Taalbaya | Pomme de terre | 80 | | | | | | | | | | | |
| Nasryet Zahle | Vigne | 50 | Vigne | 50 | Vigne | 30 | Olive | 20 | | | | | |
| Dalhamyet | Melon | 2 | Tomate | 3 | | | | | | | | | |
| Dalhamyet | Pomme de terre | 30 | Persil | 5 | Radis | 5 | | | | | | | |
| Dalhamyet | Pomme de terre | 100 | Courgette | 50 | Lentille | 50 | | | | | | | |
| Dalhamyet | Légume à feuilles | 285 | | | | | | | | | | | |
| Zahle (2) | Pois vert | 11 | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|-----|-------------------|----|-----------|----|---------|----|-------|---|--|--|--|--|
| Zahle (2) | Lentille vert | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Zahle (2) | Pomme de terre | 100 | Légume à feuilles | 5 | | | | | | | | | | |
| Zahle (2) | Pomme de terre | 15 | Pomme de terre | 20 | Courgette | 10 | | | | | | | | |
| Hosh Kaysar | Pomme de terre | 10 | Pomme de terre | 20 | Tomate | 20 | | | | | | | | |
| Hosh Kaysar | Pomme de terre | 10 | Pomme de terre | 30 | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 6 | Pomme | 10 | Abricot | 5 | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 70 | Pomme | 2 | Vigne | 30 | Abricot | 10 | Olive | 2 | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 14 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 14 | Prune | 7 | pêche | 7 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 14 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 25 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 14 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Mais | 80 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Poivron | 14 | Tomate | 14 | Pomme | 16 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 5 | Tomate | 3 | Aubergine | 2 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 10 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 10 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 21 | Prune | 30 | Poire | 49 | | | | | | | | |
| Anjar | Pêche | 7 | Pomme | 7 | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pêche | 7 | Prune | 11 | Pomme | 22 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 77 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 20 | Tomate | 40 | Aubergine | 40 | | | | | | | | |
| Jdita | Mais | 10 | Aubergine | 5 | Gombo | 2 | Tomate | 10 | | | | | | |
| Jdita | Pêche | 20 | Pomme | 10 | | | | | | | | | | |
| Jdita | Pêche | 28 | Prune | 12 | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|-----|----------------|----|-------|----|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Jdita | Pêche | 34 | | | | | | | | | | | | |
| Jdita | Pêche | 17 | | | | | | | | | | | | |
| Jdita | Pomme | 60 | pêche | 40 | | | | | | | | | | |
| Jdita | pêche | 8 | | | | | | | | | | | | |
| Jdita | Mais | 10 | Pomme de terre | 15 | | | | | | | | | | |
| Jdita | pêche | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Cerise | 20 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Vigne | 20 | Vigne | 3 | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Pomme | 5.5 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Cerise | 20 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Cerise | 6 | | | Vigne | 3 | | | | | | | | |
| Toueite | Cerise | 20 | | | | | | | | | | | | |
| Toueite | Vigne | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Toueite | Cerise | 10 | | | | | | | | | | | | |
| Toueite | Pomme | 5 | | | | | | | | | | | | |
| Toueite | Pomme | 20 | Amande | 20 | Vigne | 20 | | | | | | | | |
| Toueite | Vigne | 100 | Amande | 20 | | | | | | | | | | |
| Toueite | Vigne | 12 | Vigne | 10 | | | | | | | | | | |
| Niha | Pomme | 22 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Vigne | 40 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Vigne | 60 | Cerise | 40 | | | | | | | | | | |
| Niha | Vigne | 28 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Cerise | 8 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Abricot | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Pêche | 6 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Vigne | 15 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Amande | 50 | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|----|----------------|----|-------|----|---------|----|--|--|--|--|--|--|
| Maalaka | Vigne | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Maalaka | Vigne | 9 | | | | | | | | | | | | |
| Maalaka | Vigne | 15 | | | | | | | | | | | | |
| Maalaka | Vigne | 28 | | | | | | | | | | | | |
| Maalaka | Vigne | 46 | | | | | | | | | | | | |
| Maalaka | Vigne | 30 | | | | | | | | | | | | |
| Maalaka | Vigne | 35 | | | | | | | | | | | | |
| Niha | Vigne | 30 | Pomme | 10 | | | | | | | | | | |
| Hezerta | Pomme | 5 | | | | | | | | | | | | |
| Hezerta | Pomme | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 6 | | | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 5 | Pomme | 6 | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Abricot | 6 | | | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Prune | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 1 | Prune | 1 | | | | | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 50 | Pomme | 20 | Vigne | 20 | Abricot | 10 | | | | | | |
| Qaa El Rim | Cerise | 23 | Pomme | 25 | Vigne | 2 | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Pomme | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Cerise | 9 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Prune | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Pomme | 5 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Abricot | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Cerise | 10 | Amande | 8 | Vigne | 1 | | | | | | | | |
| Wadi El Arayech | Cerise | 6 | Amande | 5 | Vigne | 3 | | | | | | | | |
| Jdita | Mais | 10 | Pomme de terre | 15 | | | | | | | | | | |
| Jdita | Pêche | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Chtoura | Blé | 60 | Pomme de | 80 | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------------|------|--------------------|------|----------------|-----|---------------|-----|--------|----|--------|----|-------|---|
| | | | terre | | | | | | | | | | | |
| Chtoura | Oignon | 6 | Pomme de terre | 7 | | | | | | | | | | |
| Chtoura | Blé | 5 | | | | | | | | | | | | |
| Chtoura | Blé | 15 | Pomme de terre | 20 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Vigne | 15 | Pois Vert | 8 | Lentille vert | 7 | Pomme | 6 | | | | | | |
| Quab Elias | Pêche | 14 | Pomme | 2 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pomme de terre | 100 | | | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Laitue | 20 | Salade | 50 | Pomme de terre | 20 | Choux | 150 | Prune | 5 | Pêche | 7 | Pomme | 8 |
| Quab Elias | Pomme de terre | 70 | Lentille vert | 30 | Courgette | 20 | Mais | 30 | Laitue | 20 | | | | |
| Quab Elias | Prune | 30 | Pêche | 20 | Pomme de terre | 100 | Blé | 10 | Laitue | 20 | Persil | 20 | | |
| Quab Elias | Persil | 10 | Menthe vert | 20 | Laitue | 20 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Laitue | 50 | Choux | 50 | Choux fleur | 50 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Vigne | 2 | Pois vert | 5 | Lentille vert | 5 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pomme de terre (L) | 8 | Pomme de terre (B) | 3 | Tomates | 3 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pomme de terre | 10 | Lentille vert | 10 | Mais | 6 | Vigne | 10 | | | | | | |
| Quab Elias | Prune | 2 | Persil | 10 | Laitue | 10 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pomme de terre (L) | 4 | Tomates | 1 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pêche | 4 | Pomme de terre (B) | 10 | Blé | 10 | Lentille vert | 4 | | | | | | |
| Quab Elias | Blé | 2 | Orge | 2 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Lentille vert | 1 | Courgette | 0.5 | Laitue | 0.5 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Mais | 10 | Blé | 5 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Vigne | 6 | | | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pomme de terre (B) | 4 | Lentille vert | 2 | Choux | 2 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Vigne | 3 | Vigne | 2 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Persil | 0.25 | Menthe | 0.25 | Lentille | 0.5 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------------|-----|---------------------|-----|---------------|-----|-------------------|----|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | vert | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Pomme de terre (B) | 2 | Courgette | 0.5 | Laitue | 0.5 | Prune | 2 | | | | | | |
| Quab Elias | Pêche | 7 | Tomates | 5 | Laitue | 5 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Vigne | 2 | Pois vert | 5 | Lentille vert | 5 | Pomme | 2 | | | | | | |
| Quab Elias | Blé | 50 | Orge | 50 | Avoine | 45 | | | | | | | | |
| Quab Elias | Tomate | 14 | | | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Tomate | 5 | Lentille à feuilles | 5 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Légume à feuilles | 4 | | | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Courgette | 2 | Tomate | 4 | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Blé | 20 | | | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Tomate | 13 | | | | | | | | | | | | |
| Quab Elias | Tomate | 5 | Concombre | 5 | Courgette | 10 | Légume à feuilles | 10 | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 4 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Carotte | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 4 | Lentille vert | 5 | Courgette | 3 | | | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 5 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 9 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Carotte | é | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Légume à feuilles | 4 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Lentille vert | 8 | | | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Vigne | 15 | Pois Vert | 8 | Lentille vert | 7 | Pomme | 6 | | | | | | |
| Saadnayel | Pêche | 14 | Pomme | 2 | | | | | | | | | | |
| Saadnayel | Pomme de terre | 100 | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------------------|----|--------------------|----|----------------|-----|-------|-----|--------|----|--------|----|-------|---|
| Saadnayel | Laitue | 20 | Salade | 50 | Pomme de terre | 20 | Choux | 150 | Prune | 5 | Pêche | 7 | Pomme | 8 |
| Saadnayel | Pomme de terre | 70 | Lentille vert | 30 | Courgette | 20 | Mais | 30 | Laitue | 20 | | | | |
| Saadnayel | Prune | 30 | Pêche | 20 | Pomme de terre | 100 | Blé | 10 | Laitue | 20 | Persil | 20 | | |
| Saadnayel | Persil | 10 | Menthe vert | 20 | Laitue | 20 | | | | | | | | |
| Saadnayel | Laitue | 50 | Choux | 50 | Choux fleur | 50 | | | | | | | | |
| Saadnayel | Vigne | 2 | Pois vert | 5 | Lentille vert | 5 | | | | | | | | |
| Saadnayel | Pomme de terre (L) | 8 | Pomme de terre (B) | 3 | Tomates | 3 | | | | | | | | |
| Saadnayel | Vigne | 3 | Vigne | 2 | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 14 | Prune | 7 | pêche | 7 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 14 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 25 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 7 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 14 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Mais | 80 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Poivron | 14 | Tomate | 14 | Pomme | 16 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 5 | Tomate | 3 | Aubergine | 2 | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 10 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 10 | | | | | | | | | | | | |
| Anjar | Pomme | 21 | Prune | 30 | Poire | 49 | | | | | | | | |
| Anjar | pêche | 7 | Pomme | 7 | | | | | | | | | | |
| Bouerej | Vigne | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Bouerej | Cerise | 4 | Amande vert | 2 | | | | | | | | | | |
| Bouerej | Prune | 3 | Pomme | 4 | Vigne | 2 | | | | | | | | |
| Bouerej | Cerise | 5 | Amande vert | 5 | Olive | 3 | | | | | | | | |
| Bouerej | Cerise | 1 | | | | | | | | | | | | |

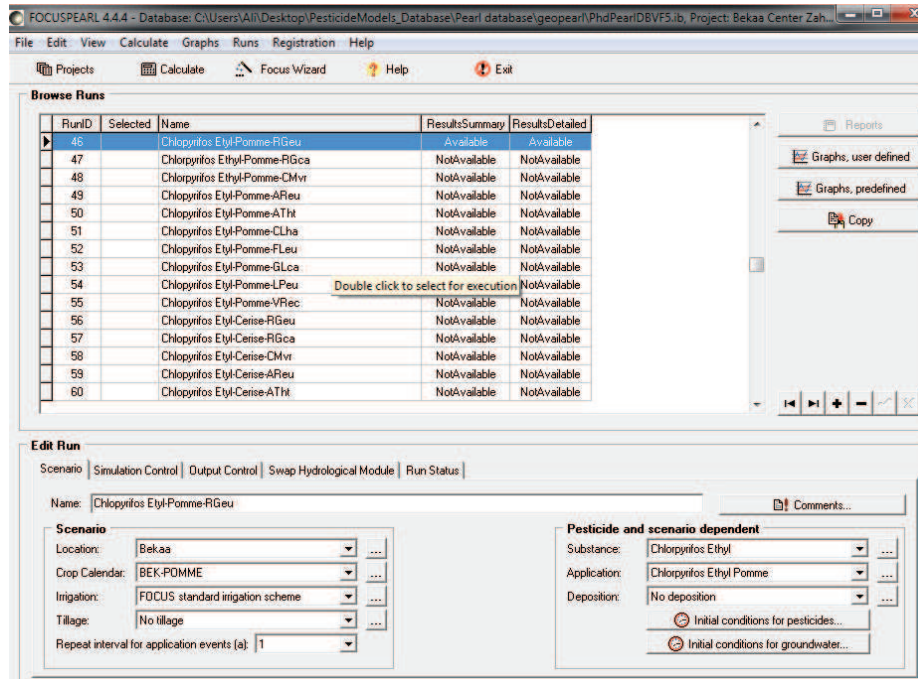
| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|----|-------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Majdal Anjar | Vigne | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Olive | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Vigne | 15 | Olive | 5 | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Vigne | 20 | Olive | 2 | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Vigne | 19 | | | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Vigne | 20 | Olive | 4 | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Vigne | 15 | Olive | 1 | | | | | | | | | | |
| Majdal Anjar | Olive | 12 | | | | | | | | | | | | |



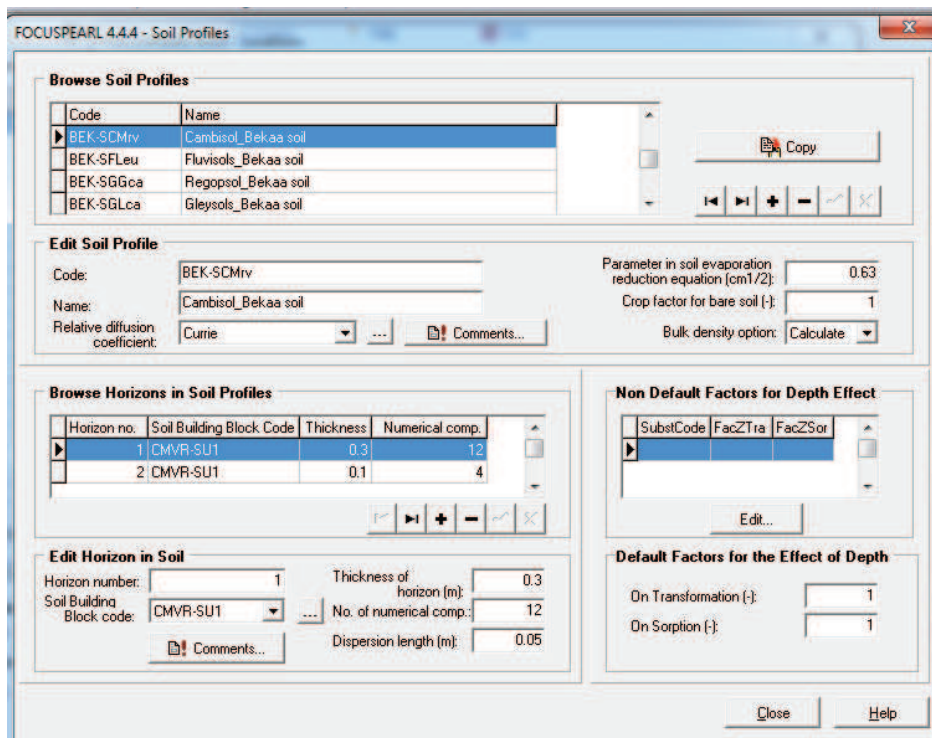
Annexe 6

Etape de fonctionnement du modèle PEARL

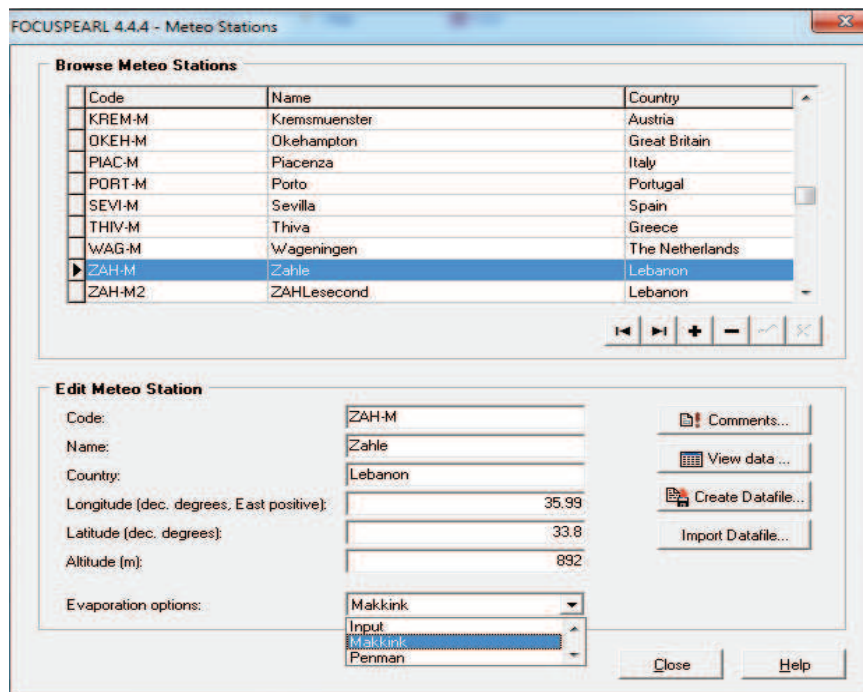
1. Page principale de PEARL (Source : Modèle PEARL)



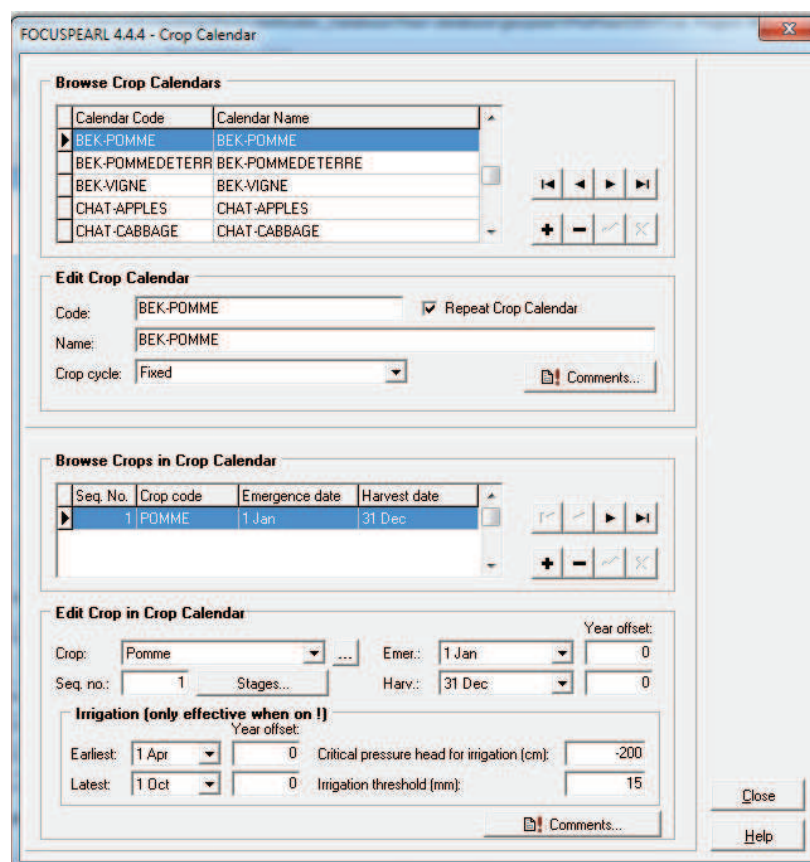
2. Table des propriétés du sol (Source : Modèle PEARL)



3. Table des données climatiques (Source : Modèle PEARL)



4. Table du calendrier des cultures (Source : Modèle PEARL)



5. Table des paramètres de la culture (Source : Modèle PEARL)

FOCUSPEARL 4.4.4 - Crops

Browse Crops

| Crop Code | NAME |
|------------|----------------|
| POMME | Pomme |
| POMMEDETER | Pomme de terre |
| POTATOES | Potatoes |
| SOYBEAN | Soybean |
| SPCEREALS | Spring cereals |
| STRAWBER | Strawberries |

Copy

Edit Crop

Crop code: POMME

Name: Pomme

Anaerobiosis point (cm): -10 Extinction coef. for solar radiation (-): 0.39

Wet reduction point (cm): -25 Minimum canopy resistance (s m-1): 70

Higher dry reduction point (cm): -500 Const. in eqn. for water interception (cm): 0.0001

Lower dry reduction point (cm): -800 Depth of (virtual) tensiometer (m): 0.2

Wilting point (cm): -16000

Temperature sum

Start value (deg. C):

emergence - anthesis (deg. C):

anthesis - maturity (deg. C):

Root density...

Comments...

Close Help

6. Table des propriétés dynamique de la culture (Source : Modèle PEARL)

FOCUSPEARL 4.4.4 - Crop Stages

Cultivation Sequence Info

Name of cultivation sequence: BEK-POMME

Crop code: POMME

Sequence number: 1

Browse Stages

| Development Stage | LAI | Crop factor | Rooting depth | Crop Height |
|-------------------|-----|-------------|---------------|-------------|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0.245 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0.247 | 0 | 1.05 | 1 | 0 |
| 0.409 | 4 | 1.05 | 1 | 0 |
| 0.412 | 4 | 1.1 | 1 | 0 |

Edit Stage

Development stage (-): 0 Leaf Area Index (m2 m-2): 0

Crop factor (-): 1 Rooting depth (m): 1

Crop height (m): 0

Comments...

Close Help

7. Table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL)

FOCUSPEARL 4.4.4 - Substances

| Code | Name | Parent | Molar Mass |
|-------|--------------------|--------|------------|
| CO-B | Copper Dxychloride | Yes | 427.14 |
| ChT-B | Chlorothalonil | Yes | 285.91 |
| CIP-B | Chlorpyrifos Ethyl | Yes | 350.58 |
| Cym-B | Cymoxanil | Yes | 198.18 |
| D | Substance D | Yes | 300 |
| DIM-B | Dimethoate | Yes | 229.26 |

Copy Transformation Scheme...

General Freundlich sorption Transformation Diffusion Crop

Code: CIP-B Parent

Name: Chlorpyrifos Ethyl

Molar mass (g mol⁻¹): 350.58

Saturated vapour pressure (Pa): 0.00143 measured at (C): 25

Molar enthalpy of vaporisation (kJ mol⁻¹): 95

Solubility in water (mg L⁻¹): 1.05 measured at (C): 20

Molar enthalpy of dissolution (kJ mol⁻¹): 27

Comments...

Close Help

8. Freundlich sorption - Table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL)

FOCUSPEARL 4.4.4 - Substances

| Code | Name | Parent | Molar Mass |
|-------|--------------------|--------|------------|
| CO-B | Copper Dxychloride | Yes | 427.14 |
| ChT-B | Chlorothalonil | Yes | 285.91 |
| CIP-B | Chlorpyrifos Ethyl | Yes | 350.58 |
| Cym-B | Cymoxanil | Yes | 198.18 |
| D | Substance D | Yes | 300 |
| DIM-B | Dimethoate | Yes | 229.26 |

Copy Transformation Scheme...

General Freundlich sorption Transformation Diffusion Crop

Option: Kom. hq-indeberent

Equilibrium solution

h_q - indeberent

K_{ow} (coef. for sorption on soil matter) (L³ L⁻¹): 0

K_{ow} (coef. for sorption on water) (L³ L⁻¹): 0

Molar enthalpy of sorption (kJ mol⁻¹): 0

Equilibrium solution

Reference concentration in lipid phase (mg L⁻¹): 1

Freundlich sorption exponent (-): 0.2

Non-equilibrium solution

Desorption rate coefficient (d⁻¹): 0

Factor relating Coefficient and Coeff. d (-): 0

Close Help

9. La transformation - Table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL).

FOCUSPEARL 4.4.4 - Substances

| Code | Name | Parent | Molar Mass |
|---------|--------------------|--------|------------|
| CO-B | Copper Oxychloride | Yes | 427.14 |
| ChT-B | Chlorothalonil | Yes | 265.91 |
| ▶ CIP-B | Chlorpyrifos Ethyl | Yes | 350.58 |
| Cym-B | Cymoxanil | Yes | 198.18 |
| D | Substance D | Yes | 300 |
| DIM-B | Dimethoate | Yes | 229.26 |

Copy Transformation Scheme...

General | Freundlich sorption | Transformation | Diffusion | Crop

Transformation

Half-life (d): measured at (C):

Optimum moisture conditions (pF 2 or wetter):

Liquid content in incubation experiment (kg kg⁻¹):

Exponent for the effect of liquid (-):

Molar activation energy (kJ mol⁻¹):

Close Help

10. La diffusion - table des propriétés des substances actives (Source : Modèle PEARL)

FOCUSPEARL 4.4.4 - Substances

| Code | Name | Parent | Molar Mass |
|---------|--------------------|--------|------------|
| CO-B | Copper Oxychloride | Yes | 427.14 |
| ChT-B | Chlorothalonil | Yes | 265.91 |
| ▶ CIP-B | Chlorpyrifos Ethyl | Yes | 350.58 |
| Cym-B | Cymoxanil | Yes | 198.18 |
| D | Substance D | Yes | 300 |
| DIM-B | Dimethoate | Yes | 229.26 |

Copy Transformation Scheme...

General | Freundlich sorption | Transformation | Diffusion | Crop

Diffusion of solute in liquid and gas phases

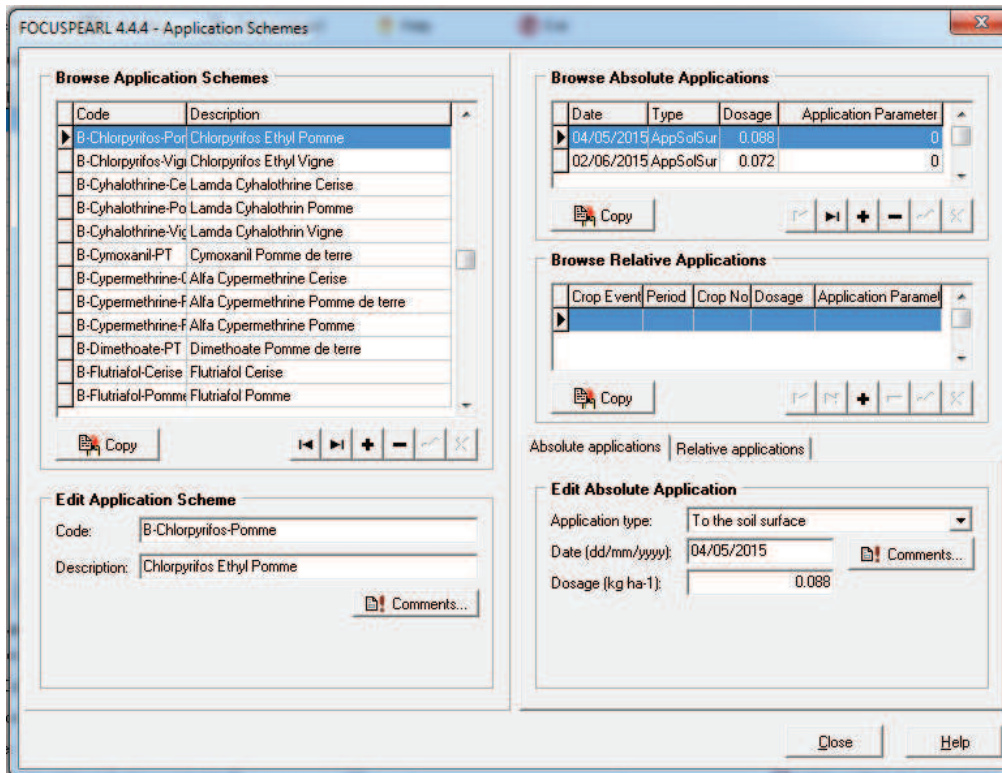
Reference temperature for diffusion (C):

Reference diffusion coefficient in water (m² d⁻¹):

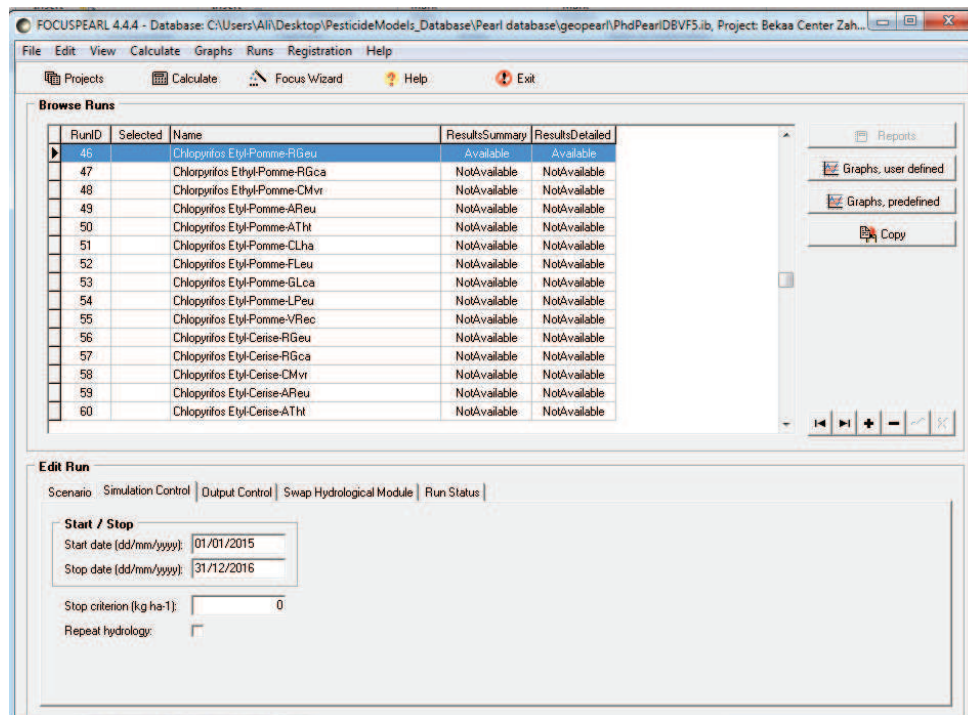
Reference diffusion coefficient in air (m² d⁻¹):

Close Help

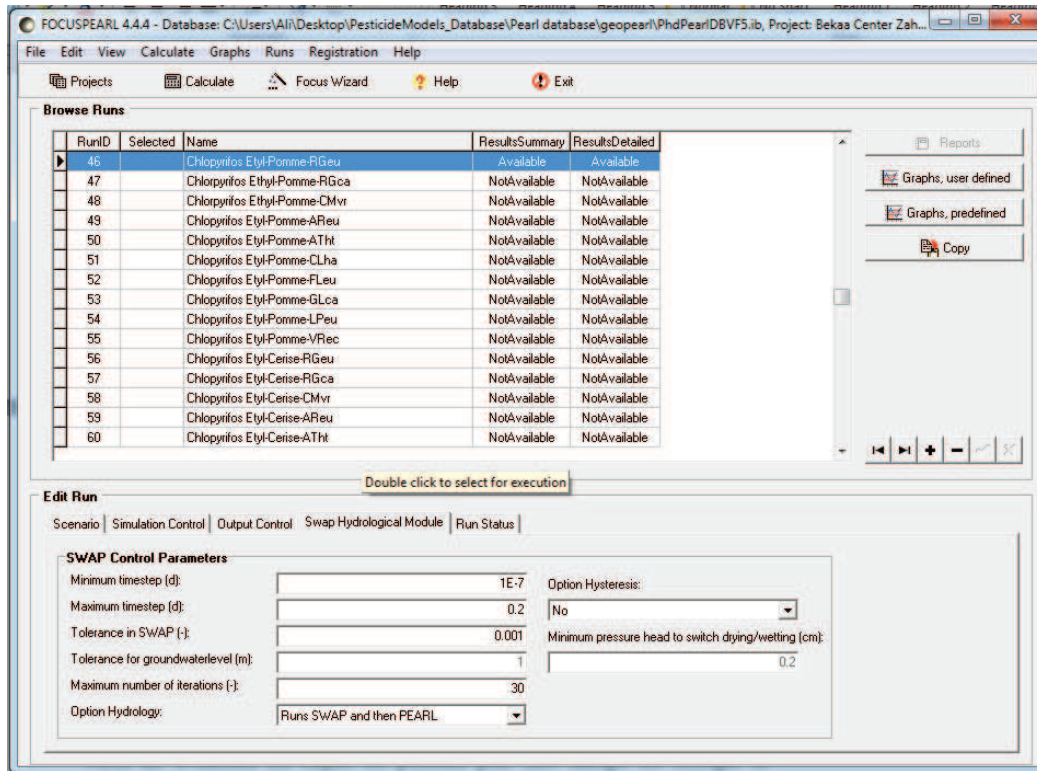
11. Table du programme d'application des substances actives (Source : Modèle PEARL)



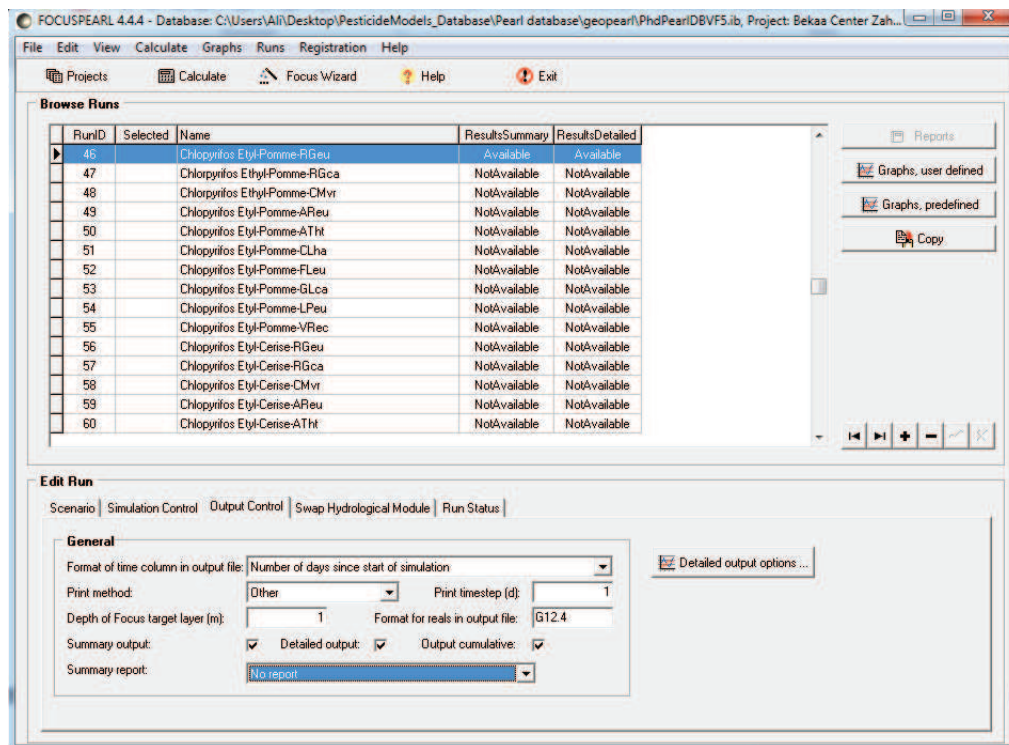
12. Table du contrôle de simulation (Source : Modèle PEARL)



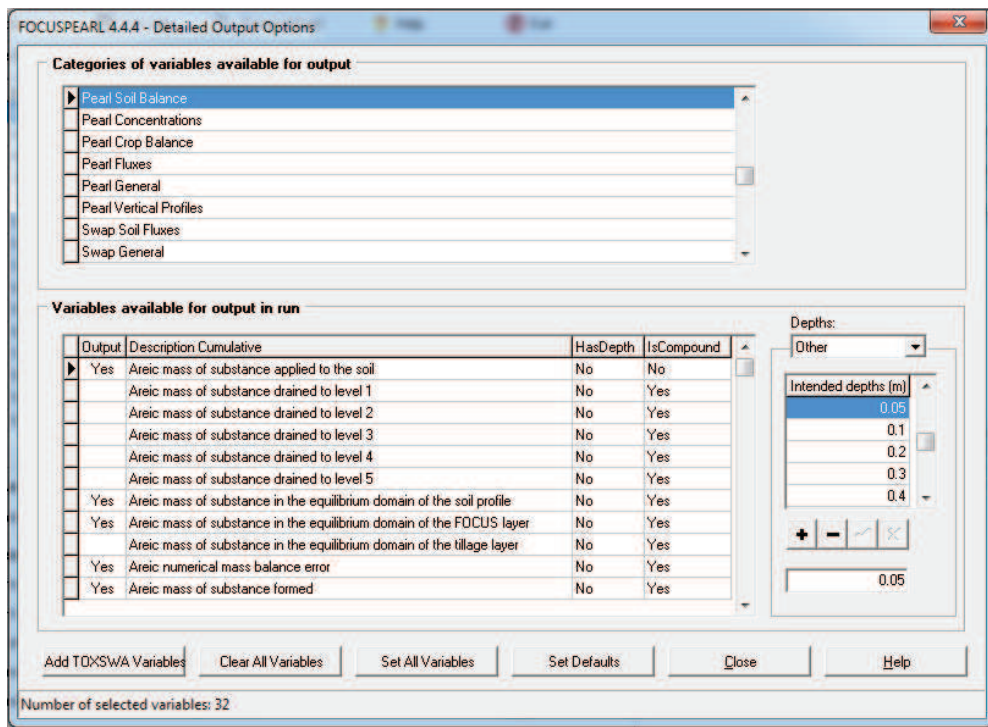
13. Volet Hydrologie (Source : Modèle PEARL)



14. Paramètres de la sortie (Source : Modèle PEARL)



15. Table des catégories et variables de sorties (Source : Modèle PEARL)



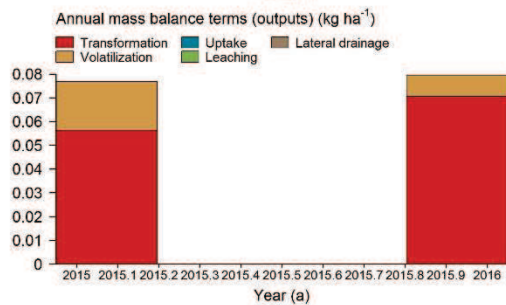
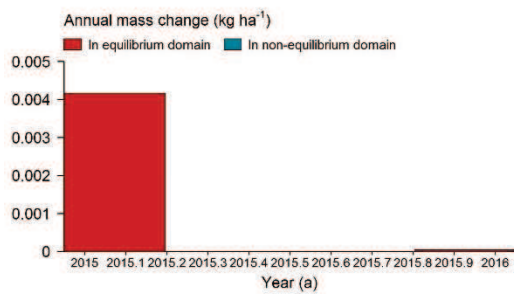
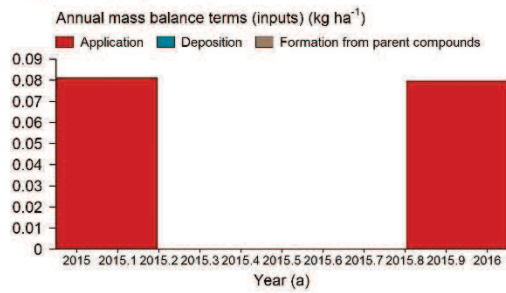
Annexe 7

Bilan de dissipation des matières actives

1. Pour la culture de vigne

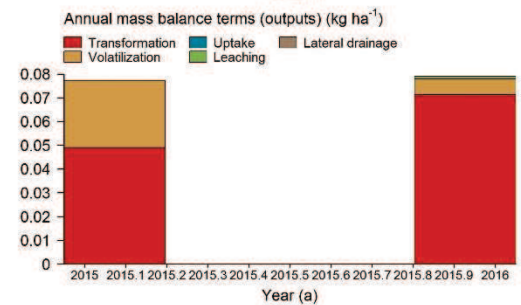
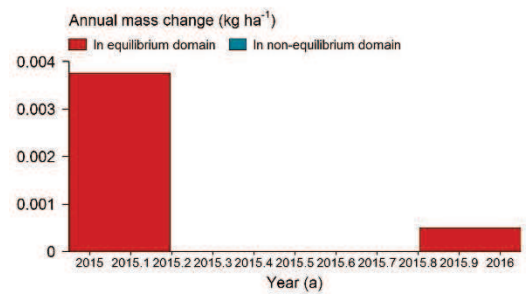
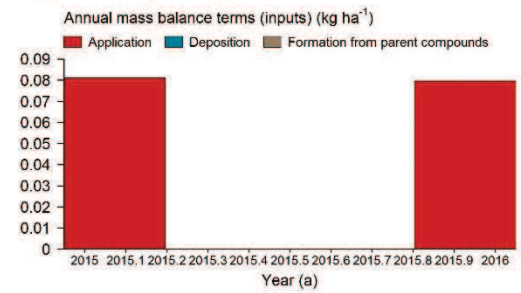
1.1. Bilan de dissipation de la matière active « chlorpyrrifos-éthyl »

Chlorpyrifos Etyl-Vigne-VRec, substance: CIP-B



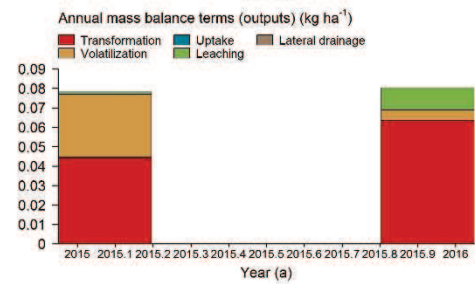
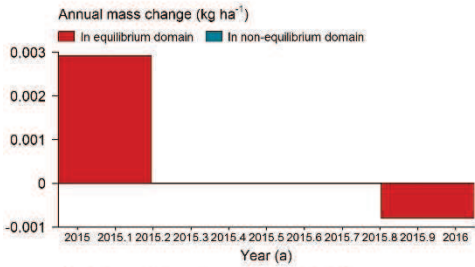
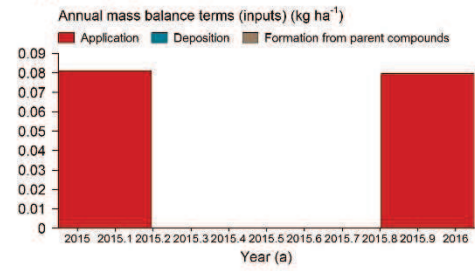
A

Chlorpyrifos Etyl-Vigne-FLeu, substance: CIP-B



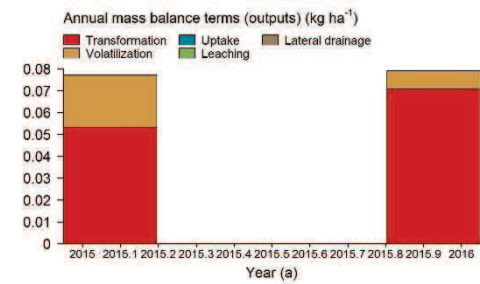
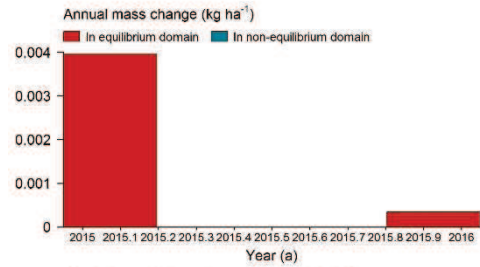
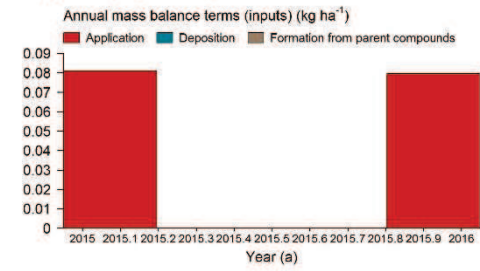
B

Chlopyrifos Etyl-Vigne-GLca, substance: CIP-B



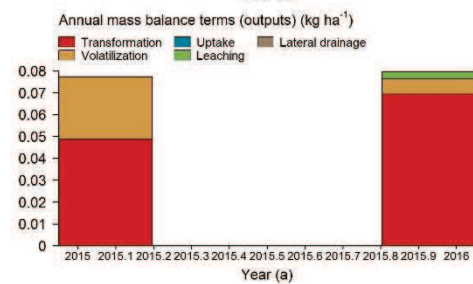
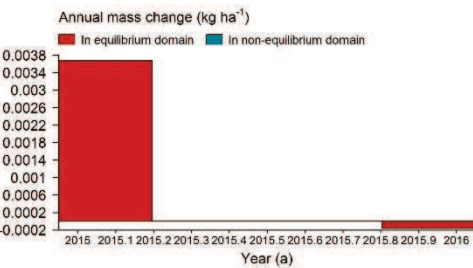
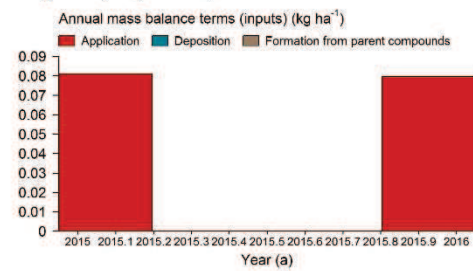
C

Chlopyrifos Etyl-Vigne-LPeu, substance: CIP-B



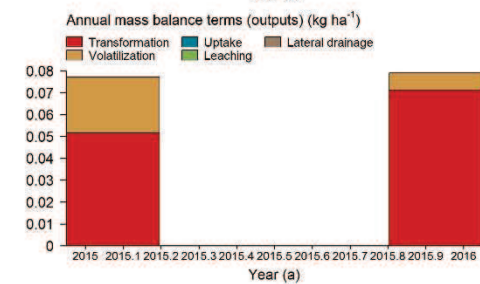
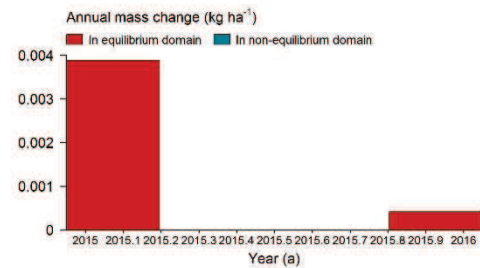
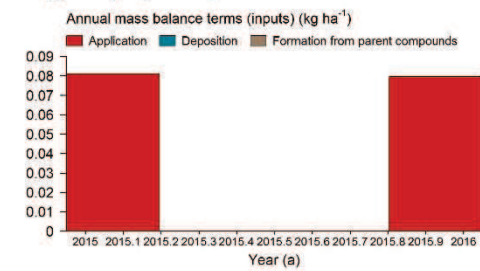
D

Chlopyrifos Etyl-Vigne-RGeu, substance: CIP-B



E

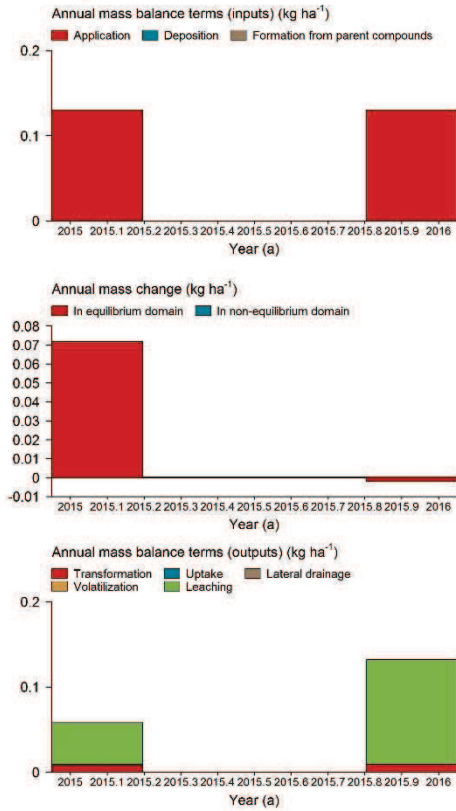
Chlopyrifos Etyl-Vigne-AReu, substance: CIP-B



F

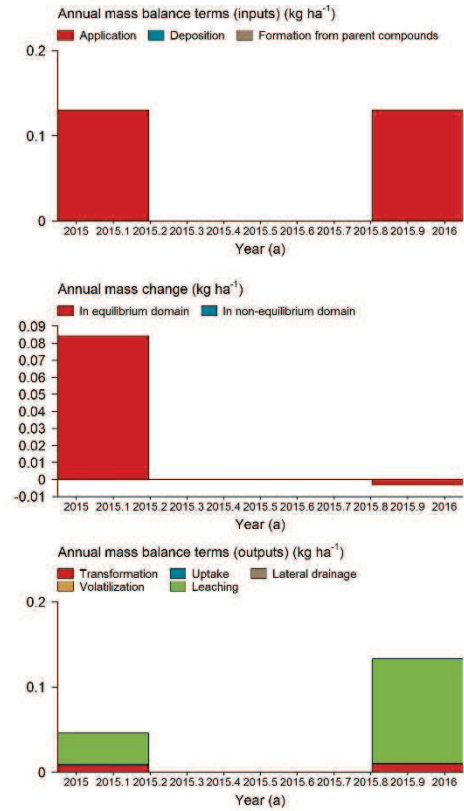
1.2. Bilan de dissipation de la matière active «flutriafol»

Flutriafol-Vigne-RGca, substance: Flu-B



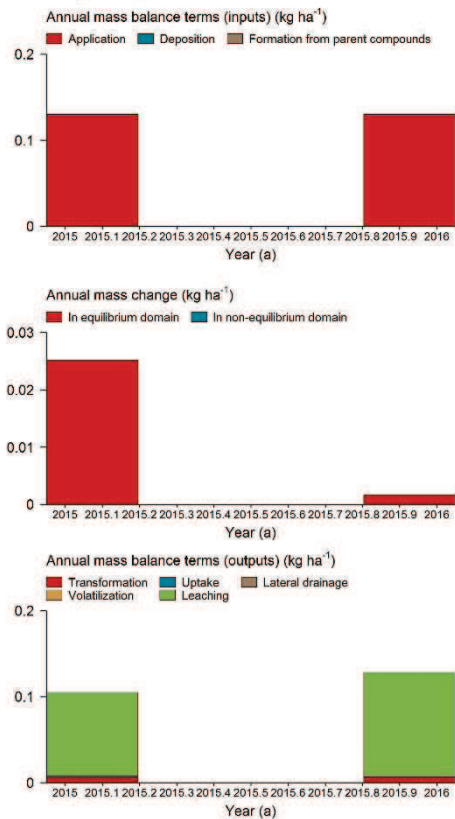
A

Flutriafol-Vigne-FLeu, substance: Flu-B



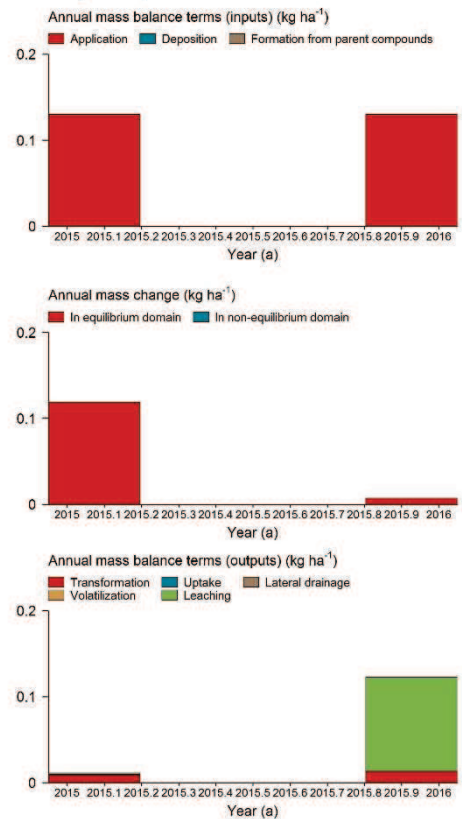
B

Flutriafol-Vigne-GLca, substance: Flu-B



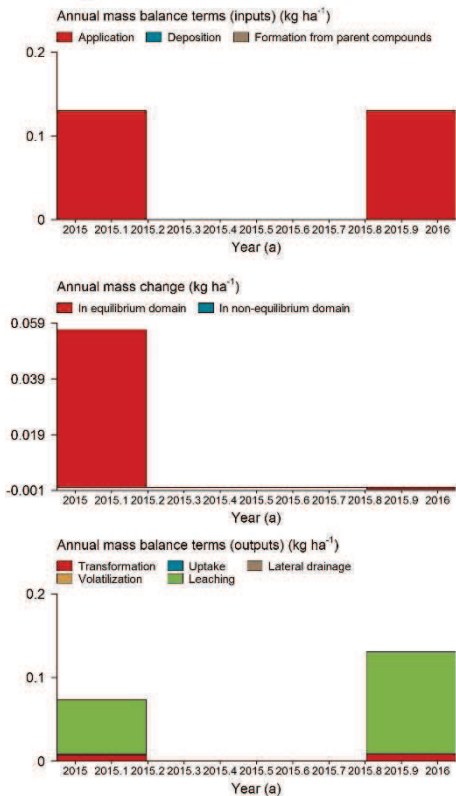
C

Flutriafol-Vigne-AReu, substance: Flu-B



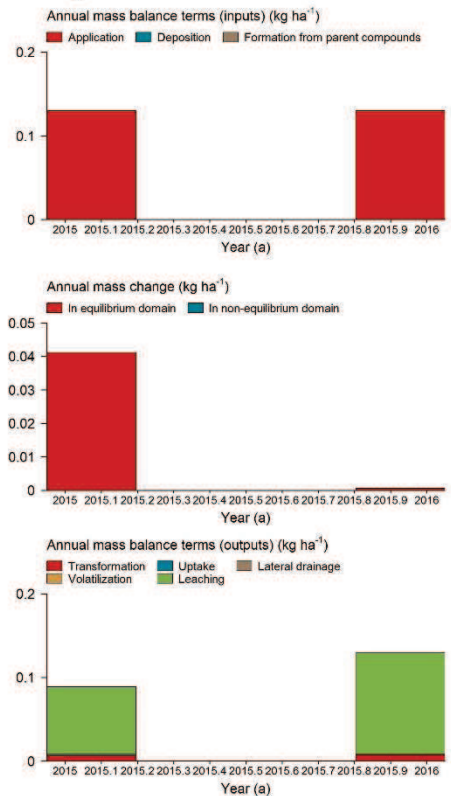
D

Flutriafol-Vigne-RGcu, substance: Flu-B



E

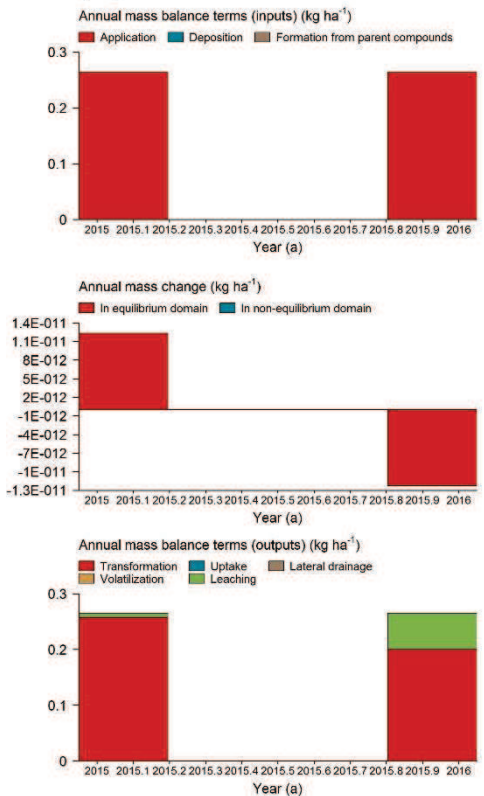
Flutriafol-Vigne-CMvr, substance: Flu-B



F

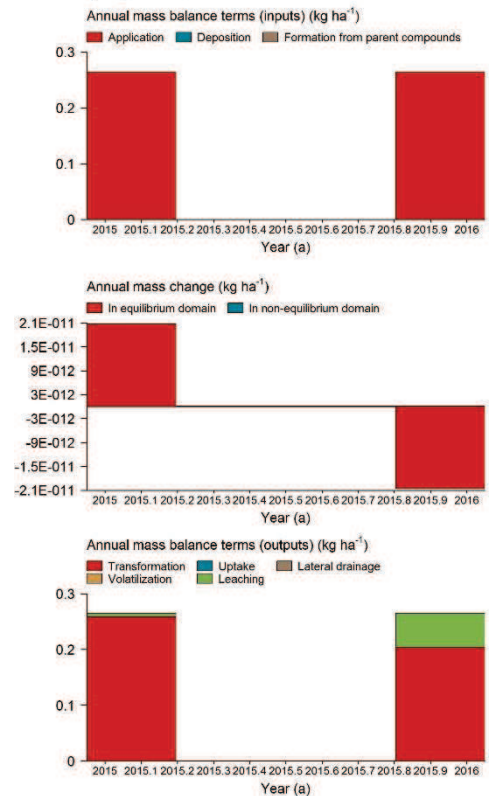
1.3. Bilan de dissipation de la matière active «Méthomyl»

Methomyl-Vigne-RGca, substance: Met-B



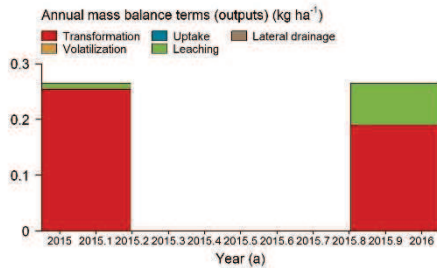
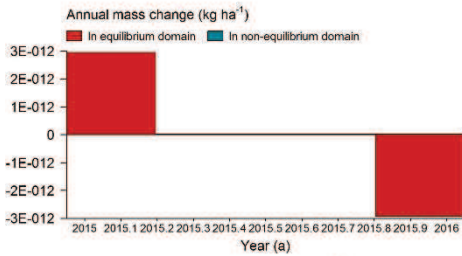
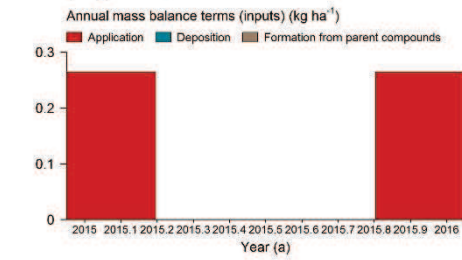
A

Methomyl-Vigne-FLeu, substance: Met-B



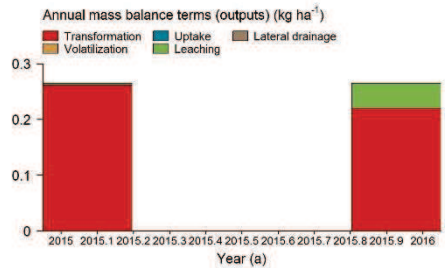
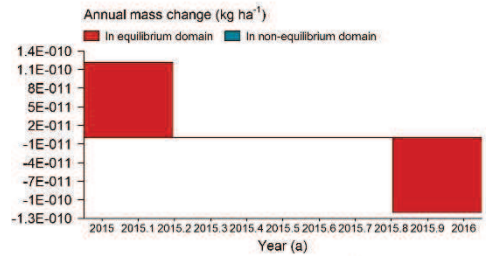
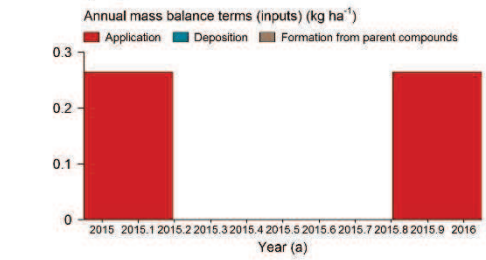
B

Methomyl-Vigne-GLca, substance: Met-B



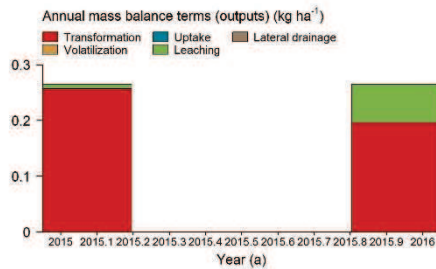
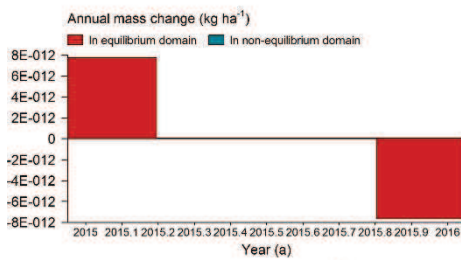
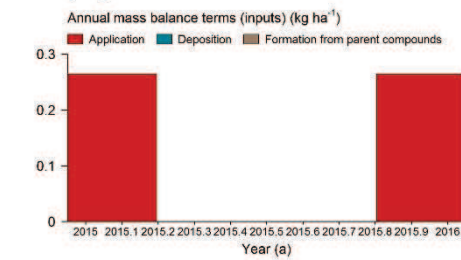
C

Methomyl-Vigne-AReu, substance: Met-B



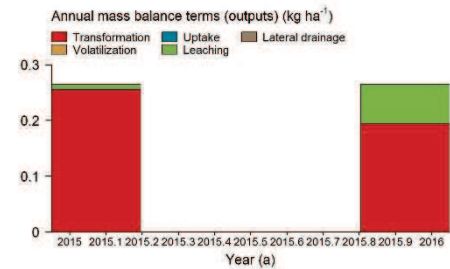
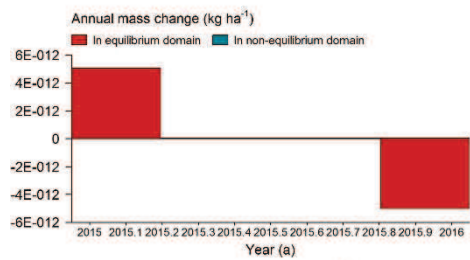
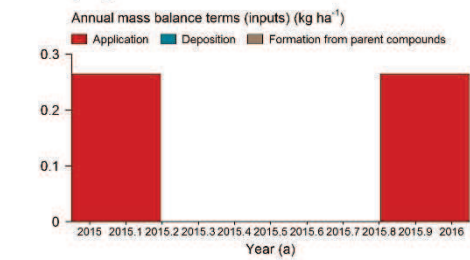
D

Methomyl-Vigne-RGeu, substance: Met-B



E

Methomyl-Vigne-CMvr, substance: Met-B



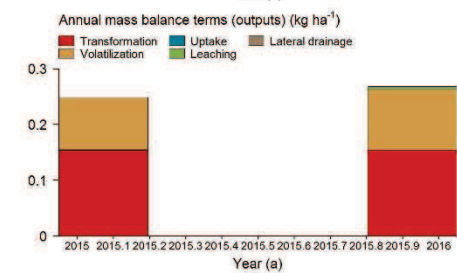
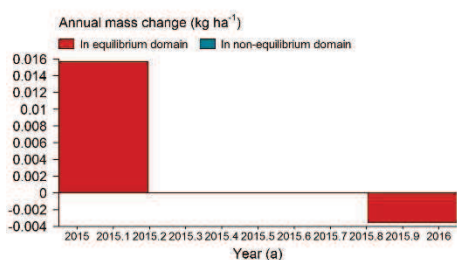
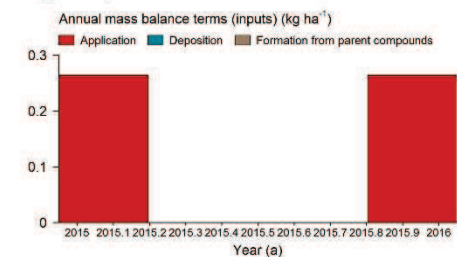
F

2. Pour la culture de pomme de terre

2.1. Bilan de dissipation de la matière active «chlorpyrifos-éthyl»

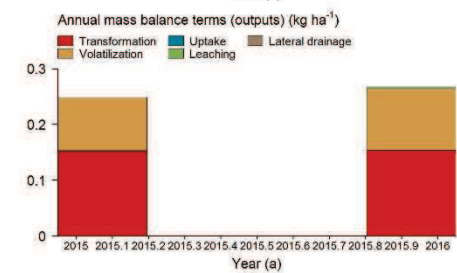
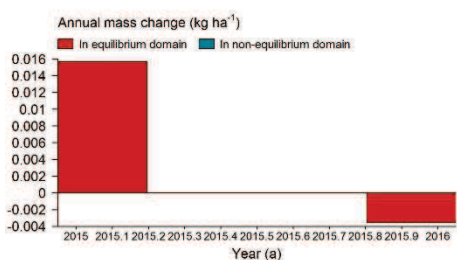
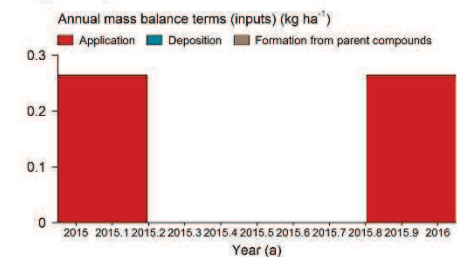
Les différents types de sol : A: sol argilo-limoneux, B: sol argilo-sableux, C: sol argilo-sablonneux, D: sol argileux, E: sol limoneux argilo-sableux et F: sol sableux)

Chlopyrifos Etyl-Pomme de terre-RGca, substance: CIP-B



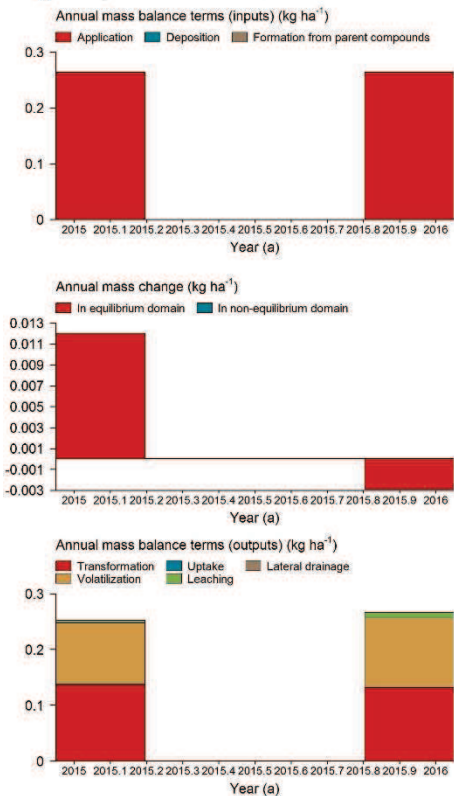
A

Chlopyrifos Etyl-Pomme de terre-FLeu, substance: CIP-B



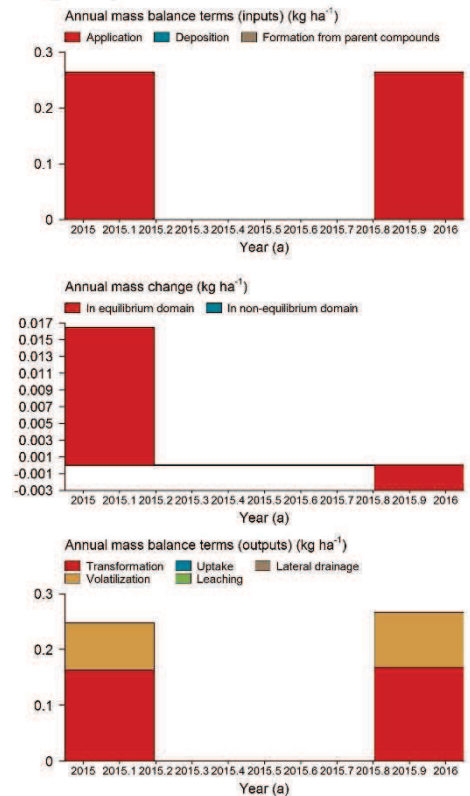
B

Chlopyrifos Etyl-Pomme de terre-GLca, substance: CIP-B



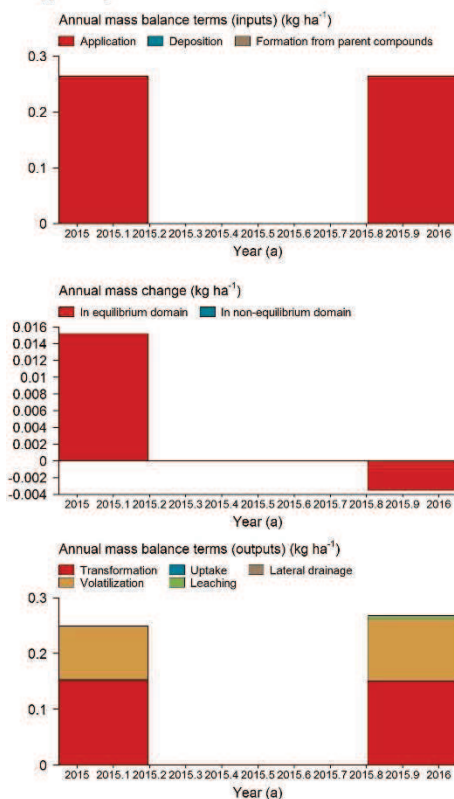
C

Chlopyrifos Etyl-Pomme de terre-AReu, substance: CIP-B



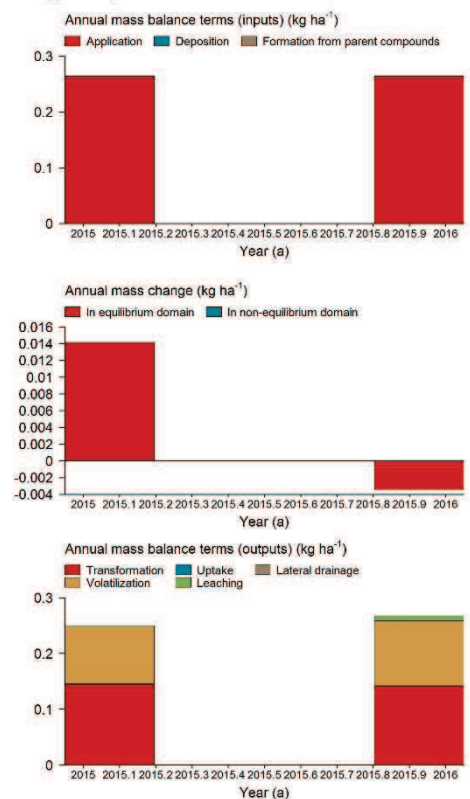
D

Chlopyrifos Etyl-Pomme de terre-RGcu, substance: CIP-B



E

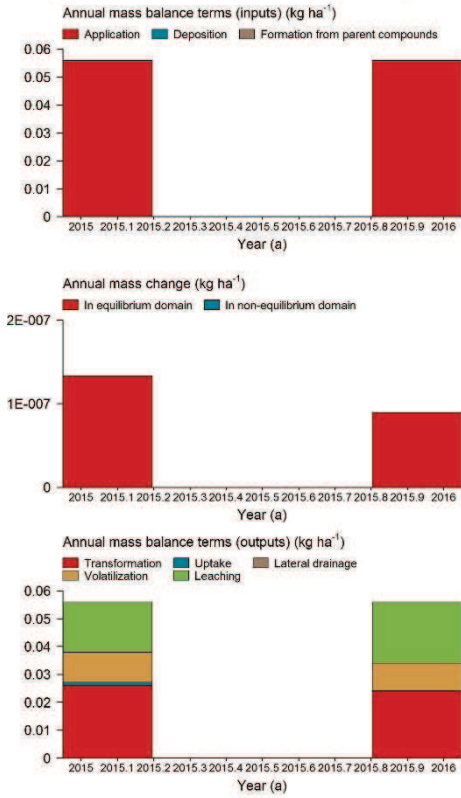
Chlopyrifos Etyl-Pomme de terre-CMvr, substance: CIP-B



F

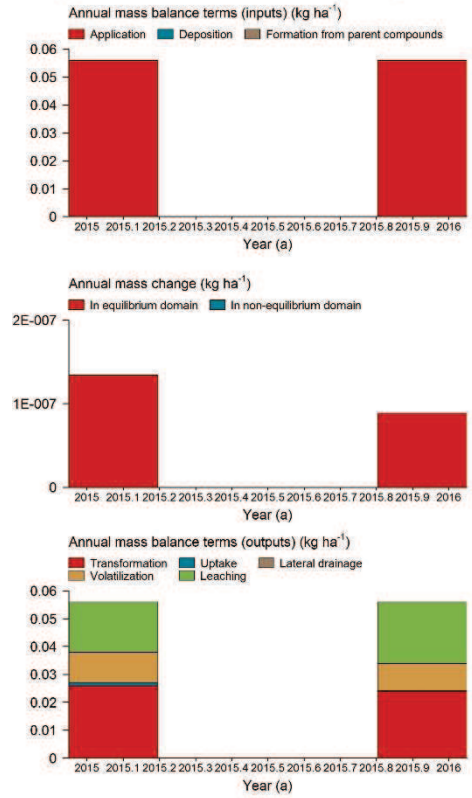
2.2. Bilan de dissipation de la matière active «alfa cyperméthrin»

Alfa Cyperméthrine-Pomme de terre-RGca, substance: ACy-B



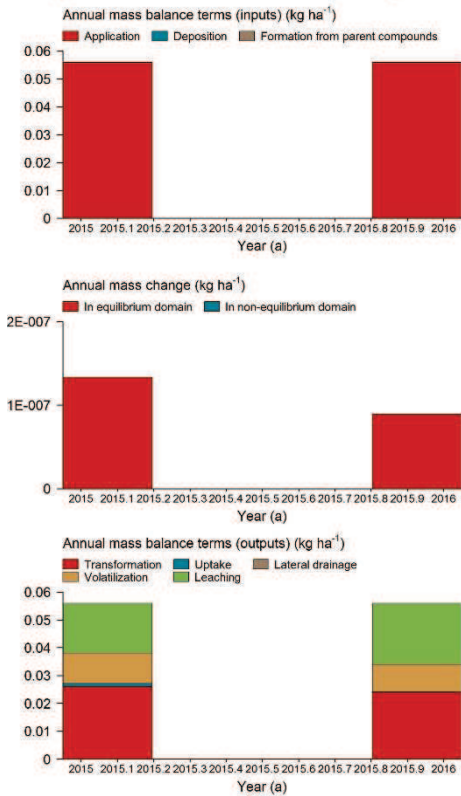
A

Alfa Cyperméthrine-Pomme de terre-FLeu, substance: ACy-B



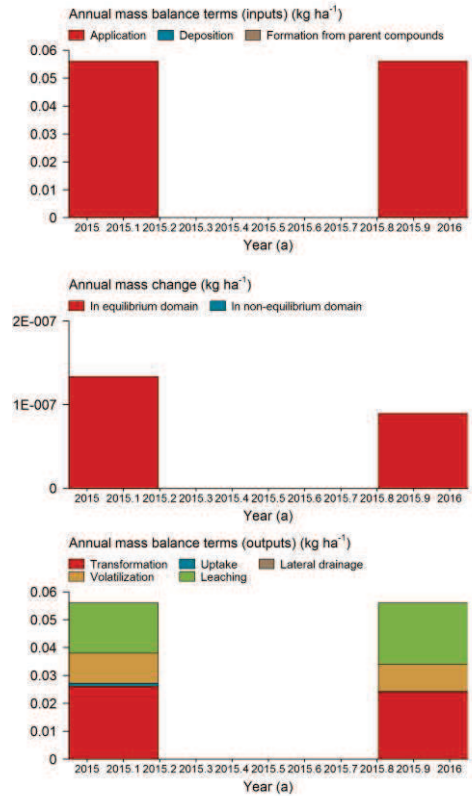
B

Alfa Cyperméthrine-Pomme de terre-GLca, substance: ACy-B



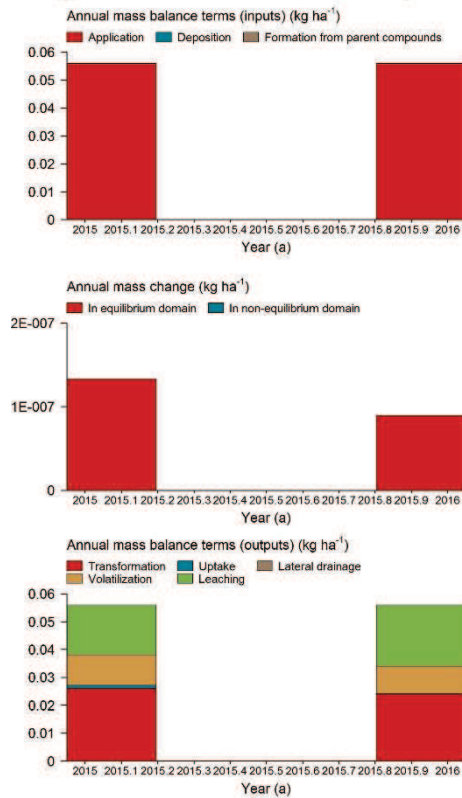
C

Alfa Cyperméthrine-Pomme de terre-AREu, substance: ACy-B



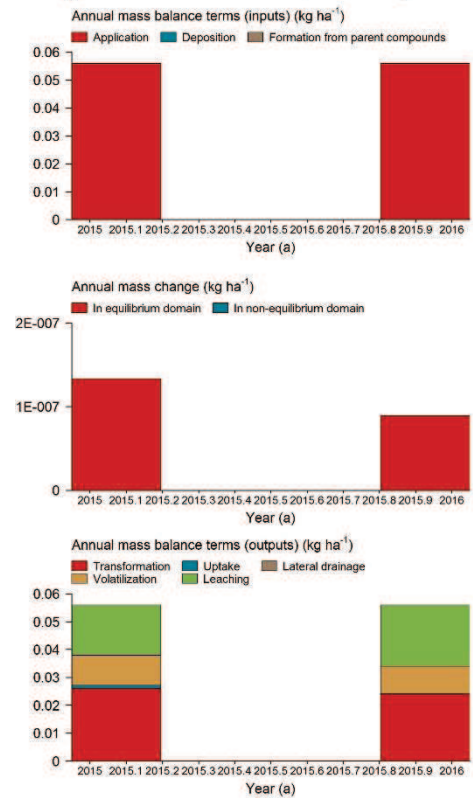
D

AlFA Cyperméthrine-Pomme de terre-RGeu, substance: ACy-B



E

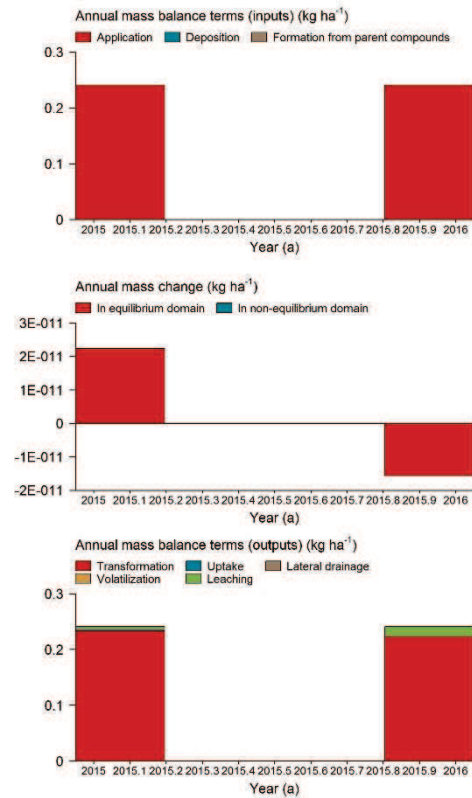
AlFA Cyperméthrine-Pomme de terre-CMvr, substance: ACy-B



F

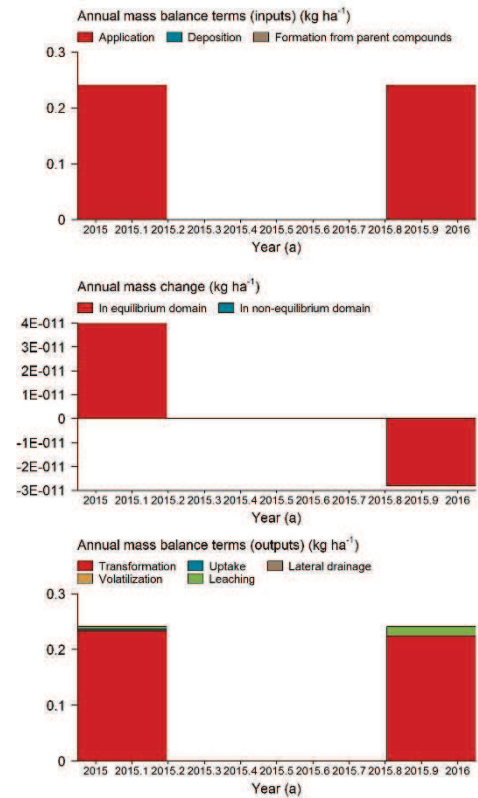
2.3. Bilan de dissipation de la matière active «méthomyl»

Méthomyl-Pomme de terre-RGca, substance: Met-B



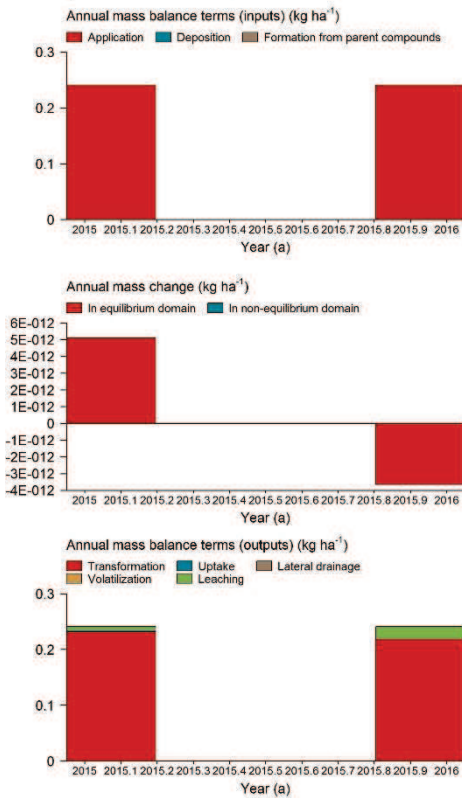
A

Méthomyl-Pomme de terre-FLeu, substance: Met-B



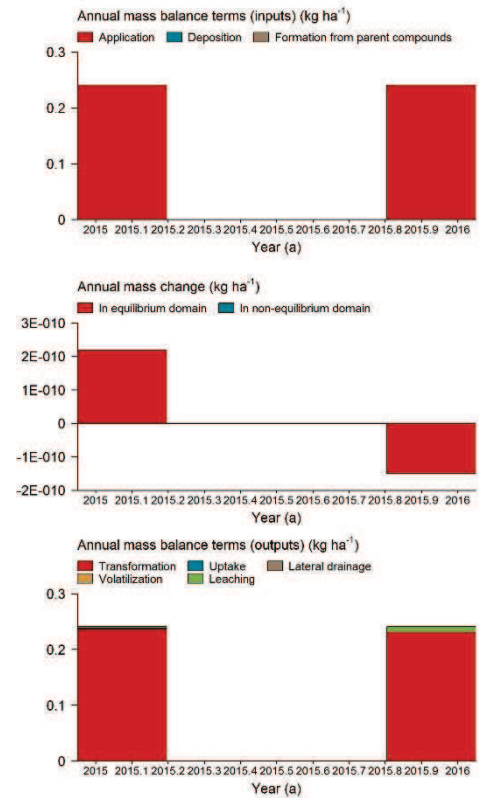
B

Methomyl-Pomme de terre-GLca, substance: Met-B



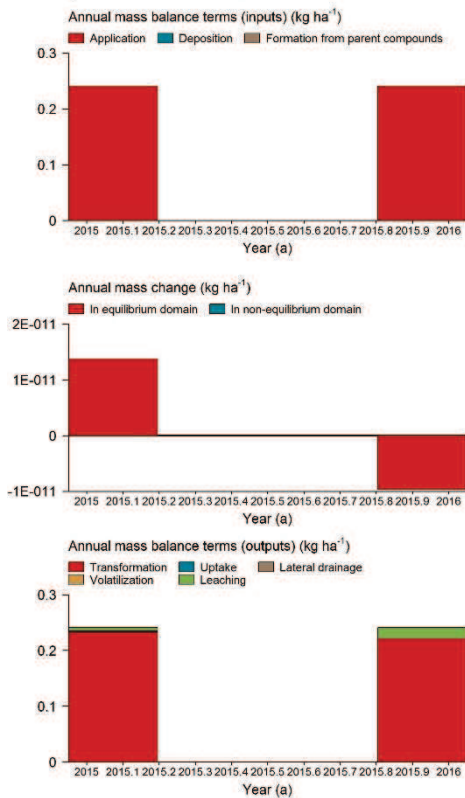
C

Methomyl-Pomme de terre-AReu, substance: Met-B



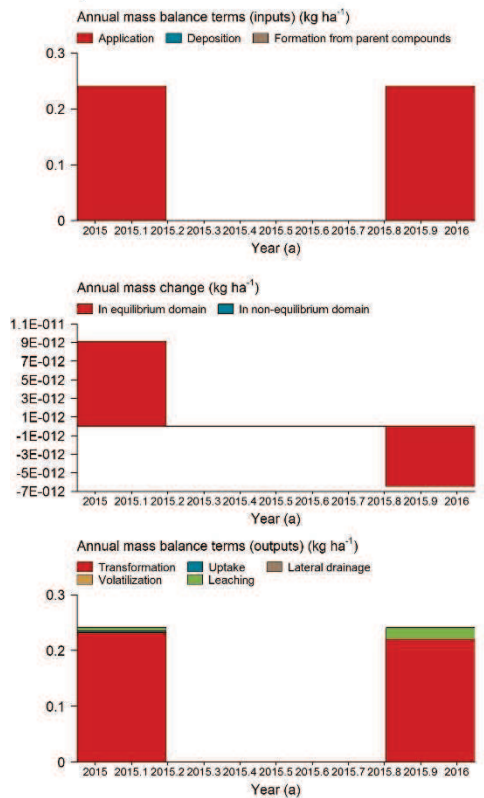
D

Methomyl-Pomme de terre-RGeu, substance: Met-B



E

Methomyl-Pomme de terre-CMvr, substance: Met-B

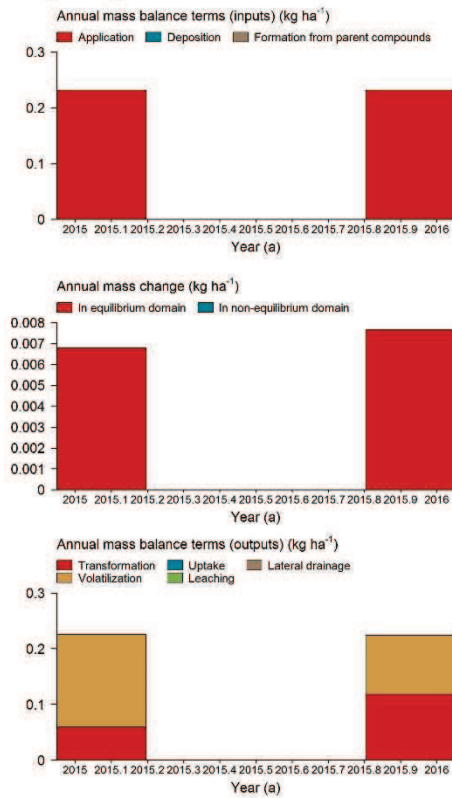


F

3. Pour la culture de pomme

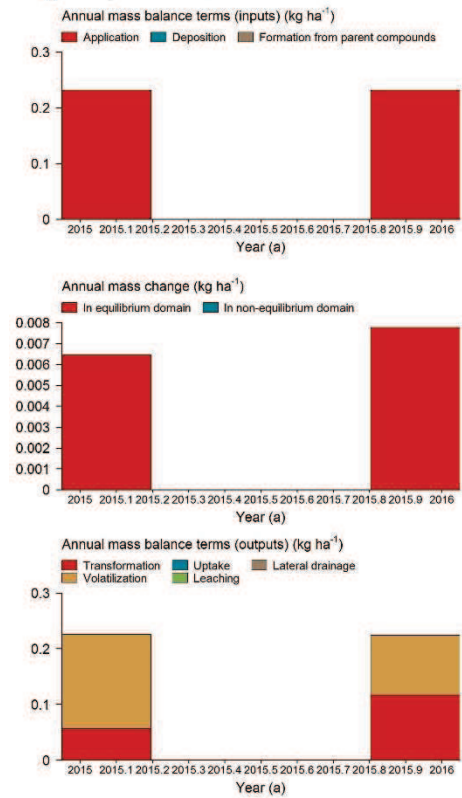
3.1. Bilan de dissipation de la matière active «chlorpyrifos-éthyl»

Chlorpyrifos Ethyl-Pomme-RGca, substance: CIP-B



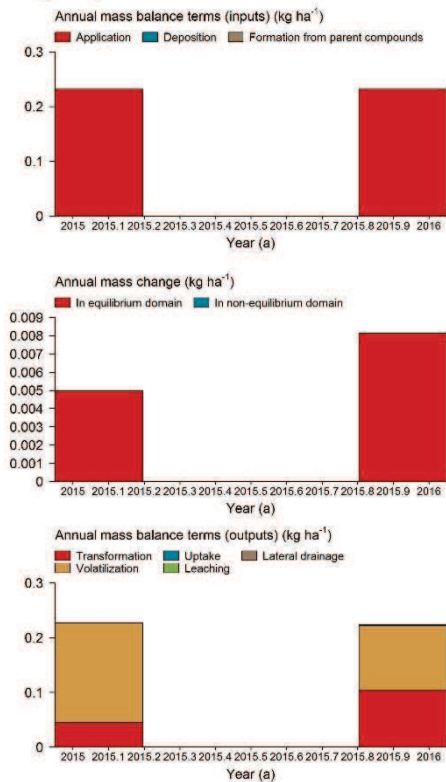
A

Chlorpyrifos Ethyl-Pomme-FLEu, substance: CIP-B



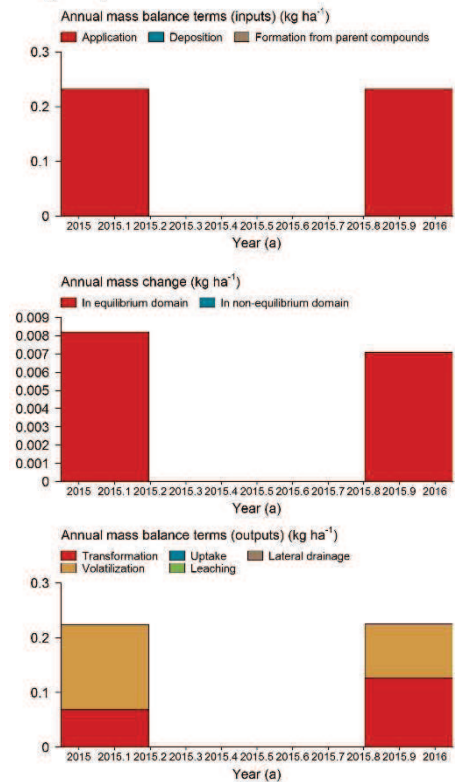
B

Chlorpyrifos Ethyl-Pomme-GLca, substance: CIP-B



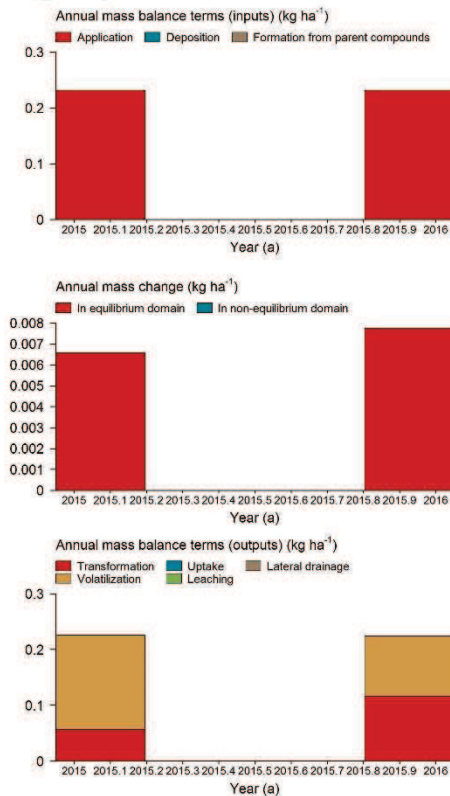
C

Chlorpyrifos Ethyl-Pomme-AREu, substance: CIP-B



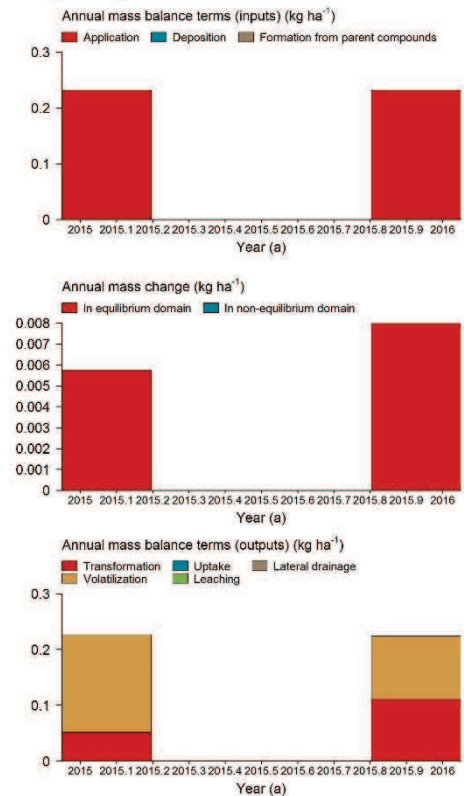
D

Chlorpyrifos Etyl-Pomme-RGeu, substance: CIP-B



E

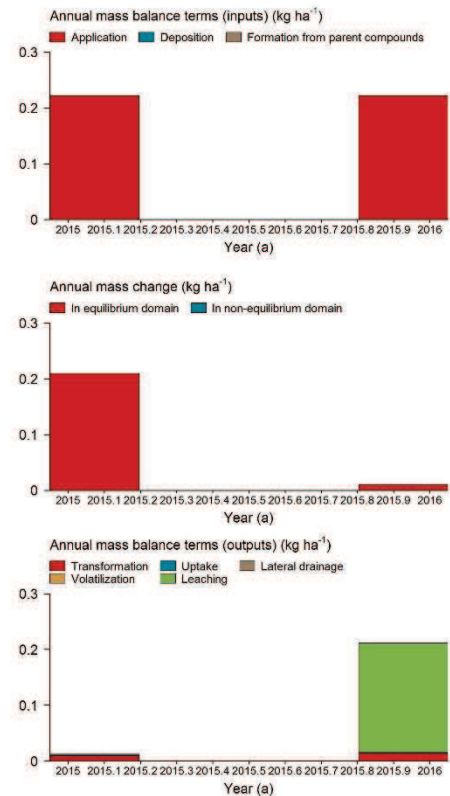
Chlorpyrifos Ethyl-Pomme-CMvr, substance: CIP-B



F

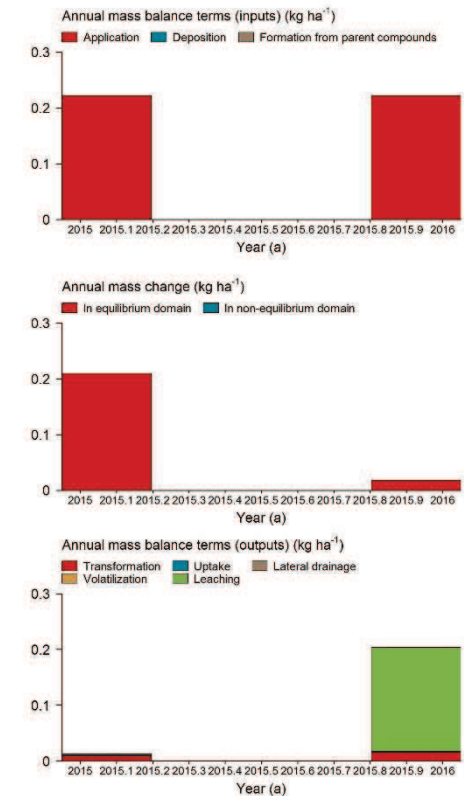
3.2. Bilan de dissipation de la matière active «flutriafol»

Flutriafol-Pomme-RGca, substance: Flu-B



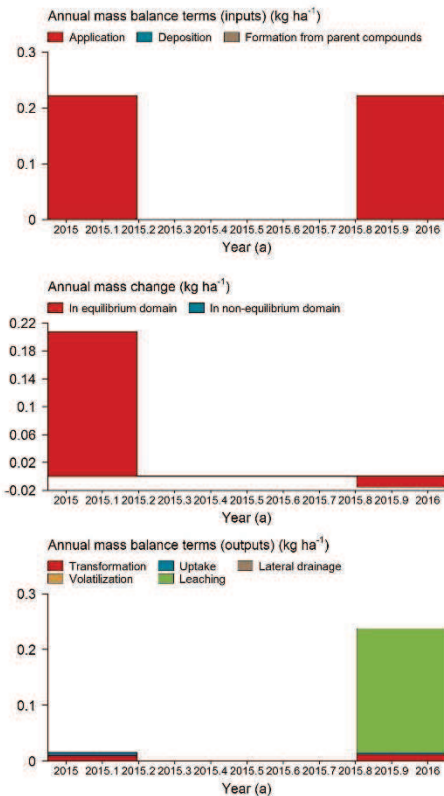
A

Flutriafol-Pomme-FLeu, substance: Flu-B



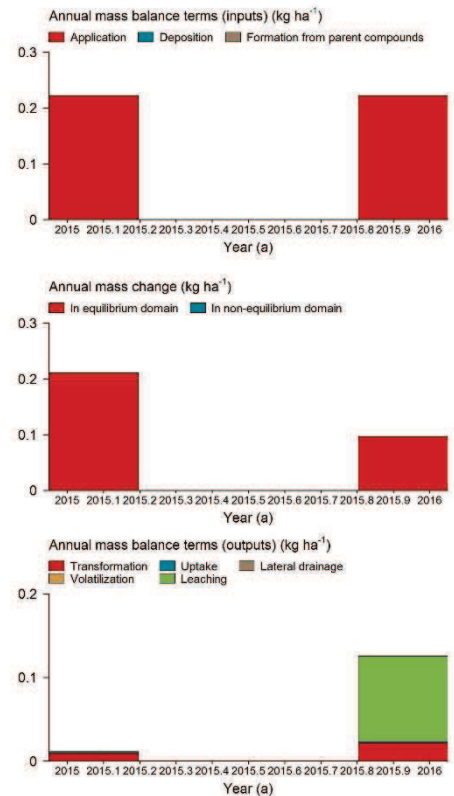
B

Flutriafol-Pomme-GLca, substance: Flu-B



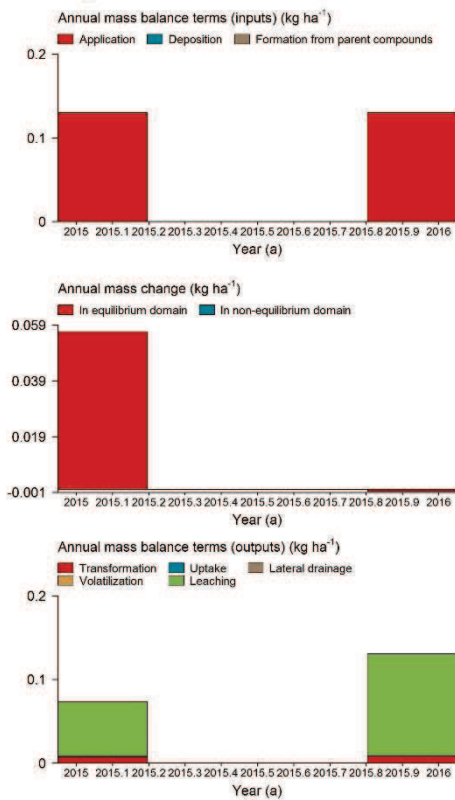
C

Flutriafol-Pomme-AReu, substance: Flu-B



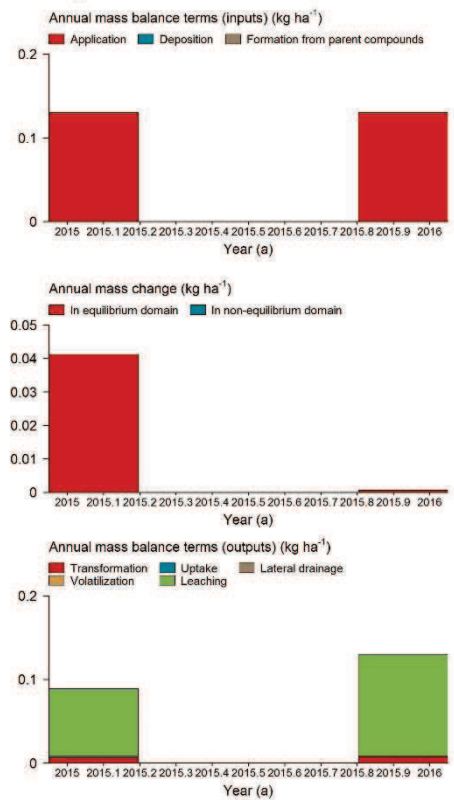
D

Flutriafol-Vigne-RGeu, substance: Flu-B



E

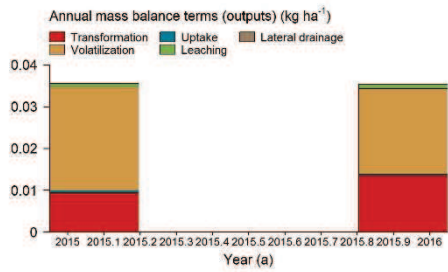
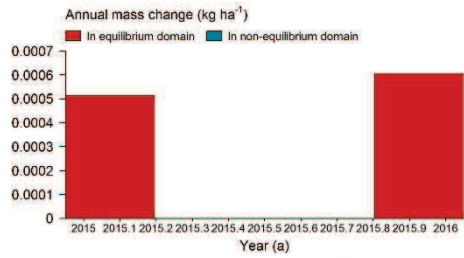
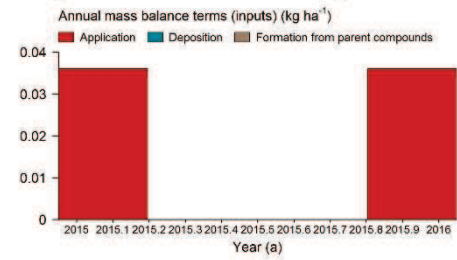
Flutriafol-Vigne-CMvr, substance: Flu-B



F

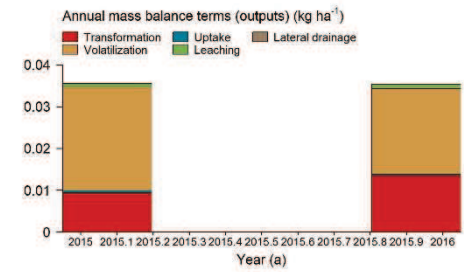
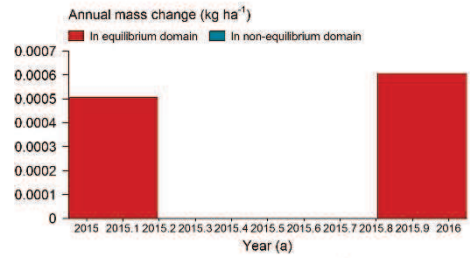
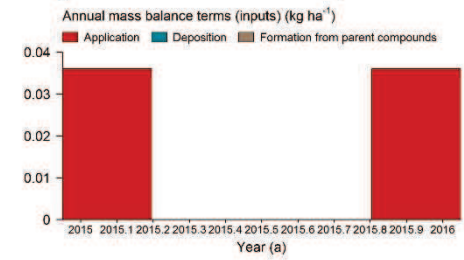
3.3. Bilan de dissipation de la matière active «alfa cyperméthrin»

AIFA Cyperméthrine-Pomme-RGca, substance: ACy-B



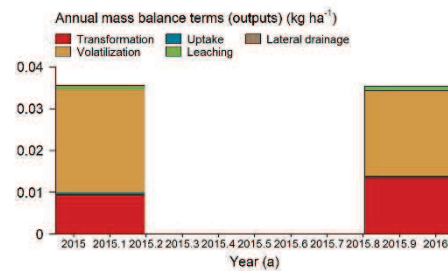
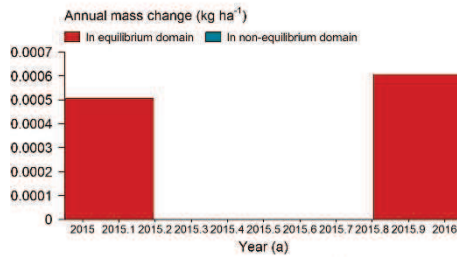
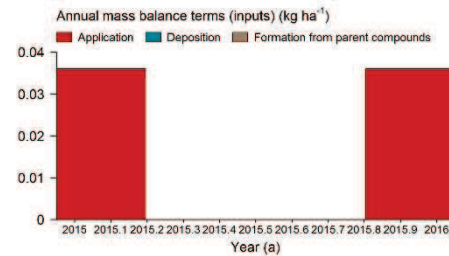
A

AIFA Cyperméthrine-Pomme-FLeu, substance: ACy-B



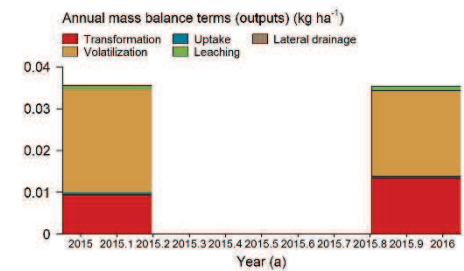
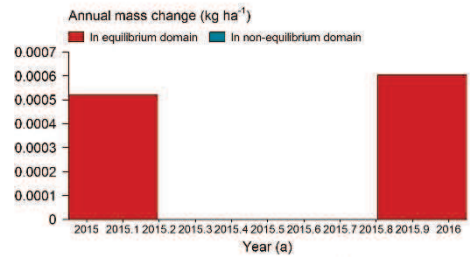
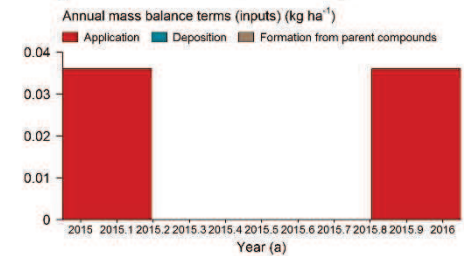
B

AIFA Cyperméthrine-Pomme-GLca, substance: ACy-B

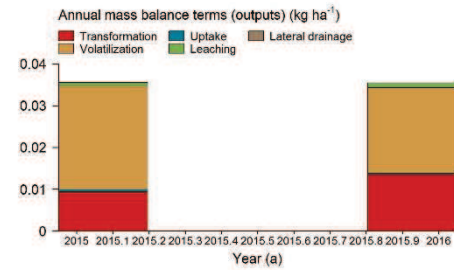
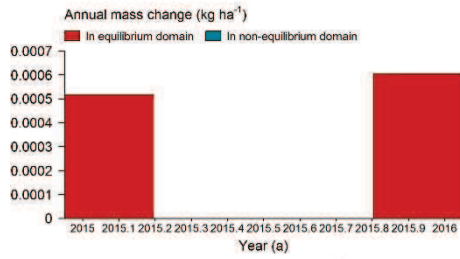
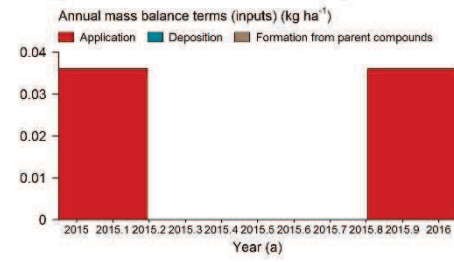


C

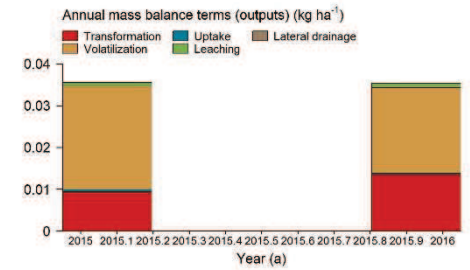
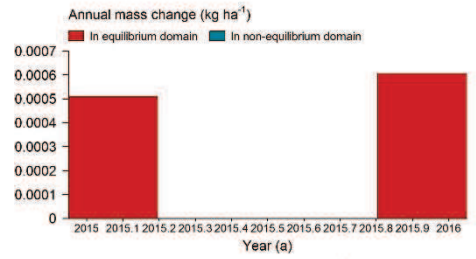
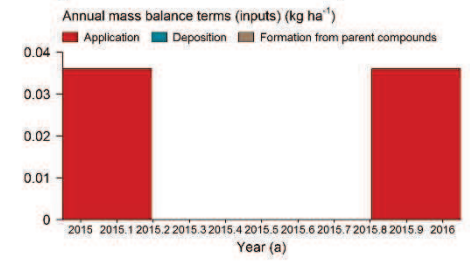
AIFA Cyperméthrine-Pomme-AReu, substance: ACy-B



D



E

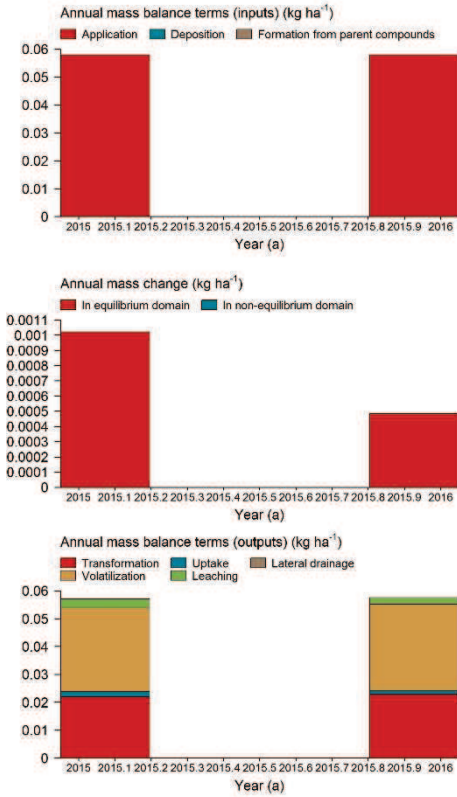


F

4. Pour la culture de cerise

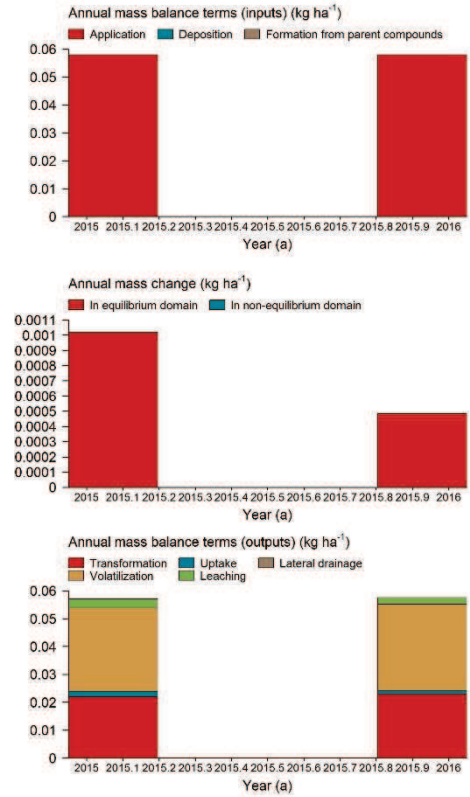
4.1. Bilan de dissipation de la matière active « alfa cyperméthrin »

Alfa Cyperméthrine-Cerise-RGca, substance: ACy-B



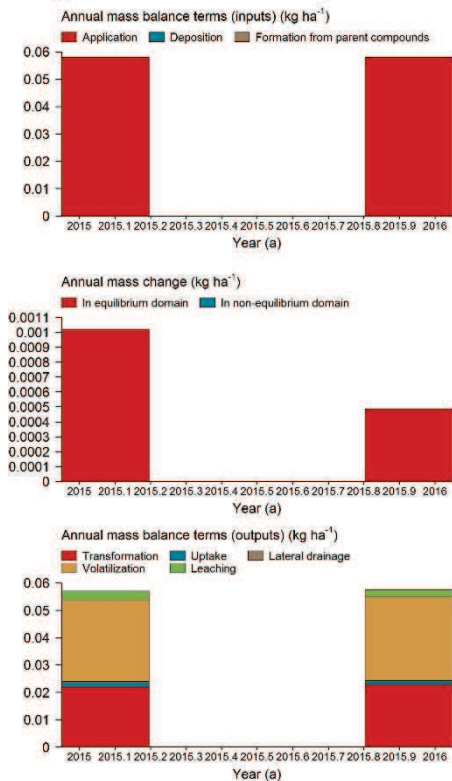
A

Alfa Cyperméthrine-Cerise-FLeu, substance: ACy-B



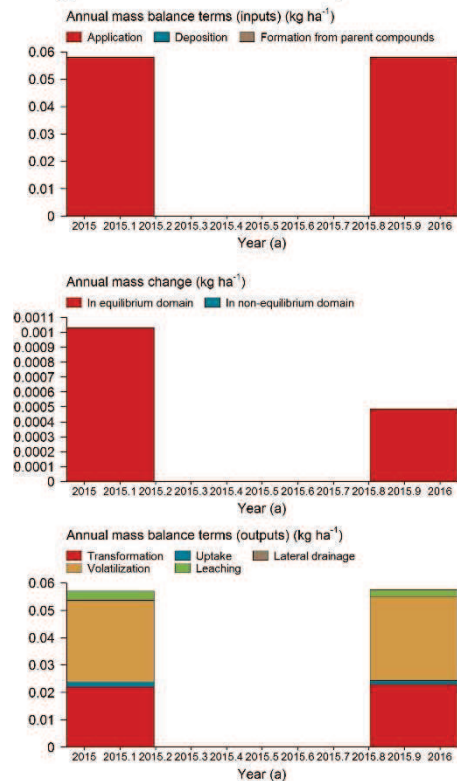
B

Alfa Cyperméthrine-Cerise-GLca, substance: ACy-B



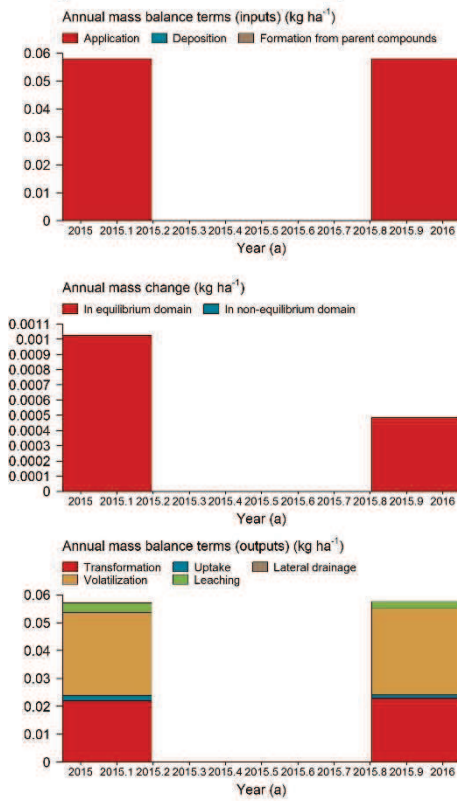
C

Alfa Cyperméthrine-Cerise-AReu, substance: ACy-B



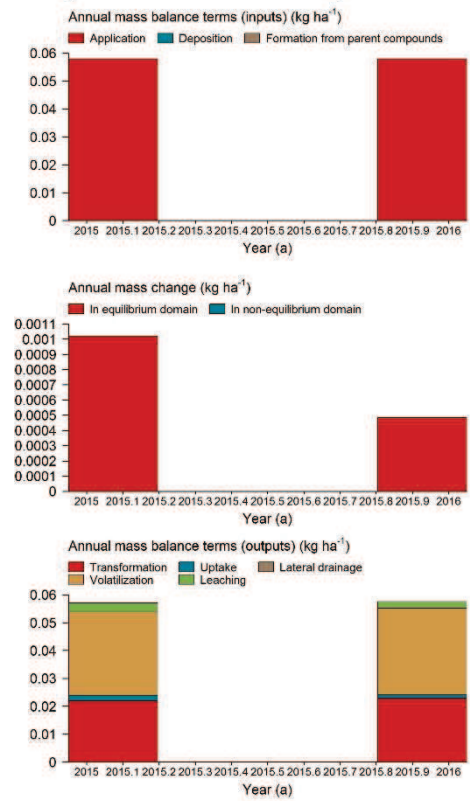
D

Alfa Cypermethrine-Cerise-RGcu, substance: ACy-B



E

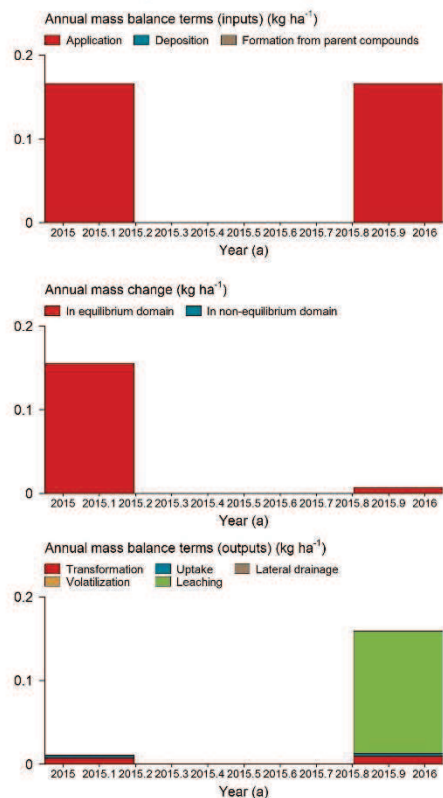
Alfa Cypermethrine-Cerise-CMvr, substance: ACy-B



F

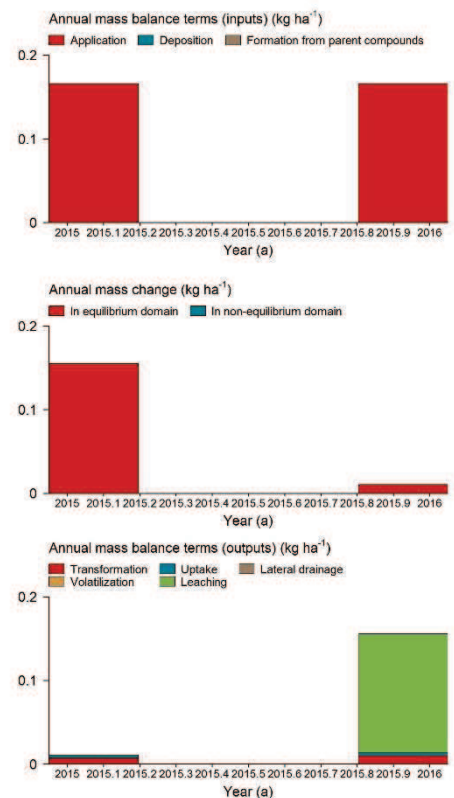
4.2. Bilan de dissipation de la matiere active « flutriafol »

Flutriafol-Cerise-RGca, substance: Flu-B



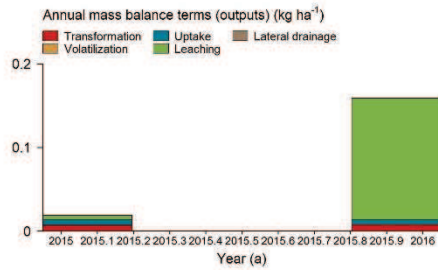
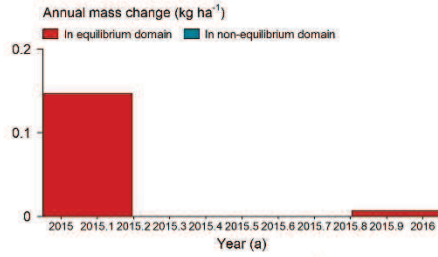
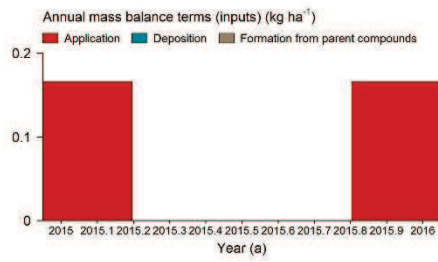
A

Flutriafol-Cerise-FLeu, substance: Flu-B



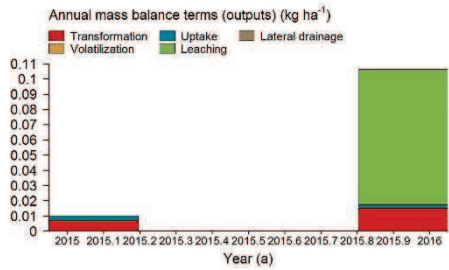
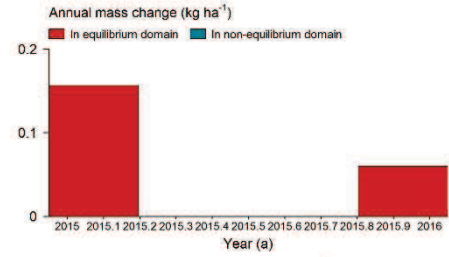
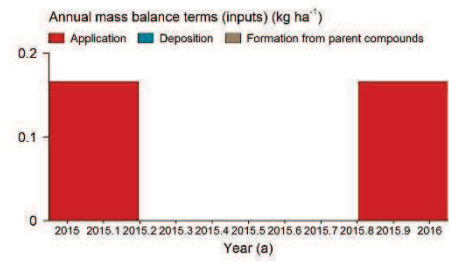
B

Flutriafol-Cerise-GLca, substance: Flu-B



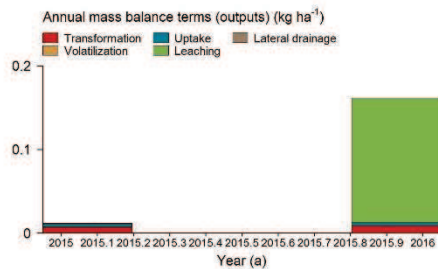
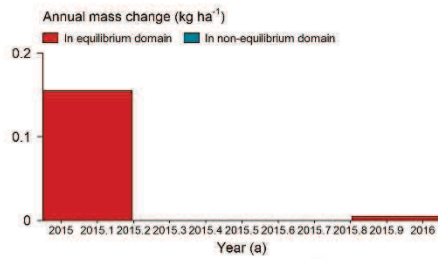
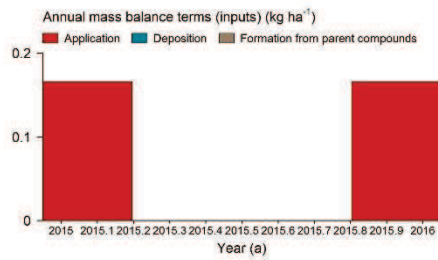
C

Flutriafol-Cerise-AReu, substance: Flu-B



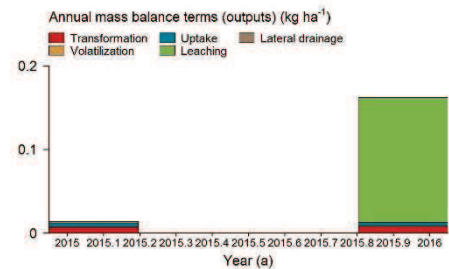
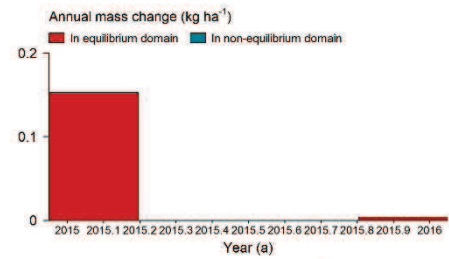
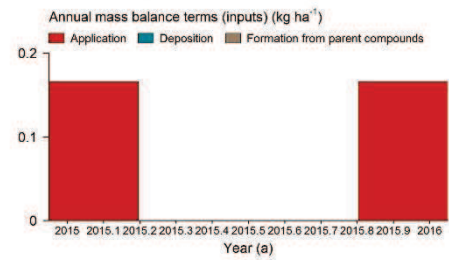
D

Flutriafol-Cerise-RGeu, substance: Flu-B



E

Flutriafol-Cerise-CMvr, substance: Flu-B



F

