



HAL
open science

Analyse des Variations Interannuelles des ventes de produits phytosanitaires et de l'indicateur NODU

Blanche Collard, Corentin Barbu, Rémy Ballot, Thomas Poméon, Philippe Martin, Christian Dron

► **To cite this version:**

Blanche Collard, Corentin Barbu, Rémy Ballot, Thomas Poméon, Philippe Martin, et al.. Analyse des Variations Interannuelles des ventes de produits phytosanitaires et de l'indicateur NODU. [Rapport de recherche] INRAE, UMR Agronomie et US ODR. 2020. hal-03503369

HAL Id: hal-03503369

<https://hal.inrae.fr/hal-03503369v1>

Submitted on 27 Dec 2021

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.

Rapport projet Avi-Nodu



Analyse des Variations Interannuelles des ventes de produits phytosanitaires et de l'indicateur NODU

18 décembre 2020

Blanche Collard - INRAE Agronomie et ODR

UMR INRAE AgroParisTech Agronomie
Bâtiment EGER - BP 01
78850 Thiverval-Grignon

US-ODR 0685
Observatoire du Développement Rural
Centre Occitanie-Toulouse
24, Chemin de Borde Rouge – Auzeville - CS

Comité de pilotage AVI-NODU / co-auteurs

Corentin Barbu - INRAE Agronomie
Rémy Ballot – INRAE Agronomie
Thomas Poméon – INRAE ODR
Philippe Martin - Professeur d'Agronomie AgroParisTech
Christian Dron - DRIAAF/SRAL Ile de France

Groupe de suivi du projet AVI-NODU

Lucile Gauchet - EARM5/ DGALN/DEB
Laurent Jacquiau - DGAL/SASPP/SDQSPV/BSPIC
Karine Belna - DGAL/SASPP/SDQSPV/BSPI

INRAE



Autres contributeurs mobilisés ponctuellement

De nombreuses personnes en plus du comité de pilotage et du groupe de suivi AVI-NODU ont contribué à la réalisation de ce rapport.

Laurence Guichard et Eric Cahuzac, initiateurs du projet AVI-NODU qui ont participé au lancement de ce travail.

Hazeme Mohamed (MTE) et Karine de Percin (MAA) avec qui nous avons échangé régulièrement et qui ont travaillé à la mise en place de bases de données sur lesquelles nous nous sommes appuyés dans ce rapport.

Carole Toque (MAA) qui a suivi nos analyses avec intérêt et avec qui nous avons eu des échanges nourris autour de la visualisation et la manipulation de la base de données BNV-d.

Camille Truche, post-doctorante de l'unité ODR en 2019 qui a participé à la transmission de données d'occupation des sols et de connaissances sur la BNV-d, ainsi que Lovasoa Ramalanjaona qui a pris sa suite en 2020.

Les **membres du comité de pilotage étendu** qui ont donné leur avis et fait des suggestions sur le projet au cours de réunions de travail qui ont eu lieu à deux reprises en novembre 2019 et 2020.

Ces membres comprennent des membres du comité de pilotage restreint, des personnes citées précédemment, des personnes de l'OFB (Nolwenn Bougon), de l'INERIS (Laure Malherbe) du CGDD (Sandrine Parisse) et de l'ANSES (Ohri Yamada et Adrien Jean).

Les **chargés de projet Ecophyto régionaux et autres partenaires Ecophyto** pour leurs réponses à deux sollicitations.

Nous les avons sollicités en début de projet pour obtenir un retour sur leur usage de la BNV-d et du NODU ainsi que leurs besoins associés. Nous avons eu des réponses de 8 régions (Auvergne-Rhône-Alpes, Bretagne, Centre-Val-de-Loire, Grand-Est, Haut-de-France, Ile-de-France, Normandie, Pays-de-la-Loire et Guyane). Nous avons également eu un échange plus approfondi avec Hervé Jocaille et Etienne Simon (DREAL Pays-de-la-Loire). Nous les avons également sollicités en milieu de projet

pour obtenir des exemples de substitutions et avons reçu 5 retours (DRAAF-SRAL IDF, Auvergne - Rhône-Alpes, Bretagne et ANSES).

Adrien Jean (ANSES) pour ses éclairages sur la base EPHY

Patrice Marchand (ITAB) pour l'envoi et la gestion de la liste des produits autorisé en Agriculture Biologique

Martin Strugarek (DMAA) pour les échanges sur la base de données Epiphyt.

Sigles et abréviations

AB : Agriculture Biologique

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BNV-d : Banque Nationale de données des Ventes des distributeurs agréés de produits phytosanitaires

CEPP : Certificat d'Economie de Produits Phytopharmaceutique

CAS : Chemical Abstracts Service. Le numéro CAS est le numéro d'enregistrement unique de substances chimiques, polymère, séquence biologique ou alliage auprès de la banque de données du même nom.

DGAL : Direction Générale de l'ALimentation

DRAAF : Directions Régionales du ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et la Forêt

DREAL : Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DH : Dose Homologuée

EAJ : Emploi Autorisé dans les Jardins

IFT : Indice de Fréquence de Traitements phytosanitaires

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

INRAE : Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

MAA : Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation

MTE : Ministère de la Transition Écologique

NODU : Nombre de DOses Unité

ODR : Observatoire du Développement Rural, unité de recherche INRA.

PAC : Politique Agricole Commune

QSA : Quantités de Substances Actives

RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole

RPD : Redevance pour Pollutions Diffuses

RPG : Registre Parcellaire Graphique

SA : Substance Active

SAU : Surface Agricole Utile

STH : Surface Toujours en Herbe

UIPP : Union des Industries de la Protection des Plantes

Table des matières

Autres contributeurs mobilisés ponctuellement	2
Sigles et abréviations	4
Table des matières	6
Introduction	11
Partie 1 : Déterminants internes des variations de mesures des ventes de produits phytosanitaires.	14
1.1. Indicateurs associés à la BNV-d	15
1.1.1. QSA	15
1.1.2. NODU	17
1.1.3. Segments et ventilation des AMM	18
1.1.4. Déclinaison des indicateurs dans l'espace, le temps et autres critères	24
1.1.5. Effet de la méthodologie de calcul et de la variation de Doses Unités de référence	27
Variation interannuelle des différentes DU de référence calculées	28
Variation interannuelle du NODU selon les différentes DU de référence calculées	29
Signification des valeurs de DU 2017	30
Composition des indicateurs en termes de DU (2017) et évolution.	37
1.1.6. Comparaison et mise en perspective des indicateurs QSA et NODU	39
1.2. Acquisition et caractéristiques des données de la BNV-d	44
1.2.1. Présentation de générale de la BNV-d	45
1.2.2. Temporalité d'accès à des données stabilisées de la BNV-d	46
1.2.3. Evolution des catégories de produits prises en compte et de la résolution spatiale et temporelle de la BNV-d	47
Résolution temporelle	50
Résolution spatiale	50
1.2.4. Fiabilité des données enregistrée	52
Fiabilité des données Registre par rapport aux données Bilan	52
Ventes du Registre non localisés : codes postaux non renseignés ou erronés	55
Achat à l'étranger	58
Différences de localisations des ventes entre la BNV-d Bilan et Registre	61
Autres sources de variations temporelles : les ventes aux amateurs	63
Substances non soumises à RPD	65
Quantités de substances non renseignées	66
Autres données relatives aux substances	67
Erreurs ponctuelles de saisies	67
Synthèse des biais	69
1.3. Des ventes aux utilisations	72
1.3.1. Décalage temporel	73

1.3.2.	Décalage spatial	73
1.3.3.	Gestion des décalages	77
Partie 2 : Déterminants externes des variations des ventes de produits phytosanitaires dans la BNV-d		
	79	
2.1.	Effet des autorisations et des interdictions des produits phytosanitaires	80
2.1.1.	Contexte	80
2.1.2.	Matériels et méthodes	81
2.1.3.	Résultats et discussion	84
	Effet du statut d'autorisation des produits et substances actives sur leurs ventes	84
	Analyse au grain des produits commerciaux (AMM)	84
	Analyse au grain des substances actives	87
	Effet des interdictions de substances sur la totalité des ventes	88
	Interdiction et substitution de substances	92
2.2.	Effets des augmentations de redevances pollution diffuse	97
2.2.1.	Introduction	97
2.2.2.	Matériel et Méthodes	99
	Test de Fisher	100
	Modèle linéaire	101
2.2.3.	Résultats et discussion	102
2.3.	Effet de l'évolution des surfaces agricoles certifiées en Agriculture Biologique	108
2.3.1.	Introduction	108
2.3.2.	Matériels et méthodes	108
2.3.3.	Résultats et discussion	110
2.4.	Effet de l'assolement et des bioagresseurs	115
2.4.1.	Introduction	115
2.4.2.	Matériels et méthodes	117
	Démarche générale de compréhension de l'évolution des ventes	117
	Unités d'agrégation de la BNV-d	117
	Approche globale et Mobilisation d'exemples	118
	Ventes de produits phytosanitaires	118
	Fonction des substances	120
	Occupations des sols	123
	Pressions de bioagresseurs	124
	Analyses statistiques	130
	Modèles de régression linéaire pénalisés de type LASSO	130
	Variables à expliquer et variables explicatives testés	131
	Contraintes sur les estimations des modèles LASSO	133
	Evaluation des modèles	133
	Synthèse des résultats par modèle	135

Logiciel et packages mobilisés	137
Analyse préliminaire des résultats des modèles en terme d'utilisation	137
2.4.3. Résultats et discussion	138
Exemples de substances actives	138
Chlorothalonil	138
Glyphosate	145
Soufre	148
Cyperméthrine	151
Expliquer les variations des ventes par les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs	155
Effet de l'occupation du sol et de la pression de bioagresseurs selon les unités d'agrégation de la BNVD	155
Observations générales sur les différents niveaux d'agrégation	155
Focus sur les agrégations par fonction	160
Parts de variations expliquées respectivement par l'occupation du sol et par les bioagresseurs	162
Présentation des résultats	162
Interprétation des résultats	167
Variabilité interannuelle expliquée	169
Explication des variations interannuelles par le modèle de référence	169
Amélioration de l'explication des variations interannuelles avec l'effet des PRA	171
Effet des PRA sur le NODU	172
Effet de l'ajout des PRA sur la prise en compte des bioagresseurs	174
Analyse préliminaire des résultats des modèles en terme d'utilisation	176
Relations entre coefficients obtenus pour le NODU total et IFT	176
Le NODU et ses déclinaisons répartis par filières	182
Sorties d'intérêt pour le suivi des utilisations de produits phytosanitaires	187
Vers un NODU filière ?	187
PRA plus ou moins consommatrices ?	190
2.5. Discussion	191
2.5.1. Explication de la variations des ventes de produits phytosanitaires	191
2.5.2. Observations diverses	192
2.5.3. Pour aller plus loin	193
Amélioration du modèle $\sim OS + BA + PRA$	193
Comparaison des résultats des modèles avec d'autres sources de données	194
Enrichissement du modèle $\sim OS + BA + PRA + \dots$	195
2.5.4. Prise en compte des déterminants internes pour l'analyse des déterminants externes	196
Retour sur les actions menées en complément du rapport	198

Conclusion générale	199
Annexes	201
Annexe A : Synthèse des retours de la DRAAF et DREAL	201
Annexe B : Autres données mobilisées	202
B.1. E-PHY	202
B.2. Table des segments de chaque produits phytosanitaire	205
B.3. Table des Doses Unités de chaque substance	205
B.4. Table des fonctions de chaque substance	207
B.5. Table des CMR de chaque substance	208
B.6. Statistiques Agricoles Annuelles (SAA)	209
B.7. Registre Parcellaire Graphique (RPG)	209
B.8. Cartographie de l'occupation du sol ODR 2014	212
B.9. Cartographie reconstruite de l'occupation du sol entre 2013 et 2018 dans les PRA et les CP 215	
B.10. Table des Redevance Pollution Diffuse (RPD) selon les années	219
B.11. Cartographie numériques	219
Communes	219
Petite Région Agricole (PRA)	220
B.12. Table reliant les codes postaux aux codes communes INSEE	220
B.13. Table reliant les codes communes INSEE, les PRA et les échelles supérieures	224
Annexe C : Champs disponibles dans la BNV-d Bilan et Registre	225
Annexe D : Répartition des ventes sur les codes INSEE des communes	227
Annexe E : Liste des substances de la BNV-d Registre et Bilan qui ont toujours une quantité de substance (en kg) nulle	230
Annexe F : Listes des substances et AMM qui ont une quantité nulle certaines années seulement	231
Annexe G : Top 15 des substances et AMM qui ont un $R^2_{\text{ajusté}} < 0.05$	231
Annexe H : R^2 temporel et R^2 spatial	233
H.1. Objectifs	233
H.2. Matériels et Méthodes	233
H.3. Résultats	234
Annexe I : Cartes des coefficients PRA obtenus pour les modèles sur les NODU par fonction	239
NODU herbicides	239
NODU fongicides	239
NODU insecticides	240
NODU substances de croissance	240
Annexe J : Intégralité des variations prédites pour chaque PRA et chaque années pour les modèle sur le NODU total et ses déclinaisons	241
NODU total	241

NODU <i>herbicides</i>	242
NODU <i>fongicides</i>	243
NODU <i>insecticides</i>	244
NODU <i>substances de croissance</i>	245
Annexe K : Synthèse des valeurs obtenues pour les coefficients PRA du modèle NODU ~ OS + BA + PRA	246
Annexe L : Argumentation pour la simplification du calcul du NODU	247
Références	250

Introduction

Le plan Ecophyto, mis en place en 2008, est le plan d'actions national visant la réduction de l'utilisation en produits phytosanitaires¹. Ce plan est la déclinaison française de la DIRECTIVE 2009/128/CE (21 octobre 2009) instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable. Conformément aux articles 4 et 15 de cette directive, le plan intègre un volet sur le suivi de l'utilisation en produits phytosanitaires par l'intermédiaire d'indicateurs et d'analyses statistiques. Les deux indicateurs de référence sont le NOMBRE de Doses Unités (NODU) et la Quantité totale de Substances Actives (QSA) (cf. définition **section 1.1.1** et **1.1.2**). Ils sont calculés annuellement à partir de la Banque Nationale des Ventes de produits phytosanitaires par les Distributeurs agréés (BNV-d), base de données mise en place par la loi n°2006-1772 sur l'eau et les milieux aquatiques, qui recense les ventes annuelles sur l'ensemble de la France. Si ces indicateurs permettent une mesure synthétique des quantités et de leurs évolutions, il reste à mieux identifier et comprendre les différentes causes expliquant leurs variations et leurs poids relatifs. C'est en effet l'une des principales préoccupations et attentes exprimées par les chargés de missions et les instances en charge du pilotage du plan Ecophyto (MAA², MTE³, DRAAF⁴, DREAL⁵, ...), qui ont besoin de connaître les déterminants des variations pour évaluer l'efficacité des politiques publiques et établir des leviers d'actions pertinents (voir synthèse des sollicitations **Annexe A**).

Un certain nombre de travaux ont déjà été entrepris au moyen de cette base de données. Un premier bilan de l'effet des mesures prises par le plan Ecophyto a ainsi pu être établi (Hossard et al., 2017). Des cartes de répartitions des ventes des produits phytosanitaires sur des échelles spatiales plus fines

¹ Nous utilisons dans ce document le terme de "produit phytosanitaire", utilisé par la communauté agricole et dont la définition figure dans le Larousse bien que la nomenclature officielle française tende actuellement à lui préférer "produit phytopharmaceutique" (voir par exemple https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000029595088/2016-10-27/). Les deux termes sont strictement synonymes d'après https://www.ecophyto-pro.fr/fiches/fiche/23/les_produits_phytopharmaceutiques_statut_et_mise_en_marche

² Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation

³ Ministère de la Transition Écologique

⁴ Directions Régionales de l'Alimentation, de l'Agriculture et la Forêt

⁵ Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

(parcelles agricoles) ont été produites dans le cadre du projet spatialisation⁶ (Carles et al., 2015, Seard et al., 2017, Truche et al., 2019). L'analyse de leur validité et de leur fiabilité est encore en cours à ce jour.

Le projet Analyse des déterminants des Variations Interannuelles de NODU (Avi-NODU) dans lequel s'insère ce rapport vise à apporter un éclairage sur les déterminants des évolutions interannuelles des ventes de pesticides enregistrées dans la BNV-d, ainsi que sur l'évolution des indicateurs NODU et QSA. Dans ce travail nous avons distingué deux types de déterminants : (i) les déterminants internes, liés à la méthode de calcul des indicateurs (en particulier le NODU) et l'acquisition des données intervenants dans leur calcul et (ii) les déterminants externes, facteurs influençant directement l'usage et la vente de produits phytosanitaires (**Fig. 0.1**). L'analyse des déterminants internes, présentée en première partie de ce document, a pour objectif de renseigner la part de variations du NODU qui n'est pas liée à des variations d'usage des produits phytosanitaires à proprement parler et qui correspond à un biais méthodologique associé aux indicateurs et à la base de données BNV-d. Les variations d'usages et de ventes sont abordées à travers l'analyse des déterminants externes, présentée en seconde partie. Les déterminants externes explorés sont d'ordres réglementaires (retrait de spécialités commerciales ou de substances actives, niveau de taxation des substances), économiques (prix de vente des récoltes ou prix d'achat des intrants) ou relèvent d'évolutions dans les pratiques agricoles du fait des choix stratégiques de l'agriculteur (assolement, conversion à l'agriculture biologique) ou en réaction aux aléas de production (climat, pression bioagresseurs).

Dans ce rapport, les données de BNV-d mobilisées sont issues pour la BNV-d Bilan d'une extraction réalisée le 28 mai 2019 et pour la BNV-d Registre d'une extraction du 30 août 2019 pour 2013 à 2015 et du 18 octobre 2019 pour 2016 à 2018 (voir définition BNV-d Bilan et Registre **section 1.2.1**). Nous utilisons également plusieurs autres bases de données qui sont présentées en **Annexe B**.

⁶ La Spatialisation des ventes de produits Phytopharmaceutiques, ou Projet ECOPHYTO II AFB AXE 3 ACTION 14, est un projet porté par l'Observatoire du Développement Rural (ODR) visant à fournir une information spatialement explicite des substances répertoriées par la BNVD-d.

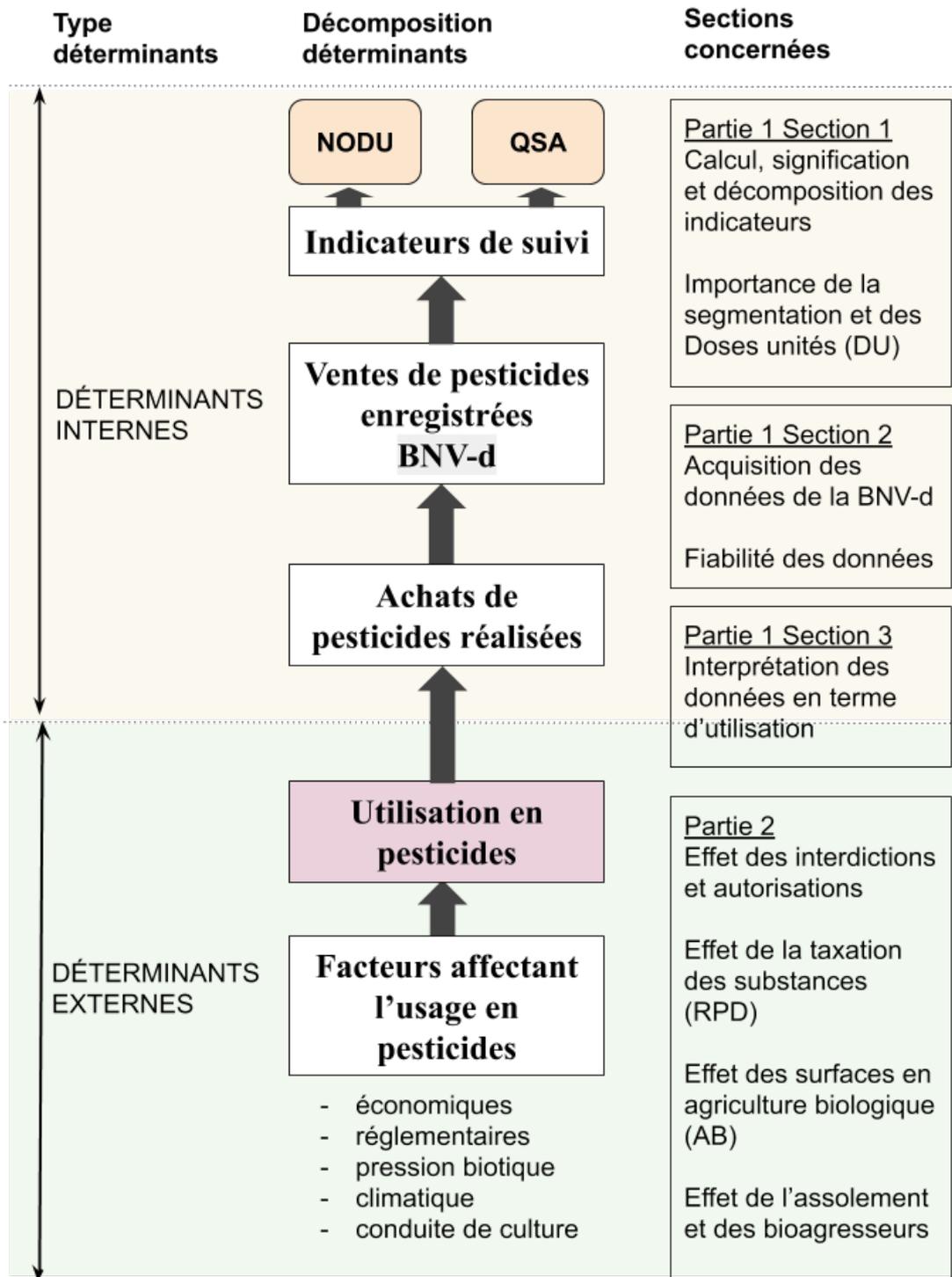


Figure 0.1 : Schéma de synthèse des déterminants internes et externes des variations inter-annuelles d'utilisation en pesticides et de leurs indicateurs.

Partie 1 : Déterminants internes des variations de mesures des ventes de produits phytosanitaires.

La BNV-d est une base de données permettant de suivre la quasi-totalité des ventes de produits phytosanitaires sur le territoire français. Elle fournit depuis 2008 les ventes localisées au code commune INSEE des vendeurs ou de leur siège social et, depuis 2013, au code postal (CP) des acquéreurs des produits (cf. **section 1.2**). À partir de cette base de données, il est donc possible de suivre l'évolution des quantités vendues de chacun des produits ou des substances actives. Les données permettent également de calculer des indicateurs qui agrègent l'ensemble des substances actives pour suivre les évolutions interannuelles des ventes de manière globale. La Quantité de Substance Active (QSA) totale est ainsi souvent calculée. Pour permettre le suivi du plan Ecophyto, visant à réduire globalement l'usage de produits phytosanitaires, l'indicateur NODU, a été créé afin de prendre en compte les différences de quantités entre produits liés à leur concentration et leur efficacité.

Les sections suivantes visent, au travers d'un rappel de la construction de ces indicateurs et de quelques analyses complémentaires, à apporter un éclairage sur les informations que les indicateurs permettent de mettre en lumière, sur leurs angles morts et sur la manière de les analyser. A ce sujet, nous présentons certaines décompositions ou déclinaisons possibles de ces indicateurs permettant de répondre à des questions usuelles plus précises. Puis, nous présentons les sources de données mobilisées pour les indicateurs, la BNV-d en particulier, et nous analysons en quoi leur contenu et leurs évolutions peuvent influencer la variation des indicateurs QSA et NODU.

1.1. Indicateurs associés à la BNV-d

Les modes de calcul des indicateurs principaux du plan Ecophyto, QSA et NODU, sont décrits **section 1.1.1** et **section 1.1.2**. Ces indicateurs sont basés sur la quantité de substances actives présentes dans les produits phytosanitaires, définis comme les molécules du produit qui sont responsables de l'effet recherché (Méthodologie de calcul du NODU, 2017). Les produits phytosanitaires peuvent également contenir d'autres ingrédients comme des diluants,⁷ des solvants⁸ ou des adjuvants⁹, qui ne sont pas pris en compte dans les indicateurs mentionnés et dans la base de données BNV-d : ils ne seront pas traités dans ce rapport.

Dans le cadre du plan Ecophyto, ces indicateurs sont déclinés en segments, qui représentent les grands secteurs d'utilisations des produits phytosanitaires **section 1.1.3**. Différentes déclinaisons des deux indicateurs, incluant des déclinaisons spatiales et temporelles, sont proposées dans la **section 1.1.4**. Une analyse plus spécifique de l'effet sur le NODU de la méthodologie de calcul des Doses Unités, composante décisive dans son calcul, est ensuite présentée **section 1.1.5**. Enfin, une comparaison et une mise en perspective des deux indicateurs sont proposées **section 1.1.6**.

1.1.1. QSA

La Quantité totale de Substances Actives (QSA), calculée à partir de la BNV-d, représente la masse des substances actives vendues sur une zone et une période donnée. La QSA est calculée habituellement chaque année à l'échelle de la France ou des régions et est souvent détaillée par type de fonction (herbicide, insecticides, fongicides, etc...), notamment dans le cadre du pilotage du plan Ecophyto.

La QSA peut être directement calculée avec la BNV-d qui fournit les quantités vendues des substances actives en kilogrammes de la plupart des produits phytosanitaires rapportés dans la base (voir exceptions **section 1.2.4 Quantités de substances nulles**). La QSA nécessite des précautions dans son interprétation, notamment car les substances actives s'emploient à des doses variables. Ainsi, dans le top

⁷ matière solide permettant de réguler la concentration en substances actives du produit

⁸ matière liquide permettant de réguler la concentration en substances actives du produit

⁹ Certains adjuvants sont parfois présents dans la BNV-d mais de manière générale, ces derniers ne sont pas renseignés (pour plus d'informations sur les adjuvants voir Green, 2000, Krogh et al., 2003, Mesnage et Antoniou, 2018)

5 des substances contribuant le plus à la QSA globale française sur la période 2009-2018, on retrouve des substances pondéreuses, c'est à dire qui ont des doses homologuées médianes relativement fortes à l'hectare, notamment le soufre pour pulvérisation (micronisé) (6.02 kg/ha, base de données EPHY) et le soufre sublimé (7.5 kg/ha, base de données EPHY), ainsi que des substances aux doses homologuées médianes intermédiaires comme le prosulfocarbe (4 kg/ha), le glyphosate (2.16 kg/ha) et le mancozèbe (1.6 kg/ha). De plus, les substances actives du top 10 contribuent à 46.1 % de la QSA sur la période 2009-2018, ce qui signifie que les variations de la QSA sont principalement dirigées par les ventes de ces 10 substances. Or, il est possible que ces substances pondéreuses masquent des variations de substances très utilisées mais à plus faible dose (faible dose homologuée) et qui peuvent avoir des impacts significatifs sur la santé et l'environnement. Par exemple, l'essentiel des insecticides qui ont des doses homologuées faibles influence peu ce bilan (Ex : cyperméthrine, dose homologuée médiane à 0.03 kg/ha, base de données EPHY). De plus, il existe certains usages pour lesquels les substances utilisées sont remplacées au cours du temps par d'autres substances utilisées à plus faible dose¹⁰. Comme dit précédemment, ce remplacement de substances peut entraîner une baisse de la QSA qui ne traduit pas forcément un progrès en termes d'impact sur l'environnement et la santé.

C'est pour pallier ce biais potentiel sur l'interprétation de l'évolution des usages que l'indicateur NODU a été construit. Dans cet indicateur, les quantités de substances vendues sont rapportées à des doses normatives appelées doses unités (DU), qui sont dérivées d'un calcul pondéré des doses homologuées.

¹⁰ Pour le désherbage sur blé, le chlortoluron et le prosulfocarbe, dont les doses homologuées sont respectivement 1,8 et 2,4 kg/ha, sont au fil du temps remplacés par le mesosulfuron et l'iodosulfuron, respectivement 0,015 et 0,003 kg/ha. Pour traiter le mildiou sur la pomme de terre, le sulfate de cuivre et le mancozèbe, respectivement 5 et 1,5 kg/ha, sont remplacés par du cymoxanil 0,1 kg/ha.

1.1.2. NODU

Le Nombre de Doses Unités (NODU) est l'indicateur de référence de suivi du plan Ecophyto et vise à apprécier l'intensité d'utilisation des produits phytosanitaires et sa variation dans le temps et l'espace (échelle nationale et régionale en particulier) (Méthodologie de calcul du NODU, 2017). Le principe est de rapporter chaque quantité de substances actives vendues à une Dose Unité (DU) qui est calculée à partir des différentes doses homologuées de cette substance selon les produits (AMM), les cultures et les usages pour laquelle elle est autorisée (données extraites d'EPHY).

On appelle Nodu d'une substance active ($Nodu_{SA}$) le rapport :

$$Nodu_{SA,Segment,anref} = \frac{QSA_{Segment}}{DU_{SA,Segment,anref}} \quad (1)$$

avec :

$QSA_{Segment}$: la quantité (en kg) de la substance SA pour un segment donné

DU_{SA} : la dose unités de SA (en kg/ha) pour un segment donné pour l'année de référence (anref) (cf. **éq. 3**).

Dans le plan Ecophyto, un $Nodu_{SA}$ distinct est calculé pour différents secteurs d'utilisations des produits phytosanitaires, que l'on appelle segment (ex: le segment agricole). Nous reviendrons sur la description, la méthode d'attribution des segments dans le **section 1.1.3**. L'indicateur NODU est ensuite calculé pour chaque segment en sommant les $Nodu_{SA}$ de chaque substance active qui le compose (**éq. 2**) :

$$NODU_{Segment,anref} = \sum_{SAs} Nodu_{SAi,Segment,anref} \quad (2)$$

avec :

SAs une liste de substances sur laquelle on calcule le NODU

Un des points clefs du calcul du NODU est l'attribution d'une DU à chaque substance active à partir des doses homologuées de produits commerciaux contenant cette substance. En effet, chaque substance active peut être mobilisée par plusieurs produits phytosanitaires distincts. Ces produits phytosanitaires sont chacun rattachés à une unique Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) qui définit sa composition en substance(s) active(s), ses usages autorisés et leurs doses homologuées associées. En conséquence, chaque substance active dispose potentiellement de plusieurs doses homologuées qui

varient selon les AMM et les usages prévus. Afin d'établir une unique DU représentative de chaque substance active et pour chaque segment auquel elle est rattachée, une méthode de calcul a été mise au point par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) (cf. **éq. 3, Annexe B**).

$$DU_{SA,Segment,anref} = \frac{\sum_{Cs} DHmax_{SA,Segment,Ci,anref} \times S_{Ci}}{\sum_{Cs} S_{Ci}} \quad (3),$$

avec :

Cs : ensemble des cultures sur laquelle SA est homologuée sur une segment donné pour l'année de référence

DHmax_{SA, segment, C, année de référence} : la dose homologuée maximale de SA sur une culture Ci et sur un segment donnée pour l'année de référence

S_{Ci} : la surface totale associée à la culture Ci pour l'année de référence

Le principe est de sélectionner la dose homologuée maximale sur chaque culture et segment sur laquelle une substance active est homologuée, puis d'en faire la moyenne en pondérant par la surface nationale de chaque culture pour une année de référence donnée. Cette méthode fait donc appel à trois bases de données décrites en **Annexe B**:

- i. une table reliant les AMM des produits à des segments;
- ii. le catalogue E-PHY;
- iii. la base de données Statistiques Agricoles Annuelles (SAA) qui fournit les surfaces par culture au niveau national.

La DU est une estimation de la dose homologuée moyenne mobilisée sur une composition de culture donnée (en kg / ha). Le NODU, étant composé de rapports de quantités (kg) sur des DU, peut donc être vu comme une estimation de la somme des surfaces recevant une dose homologuée de traitements phytosanitaires. Il est d'ailleurs homogène à une surface (ha). Rapporté à la SAU, il s'apparente à l'Indicateur de Fréquence de Traitement phytosanitaire (IFT).

1.1.3. Segments et ventilation des AMM

Les segments permettent de distinguer, au moyen des AMM, les grands secteurs d'utilisations des produits phytosanitaires et d'appréhender les contributions de ces différents secteurs au regard des objectifs du plan Ecophyto (**Tableau 1.1.1**). Dans sa notice méthodologique, le NODU est décliné systématiquement en segment (agricole - UA, agricole - UAZNA, agricole - autres, ZNA et ZNAA) et

son calcul, en particulier des Doses unités (DU), dépend directement du segment sur lequel il se décline (Méthodologie de calcul du NODU, 2017). La QSA est également souvent déclinée en segment dans les rapport et notes de suivi du plan Ecophyto, en particulier pour les segments pour lesquels la DU n'est pas calculé et donc où le NODU n'est pas disponible (Biocontrôle, Biocontrôle EAJ et Traitement de semences).

Les segments distinguent ainsi les usages de type agricole des autres usages professionnels et des usages amateurs en se basant sur l'intitulé des usages dans le catalogue E-PHY ainsi que la mention EAJ (Emploi Autorisé Jardin). La table d'association des segments aux AMM est actualisée annuellement par le MAA (**Annexe B**). Les segments étant définis par AMM, les quantités de certaines substances actives peuvent donc être réparties dans plusieurs segments si les différentes AMM qui les contiennent sont rattachées à différents segments (**Tableau 1.1.2**). Depuis 2017, les AMM ayant des usages mixtes agricoles et non agricoles sont attribuées par défaut au segment agricole, ces AMM étant utilisées principalement à des fins agricoles. Ainsi, selon l'analyse que l'on souhaite réaliser, il convient de choisir le segment agricole dans son ensemble ou le segment agricole - UA : le segment agricole permettant de prendre en compte la totalité des volumes de substances utilisées en agriculture (exhaustivité) et le segment agricole - UA permettant de prendre en compte des volumes de substances utilisées uniquement en agriculture (précision).

Tableau 1.1.1 : Description des produits pris en compte dans chacun des segments.

Segment	(Sous-groupe)	Produits pris en compte	Top 3 NODU (bilan 2009-2018)	Top 3 QSA (bilan 2009-2018)
Agricole	Agricole - UA (Usage Agricole)	produits professionnels ayant uniquement des usages agricoles ou forestiers, hors produits de biocontrôle et traitement de semences	cyperméthrine, metsulfuron-methyl, glyphosate	glyphosate, mancozèbe, fosetyl-aluminium
	Agricole - UAZNA (Usage Agricole et Zone Non Agricole)	produits professionnels ayant à la fois des usages agricoles et des usages possibles en jardins, espaces végétalisés et infrastructures (JEVI) , hors produits de biocontrôle et traitement de semences	metsulfuron-methyl, prosulfocarbe, 2,4-d	prosulfocarbe, propyzamide, 2,4-d
	Agricole - autres	produit n'entrant pas dans les catégories précédentes, ayant des usages mixtes distincts de UAZNA	lambda-cyhalothrine, phosphore d'aluminium, tau-fluvalinate	cuivre de l'oxyde cuivreux, cuivre de l'hydroxyde de cuivre, thiophanate-methyl
ZNA (Zone Non Agricole)		produit professionnel ayant uniquement des usages en jardins, espaces végétalisés et infrastructures (JEVI)	glyphosate, diflufénicanil, flazasulfuron	glyphosate, 2,4-mcpa, diflufénicanil
ZNAA (Zone Non Agricole Amateur)		produit à usage amateur hors produit de biocontrôle (EAJ)	glyphosate, metaldehyde, deltaméthrine	glyphosate, sulfate de fer, cuivre du sulfate de cuivre
Biocontrôle		produits de biocontrôle à usage professionnel	-	soufre pour pulvérisation, huile de vaseline, soufre
Biocontrôle EAJ		produits de biocontrôle à usage amateur : avec mention « Emploi Autorisé en Jardin » (EAJ)	-	acide pélagonique, sulfate de fer, huile de colza
Traitement de semences		produit ayant uniquement des usages en traitement de semence	-	thirame, thiaclopride, cyperméthrine

Tableau 1.1.2 : Exemple de substances rattachées à plusieurs segments et Doses Unités (DU) associées.
(Annexe B.2)

Substance	Segment	DU (kg/ha)
chlorothalonil	agricole - UA	0,905
chlorothalonil	agricole - UAZNA	0,905
chlorothalonil	agricole - autres	0,905
chlorothalonil	ZNA	3,750
glyphosate	agricole - UA	2,385
glyphosate	agricole - UAZNA	2,385
glyphosate	agricole - autres	2,385
glyphosate	ZNA	2,880
glyphosate	ZNAA	2,880
mancozèbe	agricole - UA	1,566
mancozèbe	agricole - UAZNA	1,566
mancozèbe	agricole - autres	1,566
mancozèbe	ZNA	15,000
mancozèbe	ZNAA	1,395
prosofocarbe	agricole - UA	4,000
prosofocarbe	agricole - UAZNA	4,000
prosofocarbe	ZNAA	4,000
soufre	agricole - UA	9,927
soufre	agricole - UAZNA	9,927
soufre	ZNAA	16,000

Certains segments permettent aussi d'isoler des substances dont les doses homologuées sont difficilement comparables entre elles, comme les produits commerciaux (AMM) dédiés aux traitements de semences. Ces produits ont des doses qui s'expriment en quantité de produits par quantité de semence. Ces doses peuvent être converties, au moyen d'une estimation de densité de semis à l'hectare, en quantité de produits par hectare de culture. Cependant, les doses trouvées sont souvent très faibles devant les doses de produits appliquées directement sur les cultures. Si les DU des traitements de semence étaient calculés, leur valeur serait donc souvent très inférieure au DU du segment agricole.

Les segments permettent également de différencier les produits dont on cherche à réduire l'usage via la mise en œuvre du plan Ecophyto de ceux dont on pourrait souhaiter qu'ils soient privilégiés par les utilisateurs. Les produits phytosanitaires de biocontrôle¹¹ forment dans ce but un segment spécifique. Ces produits de biocontrôle sont, par ailleurs, souvent difficilement comparables aux substances actives classiques (pesticides minéraux ou de synthèse) car ils présentent des modes d'action très différents et s'expriment dans des unités quantitatives difficilement comparables. A titre d'exemple, le (z)-9-dodecenyacetate est un attractif à base de phéromones dont l'usage est exprimé en diffuseurs par hectare et affecte le comportement des insectes (ici via principe de confusion sexuelle) et non leur survie individuelle. La dose homologuée d'un virus comme le virus de la granulose sera également très différente d'une dose homologuée de substances classiques inertes dans la mesure où le virus est capable de se multiplier après son application. Pour l'ensemble de ces raisons, les DU et le NODU des segments traitements de semences, biocontrôle et biocontrôle EAJ n'ont pas encore été calculés pour le moment par le MAA.

Dans une moindre mesure que le segment traitement de semences, les valeurs de DU peuvent tout de même varier pour une même substance selon les segments disposant de DU (agricole, ZNA, ZNAA) auxquels elle est rattachée (**Tableau 1.1.2**). En conséquence, la comparaison des NODU entre ces segments n'est pas pertinente. Le cas du segment agricole fait, cependant, exception car les DU sont identiques entre les sous-groupes "UA", "UAZNA" et "autres" (**Tableau 1.1.2**). On peut donc sans difficulté majeure, calculer le NODU sur le segment agricole en entier, sur les sous-groupes ou bien comparer les sous-groupes entre eux.

Certains produits commerciaux présents dans la BNV-d ne sont affectés à aucun segment dans la table du MAA de 2017 que nous avons mobilisés (**Annexe B**) et n'ont donc pas d'usages attribués : 296 et

¹¹ la liste des produits phytopharmaceutiques de biocontrôle, au titre des articles L.253-5 et L.253-7 du code rural et de la pêche maritime sont publiés et mise à jour mensuellement par le MAA (<https://ecophytopic.fr/protoger/liste-des-produits-de-biocontrole>). Dans cette liste sont intégrés des produits ou agents utilisant des mécanismes dit naturels, c'est-à-dire déjà existant sans interventions humaines, dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Cette liste comprend d'une part les macro-organismes et d'autre part les produits phytosanitaires avec des micro-organismes, des médiateurs chimiques comme les phéromones et les kairomones ou des substances existant en l'état dans la nature, d'origine végétale, animale ou minérale (Note de service 12/03/2020). Sont exclus de cette liste les agents ou produits présentant un risque pour la santé et l'environnement (liste de mentions de danger).

176 produits pour les bases Bilan et Registre, respectivement. Ces produits représentent des quantités de substances faibles par rapport aux quantités vendues dans le segment agricole (QSA segment inconnu < 0.2 % de la QSA du segment agricole et quantité vendue des substances prises individuellement < 0.05% ; **Tableau 1.1.3**). Dans la suite du rapport, ces produits seront référencés dans les indicateurs sous la mention “segment inconnu”. Une des explications est que certaines de ces AMM ne sont plus autorisées l’année de référence de la table associant segments et AMM (2017), donc sans segment attribué mais encore présentes dans les données de vente avant l’année de référence. C’est le cas par exemple des AMM non affectés associés aux trois substances avec la QSA la plus élevée : trifluraline, glutaraldehyde et carbofuran (**Tableau 1.1.3**). Une autre explication, au contraire, est que ces substances sont autorisées après l’année de référence comme le coniothyrium minitans (usage autorisé en 2019, source site <https://ephy.anses.fr/> consultation 19/06/2020).

Tableau 1.1.3 : Top 15 des substances de la BNV-d bilan sans segment attribué sur la période 2009 - 2018.

Substance	Quantité vendue de substance issu du segment inconnu (équivalent kg)	Q _{SA} / QSA segment agricole (%)*	Q _{SA} / médiane des QSA du segment agricole (%) **
trifluraline	195471.54	0.04	15.21
glutaraldehyde	114520.23	0.02	8.91
carbofuran	95200.48	0.02	7.41
coniothyrium minitans	66442.81	0.01	5.17
alcool ethylique	56107.1	0.01	4.36
chlorure de didecyl dimethyl ammonium	55227.26	0.01	4.3
chlorure de didecyldimethylbenzylammonium	54957.46	0.01	4.28
carbosulfan	53406.61	0.01	4.15
bacillus thuringiensis serotype h 14	45054.70	0.01	3.51
bacillus thuringiensis ssp kurstaki	36253.67	0.01	2.82
chlorure d'alkyl dimethyl benzyl ammonium	36001.98	0.01	2.8
lecithine de soja	35413.43	0.01	2.76
formaldehyde	33246.89	0.01	2.59
bacillus subtilis	31036.03	0.01	2.41
diuron	26407.67	0.01	2.05

* Q_{SA} de la substance rapportée à la QSA totale du segment agricole (%)

**QSA de la substance rapportée à la médiane des quantité de substances vendues pour les substances du segment agricole (%)

Pour certaines analyses, il peut être intéressant d’affiner la segmentation présentée ci-dessus en isolant

d'autres usages. Certains produits phytosanitaires, par exemple, ont des usages prévus pour le stockage des récoltes (hangar, silo, etc.). D'une part, ces produits ne sont pas appliqués en plein champ et n'auront donc pas les mêmes impacts sur l'environnement. D'autre part, ils sont rapportés au code postal du lieu de stockage, voire potentiellement au code postal du siège social de l'entreprise de stockage, ce qui peut créer certains décalages spatiaux si le grain spatial étudié est trop fin (cf. **section 1.3**). On peut identifier les AMM associés à des usages de stockage (voir utilisation **Partie 2 section 2.4**) en recherchant dans la base EPHY (**Annexe B.1**) les intitulés contenant "Trt Prod. Réc." et "désinsectisation". Ces intitulés pourraient être un moyen de définir un segment "agricole - stockage" qui inclut les AMM du segment agricole pouvant être utilisé au moment du stockage. Certains AMM ayant des usages mixtes (stockage et plein champs), il convient également de choisir s'il faut les inclure ou non. En absence d'expertise, nous avons considéré comme produits de stockage tous les AMM qui présentent au moins un usage de stockage.

La déclinaison des indicateurs en segment est donc essentielle et conseillée pour bien appréhender les indicateurs, en particulier pour le NODU dont le calcul diffère entre segments (via les DU). D'autres déclinaisons sont cependant possibles pour avoir une compréhension plus fine des évolutions des ventes de produits phytosanitaires.

1.1.4. Déclinaison des indicateurs dans l'espace, le temps et autres critères

En théorie, chacun des indicateurs QSA ou NODU peut être décliné sur plusieurs échelles spatiales, temporelles et selon différentes catégories ou classements des substances ou des AMMs (ex: Segment).

$$QSA_{période,zone,AMMs,SAs} = \sum_{SAs} Q_{SAi,AMMs,période,zone} (4) NODU_{période,zone,AMMs,SAs,anref} = \sum_{SAs} \frac{Q_{SAi,AMMs,période,zone}}{DU_{SAi,AMMs,anref,national}} (5) \text{ avec :}$$

période : période sur laquelle on calcule l'indicateur. Pour la BNV-d, au minimum 1 an et au maximum la somme des années disponibles (10 ans pour 2009 à 2018). On peut ainsi lisser les tendances en calculant des NODU sur trois années successives.

zone : territoire sur lequel on calcule l'indicateur. Pour la BNV-d, au minimum un code postal et la France entière au maximum. En faisant certaines hypothèses, on peut agréger les codes postaux à des échelles supérieures comme la petite région agricole (PRA), le département ou la région (cf **section 1.2.3**).

AMMs: liste d'AMM que l'on souhaite intégrer à l'indicateur. A minima il est conseillé de détailler les indicateurs par segment.

*SAs : liste des substances actives sur lesquelles on calcule les indicateurs. Il est possible de détailler sur d'autres caractéristiques des substances actives comme leur fonction ou leur classement CMR (classement de toxicité des substances, voir **section 1.1.6**).*

On peut décomposer les quantités vendues de produits phytosanitaires de deux manières : soit par les AMM soit par les substances actives. En simplifiant, on peut dire que les AMM permettent plutôt d'accéder aux usages d'un produit (segment, fonction) alors que les substances actives permettent plutôt d'approcher les effets sur la santé et l'environnement (CMR). Mais, il est également possible d'approximer une grande catégorie d'usages (fonction) pour les substances actives, en s'appuyant sur des avis d'experts pour choisir la fonction la plus importante en cas de fonctions multiples.

Dans l'équation de décomposition proposée pour le NODU, la DU est identique sur tout le territoire français, fondée sur une seule année de calcul (aussi récente que possible) et varie seulement selon les substances actives et leurs segments. Une des conséquences est que les NODU calculés sur des zones réduites (PRA, départements, régions,...) ne représentent plus une estimation de surface traitée par une dose homologuée car la DU est liée aux surfaces de cultures nationales et non locales. De même, ce NODU n'estime plus directement un nombre de traitements réellement réalisé localement mais plutôt une intensité d'utilisation de produits phytosanitaires qui s'exprime en nombre de doses unités. L'intérêt fondamental de la rétopolation d'une DU de référence unique est de rendre comparable les NODU entre différentes années et différentes zones puisque la pondération des quantités par les DU est identique entre les échelles (voir argumentaire détaillé **Annexe J**). Une DU différente selon des régions entraînerait des différences de NODU alors que les quantités appliquées sont les mêmes (déterminant interne), ce qui serait alors difficile à justifier. Prenons deux régions avec exactement les mêmes quantités de substances utilisées. Si l'une des régions est constituée en plus grande proportion d'une culture qui utilise une de ces substances à plus forte dose, la DU régionale de cette substance sera plus élevée et donc la quantité de NODU sur cette régions sera plus faible que l'autre.

Il faut rappeler, cependant, que les NODU de différentes zones, comme les QSA de différentes régions administratives ou autres entités territoriales, ne sont directement comparables que si elles sont rapportées aux surfaces d'utilisation. La QSA et le NODU sont donc proportionnels à la taille des zones sur lesquelles ils sont calculés (Code Postal, PRA, départements ou régions). Pour avoir une idée de

l'intensité des traitements réalisée sur une zone, il faut rapporter le NODU et la QSA à la surface de la zone sur laquelle ils sont calculés. Il est possible de nuancer cette approche en les rapportant seulement à la surface que l'on estime concernée par l'usage en produit phytosanitaire. Par exemple, on peut rapporter le NODU agricole d'une zone à la Surface Agricole Utile (SAU) de cette zone. Le choix dépend du phénomène que l'on souhaite observer : la pression de produits phytosanitaires dans une zone (surface totale de la zone) ou bien le niveau d'intensité des pratiques agricoles (SAU).

En résumé, ces équations donnent un cadre théorique pour la déclinaison de la QSA et du NODU. Toutes déclinaisons issues de la classification des substances actives ou des AMM peuvent être réalisées. Il convient, cependant, de prendre certaines précautions pour faire et analyser des déclinaisons spatiales et temporelles sur certains groupes de substances ou d'AMM (**section 1.2 et 1.3**).

Au-delà des implications liées au choix des AMM ou substances actives intervenant dans le calcul du NODU (ex : segment), le mode de calcul des DU et leur variation dans le temps de peuvent avoir un impact. C'est un des principaux déterminants internes d'évolution du NODU, qu'il convient donc d'explorer et analyser en détail.

1.1.5. Effet de la méthodologie de calcul et de la variation de Doses Unités de référence

Comme présenté précédemment, le calcul de la DU de chaque substance active est le fruit d'un calcul complexe reposant sur des bases de données évolutives dans le temps. Les surfaces agricoles de chaque culture et les doses homologués de chaque substance active sont sujettes à évolution chaque année. En conséquence, la valeur des DU peut être modifiée chaque année. Depuis 2017, pour éviter une source de variation artificielle (interne) de l'indicateur entre les années, les NODU présentés et comparés sont toujours rétropolés à partir d'un même DU de référence, qui sont les dernières DU calculées en date. Dans ce rapport, à l'exception de cette section, les DU mobilisées sont calculées sous l'autorité du MAA pour l'année 2017 et la France entière, et donc basées sur les surfaces nationales et les doses homologués en 2017 (**Annexe B.3**).

Dans cette section, l'objectif est d'investiguer la manière dont les DU et leur méthode de calcul influencent l'interprétation des variations temporelles du NODU, ainsi les questions suivantes se posent :

- 1) Quelles variations interannuelles entre les différents DU calculées (DU de référence) observe-t-on ?
- 2) Quelle est la conséquence de la modification des DU de référence chaque année sur la mesure des variations interannuelles de NODU ?
- 3) Que représentent les différences actuelles de DU entre les substances actives pour la dernière année de référence en date (2017) ?
- 4) Quelles valeurs de DU de référence (2017) prennent les substances contribuant le plus aux indicateurs QSA et NODU ? Cette composition évolue-t-elle dans le temps ? Constate-t-on une diminution de la part des ventes prises par les substances pondéreuses (fort DU) ?

Pour répondre à ces différentes questions, nous allons mobiliser les différents référentiels annuels des DU disponibles, et analyser l'impact de leur variabilité sur l'indicateur NODU. Nous nous sommes basés principalement sur le segment agricole - UA pour nos analyses, car nous disposons des DU calculées sur ce segment pour de nombreuses années de référence et qu'il correspond à la majeure partie du

segment agricole. Pour la question 1) et 2), nous avons sélectionné une même base de substances actives pour lesquelles on dispose d'une DU de référence calculée pour chaque année de 2011 à 2017 (152/593). Il existe plusieurs raisons qui peuvent expliquer qu'on ne dispose pas d'une DU calculée pour toutes les substances actives toutes les années. D'une part, il est possible que certaines des substances actives qui n'étaient pas prise en compte dans la BNV-d, comme certaines substances spécifiques du segment traitement de semences (cf. **Fig. 1.2.1, section 1.2.3**), n'ont pas été incluses initialement dans le calcul des DU (ex: acide acétique, colophane, sulfosate, etc.). D'autre part, des différences de nomenclature du nom des substances dans les tables d'associations des DU des différentes années ont été constatées et limitent fortement les possibilités de rapprochement entre les DU des différentes années.

Variation interannuelle des différentes DU de référence calculées

Pour répondre à la question 1), qui cherche à observer les variations interannuelles entre les différentes DU calculées (DU de référence), nous avons quantifié le nombre de substances qui avaient une évolution de leur DU de référence d'une année à l'autre (**Fig. 1.1.1a**), et sur l'ensemble de la période entre 2011 et 2017 (**Fig. 1.1.1b**). Pour rappel, la DU calculée une année donnée dépend des doses homologuées maximales sur chaque culture ainsi que des surfaces de ces cultures cette même année.

Si on regarde plus précisément l'intensité du changement de valeur de la DU des 152 substances sélectionnées (cf. **Fig. 1.1.1**), on constate que la plupart des substances gardent la même valeur de DU ou ont des variations de moins de 50 %. Pour les années 2012 à 2015, les variations d'une année sur l'autre sont même en très large majorité inférieures à 5 % (**Fig. 1.1.1a**). On pouvait *a priori* s'attendre à une diminution de la DU des substances au cours du temps associée à un durcissement de la réglementation sur la période (suppression des doses homologués les plus fortes ou bien à la réduction globale des doses). Cependant, sur la période 2011 à 2017, on ne constate pas nettement plus de substances dont la DU diminue que de substances dont la DU augmente (**Fig. 1.1.1b**).

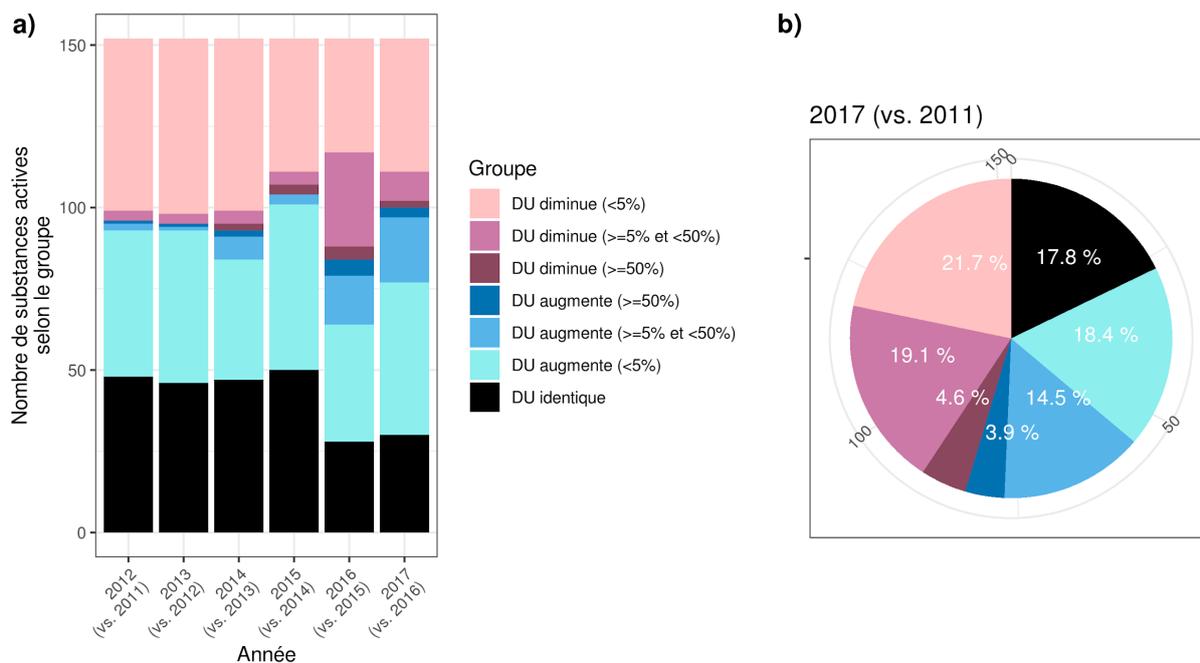


Figure 1.1.1 : Répartition des substances actives sélectionnées (152) selon le sens d'évolution du DU calculé chaque année (violet : diminution et bleu : augmentation) et la force de l'évolution (couleur plus sombre signifie évolution plus forte) : a) Comparaison des années deux à deux et b) comparaison 2011 et 2017.

Lorsqu'on pondère le nombre de substances de chaque groupe par ce qu'il représente en termes de NODU du segment agricole - UA, on retrouve les mêmes constats de faibles variations interannuelles et du sens d'évolution mixte des DU de référence calculées (données non présentées).

Il faut noter que cette analyse repose sur un échantillon de substances actives qui constituent une part importante, mais non majoritaire, du NODU du segment agricole UA. Elle nous conforte cependant dans l'idée que les variations interannuelles de DU ne sont pas très importantes.

Variation interannuelle du NODU selon les différentes DU de référence calculées

Pour répondre à la question 2) qui cherche à évaluer les conséquences de la modification des DU de référence chaque année sur le NODU et son évolution, nous avons calculé un NODU pour chaque année et pour chacune des différentes DU calculées (une par année) (**Fig. 1.1.2**). Sur cette figure, on peut constater que, indépendamment des DU de référence mobilisés, on perçoit bien la même dynamique d'évolution du NODU : une augmentation entre 2010 et 2014, une diminution entre 2016 et 2017 et une augmentation importante entre 2017 et 2018. Sur la **Fig. 1.1.2**, nous avons également représenté les différents pourcentages de variation du NODU entre 2010 et 2014, période au cours de laquelle on

observe une variation de NODU importante, selon les DU de référence mobilisées. On constate que l'évolution du NODU entre 2010 et 2014 est assez stable (autour de 32.4 %), avec un écart maximal de +/- 3 %, entre les différentes années de référence choisies pour de la DU. On peut donc conclure, qu'au niveau national, les variations de NODU causées par des différences de DU semblent faibles devant les variations totales de NODU et devrait, en conséquence, peu affecter la perception des variations interannuelles de cet indicateur.

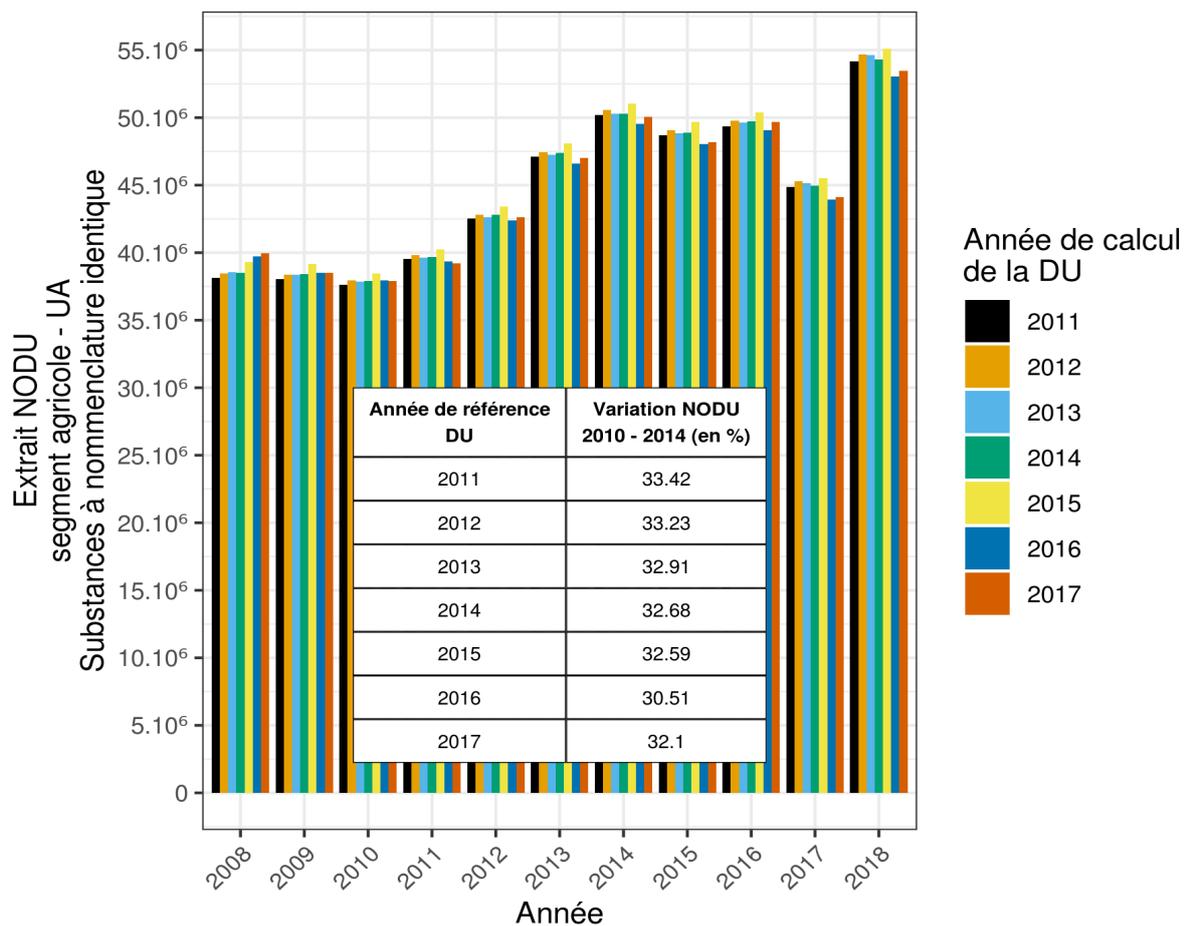


Figure 1.1.2 : NODU du segment agricole-UA calculés au moyen des différents DU calculées entre 2011 et 2017 et rétropolés sur toutes les années. NODU du segment agricole - UA calculés au moyen des différents DU calculées entre 2011 et 2017 et rétropolées sur toutes les années.

Signification des valeurs de DU 2017

Pour répondre à la question 3) qui cherche à montrer ce que représentent les valeurs de DU d'une année de référence (2017), nous les avons comparées à d'autres sources de données. Une des questions souvent associée aux DU est de connaître l'influence respective des différentes doses homologuées et des surfaces de culture mobilisées dans leur calcul. Pour cela nous avons comparé chaque DU de 2017, pour

le segment agricole - UA, à la médiane des doses homologuées de la substance active concernée sur tout l'historique d'homologation disponible dans la base EPHY (**Annexe B**). Cette dose homologuée médiane (DHm) est une représentation de la dose qui à l'avantage d'être indépendante de la surface des cultures. Pour simplifier, les doses homologuées retenues dans EPHY sont celles qui expriment une dose en quantité par surface uniquement. Par exemple, les doses de traitement de semence exprimées en quantité de produit par quantité de semences n'ont pas été prises en compte. 314 substances avec une DU et une DHm (sur 361 substances dans le segment agricole - UA, BNV-d Bilan) ont ainsi été obtenues.

On constate que, bien qu'il existe des différences parfois importantes, les valeurs des DU et des DHm sont souvent extrêmement corrélées ou ont des ordres de grandeur sont globalement très similaires (**Fig. 1.1.3**). Les deux valeurs sont quasi-identiques pour 33% des substances¹² (Rapport < 1.06 ; **Fig. 1.1.3b**) et sont très similaires pour 72.2 % des substances¹³ (Rapport < 1.5 ; **Fig. 1.1.3b**).

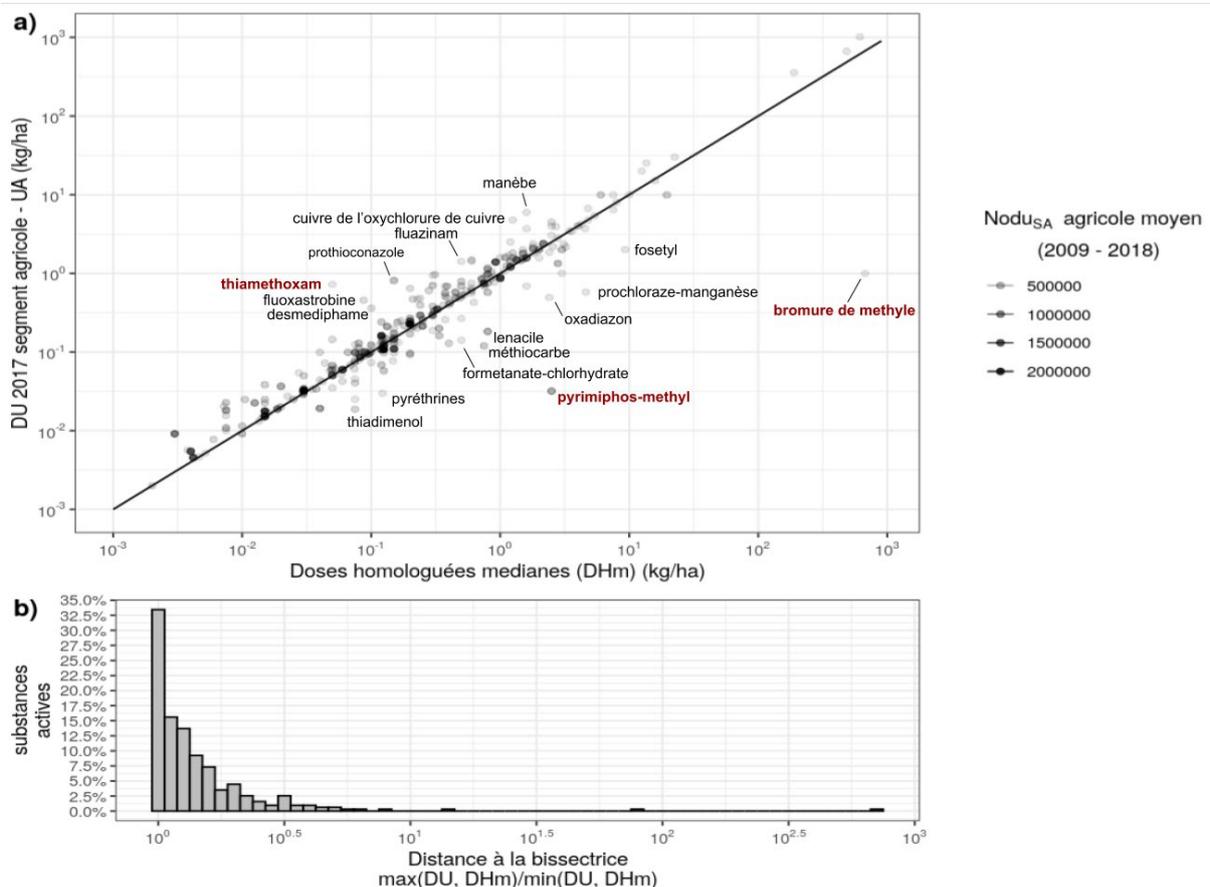


Figure 1.1.3 : a) Comparaison du DU 2017 du segment agricole de chaque substances actives avec la médiane de

¹² Exemple DHm et DU identique : chlorsulfuron, acétochlore, pethoxamide, et quasi-identique : 2,4-db, mancozebe, amitrole.

¹³ glyphosate, folpel, chlorothalonil, 2,4-d, soufre sublime, etc.

leurs doses homologuées sur l'ensemble de l'historique d'homologation disponible. La droite noire représente la bissectrice. Les noms des substances pour lesquelles les 2 valeurs s'écartent le plus de la droite sont représentées (en rouge si leur rapport est >10 et en noir si leur rapport est > 3.16). Le gradient de gris à noir des points représentant chaque substances correspond à la valeur prise par le NoduSA moyen. b) Histogramme des distances à la bissectrice calculé comme le rapport maximal entre DU et DHm, soit $\max(DHm, DU)/\min(DHm, DU)$. Chaque barre correspond au pourcentage de substances concernées.

14 substances actives présentent des différences très importantes entre la DU et la DHm (en rouge rapport > 10 et en noir rapport $> 10^{0.5} = 3.16$; **Fig. 1.1.3a**). Pour le pyrimiphos-méthyl, par exemple, on trouve une DU de 0.0366 kg/ha et une dose médiane de 2.5 kg/ha, soit une DU de près d'un centième de la dose homologuée médiane. Cependant, le pyrimiphos-méthyl étant utilisé pour la désinfection des hangars de stockage, les hectares de DHm font référence à des hectares de hangar et non des hectares de culture, qui sont peut-être pris en référence par la DU. Pour ce cas précis, il s'agirait de différences de modalité de calcul entre la DHm et la DU. Ce cas est un argument supplémentaire en faveur de la création d'un segment agricole - stockage. Les autres cas soulevés restent encore à explorer la part totale de NODU agricole correspondant à ces 14 substances actives est relativement faible (2.42 % du NODU total sur la période; **Fig. 1.1.3a**). En définitive, on peut conclure que pour un nombre important de substances, contribuant également de manière importante au NODU agricole (Nodu_{SA} ; **Fig. 1.1.3a**), la pondération par les surfaces de culture, ainsi que l'évolution des doses homologuées au cours du temps ne jouent pas de rôle fondamental pour déterminer la valeur de la DU : celle-ci est plus ou moins équivalente à la dose homologuée médiane toutes cultures et année confondues (DHm ; **Tableau 1.1.4**). Ces résultats sont cohérents avec la faible variation des DU de référence calculées d'une année à l'autre et les faibles différences de NODU qui en découlent (cf. Q2 - **Fig. 1.1.1**).

Tableau 1.1.4 : Valeur de DU, DHm et autres statistiques sur les doses homologuées présente dans la base données EPHY (**Annexe B.1**) pour les 10 substances ayant le plus fort Nodu_{SA} entre 2009 et 2018.

Substance active (SA)	DU	dose médiane (DHm)	dose moyenne (déviation standard)	[min ; max]	NoduSA total 2009 - 2018
cypermethrine	0.03	0.03	0.04 (0.03)	[0.02 ; 0.48]	33047211.41
metsulfuron-methyl	0	0	0 (0)	[0 ; 0.01]	30672795.5
glyphosate	2.38	2.16	3.25 (32.23)	[0.12 ; 1200]	30256927.39
epoxiconazole	0.11	0.12	0.11 (0.02)	[0.04 ; 0.15]	24336369.77
tebuconazole	0.23	0.2	0.18 (0.08)	[0.02 ; 1]	23368695.96
mefenpyr-diethyl	0.03	0.03	0.04 (0.02)	[0.02 ; 0.08]	23335343
mancozebe	1.57	1.6	2.64 (10.19)	[0.16 ; 120]	20701662.84

diflufenicanil	0.16	0.12	0.12 (0.06)	[0.02 ; 0.4]	18578334.91
cloquintocet-mexyl	0.02	0.02	0.01 (0.01)	[0 ; 0.04]	17762395.25
lambda-cyhalothrine	0.02	0.01	0.01 (0.01)	[0 ; 0.25]	17199817.14

Nous avons également regardé comment les DU des substances actives se répartissaient selon différents regroupements tels les segments, le classement CMR ou la fonction des substances (cf. **Annexe B.2 B.4** et **B.5**). Les figures suivantes (**Fig. 1.1.4a**, **Fig. 1.1.5a** et **Fig. 1.1.6a**) présentent des boîtes à moustaches représentant les 1^{er} et 3^e quartiles et la médiane, ainsi qu'un point rouge représentant la moyenne. Nous avons testé si les différences de DU observées étaient statistiquement significatives au moyen de tests non paramétriques de Wilcoxon-Mann-Whitney (**Fig. 1.1.4b**, **Fig. 1.1.5b** et **Fig. 1.1.6b**). Ce test, qui compare les médianes de deux groupes, est adapté à la comparaison de groupes de tailles d'échantillon différentes pour une variable qui n'a pas de distribution normale comme les DU.

On constate que les DU des segments agricole - UAZNA et agricole - UA sont légèrement et significativement inférieures aux DU des segments ZNA et ZNAA (**Fig. 1.1.4**). Les DU du segment agricole - autres ont des DU qui semblent intermédiaires, significativement différentes des DU du segment agricole - UA (supérieures) et ZNA (inférieures) mais pas des DU des segments agricole - UAZNA et ZNA. Cela signifie que les doses employées pour les usages agricoles semblent globalement inférieures à celles utilisées par les professionnels et amateurs non agricoles. On peut également déduire de ces différences de DU que le NODU agricole devrait, à quantités de substances égales, avoir des valeurs supérieures aux NODU ZNA et ZNAA. Malgré ces différences, il apparaît que chacun des segments prend des valeurs de DU d'ordres de grandeur contrastés (entre 10^{-2} et 10) avec au moins un quart des valeurs entre 10^{-1} et 1 (**Fig. 1.1.4a**).

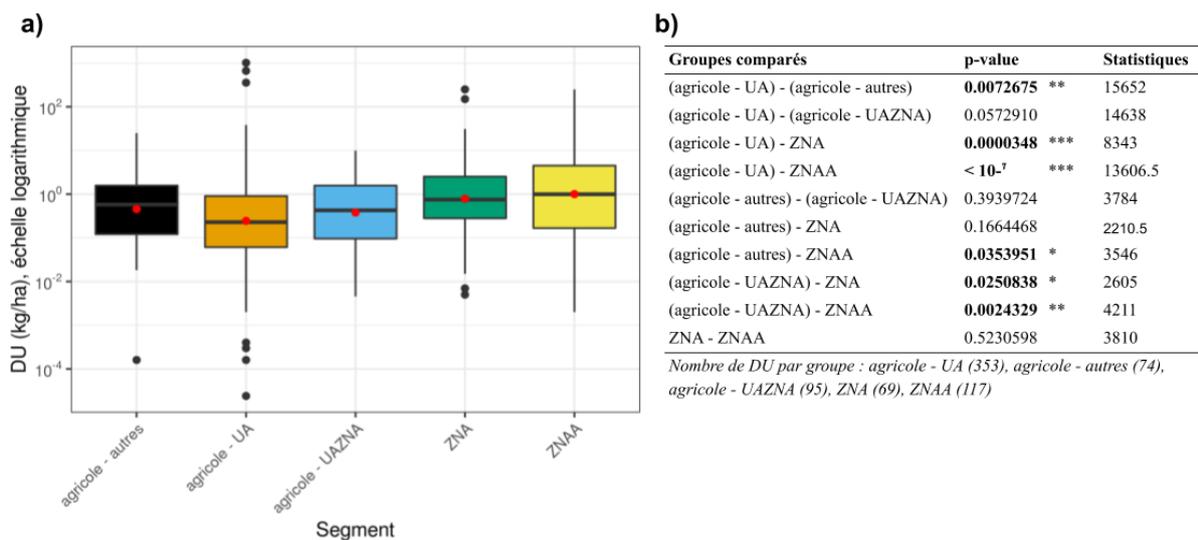


Figure 1.1.4 : a) Distribution des DU 2017 selon les segments et b) Résultats de tests de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les comparaisons des segments deux à deux.

La classification CMR des substances actives traduit leur caractère nocif pour la santé humaine (**Annexe B.5**). Les substances sont dites “CMR” quand elles présentent un caractère Cancérogène, Mutagène ou toxique pour la Reproduction¹⁴. Deux catégories sont détaillées, les CMR 1 pour le plus fort risque car leur nocivité est avérée ou supposée, et les CMR 2 dont la nocivité est seulement suspectée. On ne constate pas de différences significatives de DU entre les différentes classifications, comparées deux à deux (**Fig. 1.1.5b**), ce qui signifie qu’il n’y a pas de lien évident entre DU et nocivité. Ce résultat n’est pas totalement surprenant car les doses homologuées sont établies par les firmes, principalement sur la base de doses qui ont démontré leur efficacité. Les critères de conformité pour la santé et l’environnement sont évalués par l’ANSES qui peut décider d’un refus d’homologation, d’un retrait de certains usages, ou bien de mesures de gestions complémentaires, mais cela n’affecte pas directement la valeur de la valeur de la dose. Il existe, cependant, des cas où la dose peut être réévaluée au niveau de l’Union Européenne et conduire à des baisses de doses autorisées pour des raisons de risques écotoxicologiques (ex: dose cuivre en 2019 plafonnée à 28 kg/ha avec lissage sur 7 ans). Ce phénomène n’est pas pour autant visible dans nos résultats.

¹⁴ <https://www.anses.fr/fr/content/substances-canc%C3%A9rog%C3%A8nes-mutag%C3%A8nes-et-toxiques-pour-la-reproduction-cmr>

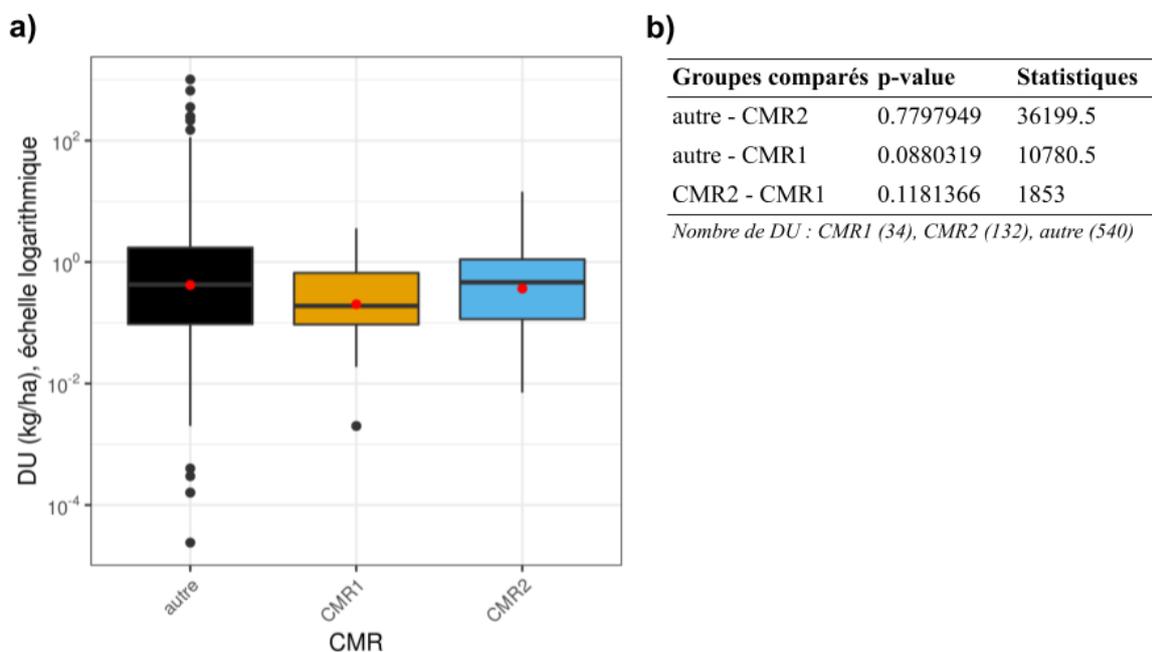
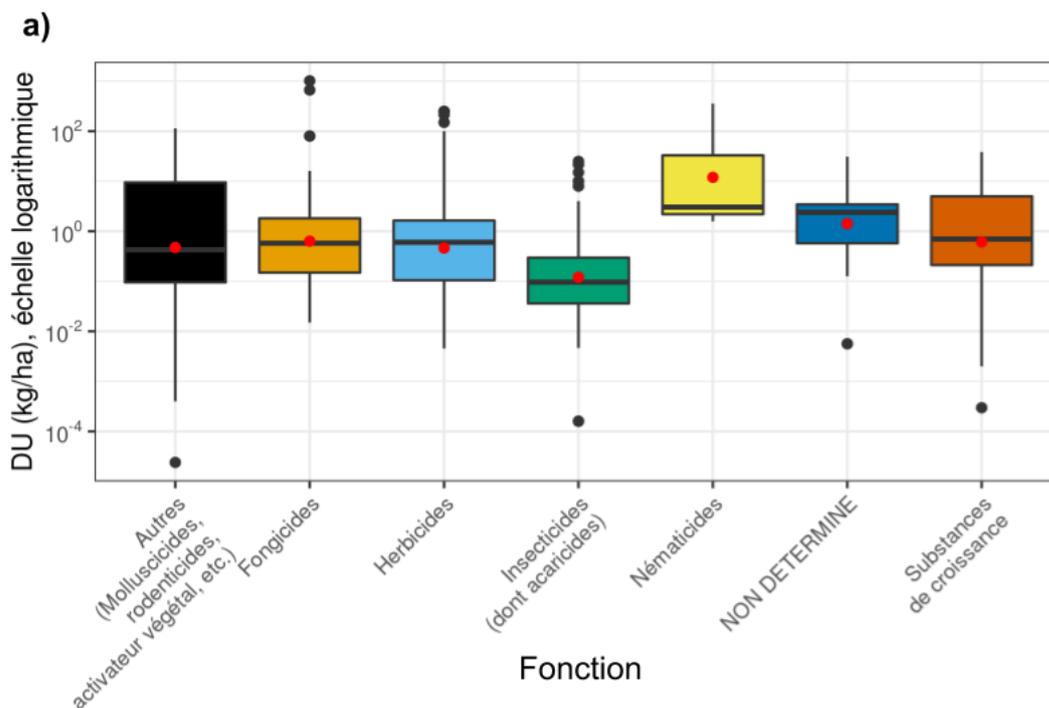


Figure 1.1.5 : a) Distribution des DU 2017 selon le classement CMR et b) Résultats de tests de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les comparaisons des classements CMR deux à deux.

Les DU varient cependant selon les fonctions (herbicides, fongicides, insecticides, etc..) attribuées¹⁵ aux substances actives (**Fig. 1.1.6** ; voir source de données **Annexe B.4**). Les doses homologuées des insecticides, et donc leurs DU, sont sensiblement et significativement plus faibles que les autres fonctions (**Fig. 1.1.6b**). En conséquence des faibles DU qui lui sont associées, la fonction Insecticides va peser plus fortement dans le NODU que dans la QSA par rapport aux autres fonctions. Bien que les analyses statistiques effectuées prennent en compte des différences d'effectifs entre groupe, les nématicides ont été exclus des analyses car ils sont constitués de seulement 3 substances (cf. **Annexe B.4**).

¹⁵ Les substances actives qui peuvent être utilisées pour des fonctions diverses (7 % des substances avec fonctions attribuées) ont été attribuées à une fonction "principale" après consultation d'experts (**Annexe B.2**)



b)

Groupes comparés	p-value	Statistiques
Substances de croissance - Autres	0.7376234	501.5
Substances de croissance - Herbicides	0.2690157	3197.5
Substances de croissance - Insecticides	0.0001124 ***	1494
Substances de croissance - Fongicides	0.4130767	3001
Autres - Herbicides	0.6936691	4162
Autres - Insecticides	0.0018011 **	3893
Autres - Fongicides	0.8635121	3687.5
Herbicides - Insecticides	< 10⁻⁷ ***	28372
Herbicides - Fongicides	0.3849399	26216.5
Insecticides - Fongicides	< 10⁻⁷ ***	27582.5

Nombre de DU : Substance de croissance (31), Autres (34), Herbicides (235), Insecticides (171) et non inclut dans les tests : NON DETERMINE (19), Nématocides (3)

Figure 1.1.6 : a) Distribution des DU 2017 selon les fonctions attribuées aux substances actives par le ministère. b) Résultats de tests de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les comparaisons des fonctions deux à deux. Les différences avec les fonctions Nématocides et NON DETERMINE n'ont pas été testées du fait du nombre trop faible de substances dans chaque groupe.

Composition des indicateurs en termes de DU (2017) et évolution.

Pour répondre à la question 4) qui cherche à établir la composition des substances contribuant le plus aux indicateurs QSA et NODU, ainsi que son évolution dans le temps, nous avons regardé la part des indicateurs QSA et NODU selon l'ordre de grandeur des DU des substances qui les composent.

La **Fig. 1.1.7** illustre bien le fait que le NODU traduit davantage l'évolution de substances moins pondéreuses que la QSA. La QSA est formée majoritairement par des substances ayant une $DU > 1$ kg/ha (**Fig. 1.1.7a**) alors que le NODU est formé dans une large majorité par des substances ayant une $DU < 0.1$ kg/ha (**Fig. 1.1.7b**). On constate également que la part de la QSA associée à des substances avec une DU d'ordre de grandeur très élevée ($>10^3$ kg/ha) diminue au cours du temps, alors que celle associée à des substances avec une DU d'ordre de grandeur moyen (entre 1 et 9 kg/ha) augmente (**Fig. 1.1.7a**). Ces résultats montrent une diminution de la part de la QSA prise par prise par substances très pondéreuses ces 10 dernières années (metam-sodium, $DU=1015$ kg/ha). De même, la part de NODU prise par des substances ayant une DU d'ordre de grandeur faible (entre 0.1 et 0.9 kg/ha) diminue alors que celle prise par des substances ayant une DU d'ordre de grandeur très faible (entre 0.01 et 0.09 kg/ha) augmente (**Fig. 1.1.7b**). Ces résultats impliquent une augmentation de la part des traitements réalisés avec des substances à très faible DU. La part prise par des substances plus pondéreuses semblent donc diminuer au cours des ans pour les deux indicateurs, soit en terme de quantité pour des substances très pondéreuses au profit de substances moyennement pondéreuses ou en nombre de "traitements" (NODU) pour substances faiblement pondéreuse au profit de substances très faiblement pondéreuses. Ces deux résultats ne permettent pas, cependant, de démontrer que des remplacement de substances à forte DU par des substances à plus faible DU des ont eu lieu pour des usages similaires comme mentionnés ultérieurement (cf. **section 1.1.1**). Cette question est en effet plus complexe à résoudre, notamment pour démontrer l'existence de substitutions avec les données de la BNV-d (voir questionnements **Partie 2 section 2.1.3**).

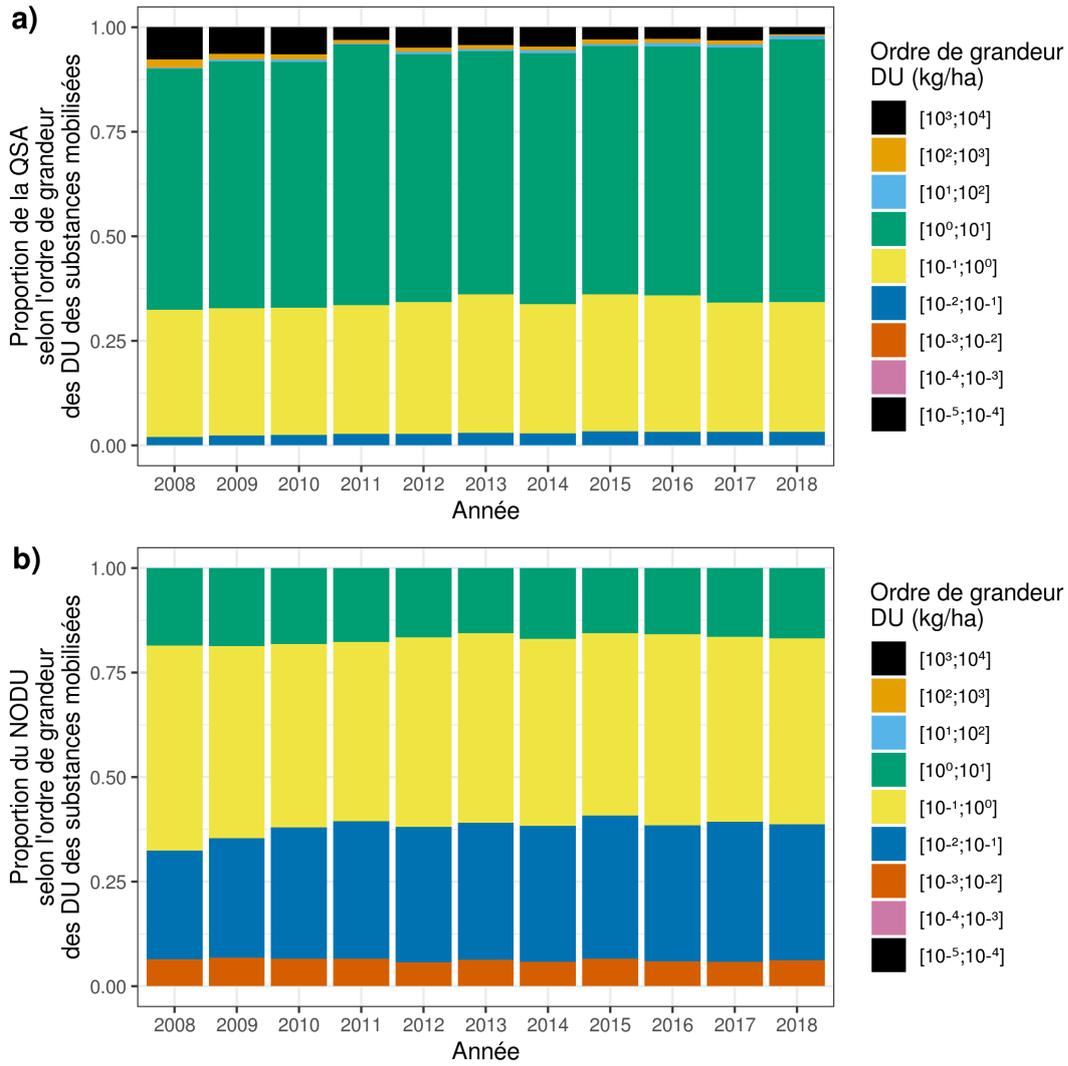


Figure 1.1.7 : Ordre de grandeur des DU des substances actives mobilisées pour le calcul de la QSA a) et du NODU b) du segment agricole - UA

Pour résumer cette section sur les DUs, on peut dire que les DU de référence calculées ne varient peu au cours du temps et que le calcul du NODU et la mesure de ces variations en sont également peu affectés. Les DU d'une année de référence données sont d'ailleurs très souvent similaires aux doses homologuées médianes de chaque substance et varient, pour certaines, selon les spécificités des produits (segment) ou des substances actives (fonction). Enfin, la QSA et le NODU rendent compte différemment du panel de substances vendues, le NODU étant moins affecté par les substances les plus pondéreuses.

1.1.6. Comparaison et mise en perspective des indicateurs QSA et NODU

La QSA et le NODU diffèrent du fait qu'ils mettent en avant l'évolution des ventes de substances actives distinctes, les plus pondéreuses pour la QSA ($DU > 1 \text{ kg/ha}$,. **Fig. 1.1.7a**) et les plus "fréquemment" utilisées pour le NODU (celles qui sont utilisées en plus grande quantité au regard de leurs doses homologuées, $DU < 1 \text{ kg/ha}$,. **Fig. 1.1.7b**). Au niveau national, on peut constater que les deux indicateurs marquent des tendances similaires d'évolution entre les années (**Fig. 1.1.8**). Dans cette figure et dans le reste du document, les NODU et QSA ne sont pas calculés sur la même assiette de substances, les substances sans DU étant inclus dans le calcul de la QSA. Ce choix méthodologique respecte les pratiques actuelles d'utilisation des indicateurs, les substances sans DU n'étant pas retirées de la QSA, et permet également de regarder les évolutions des segments où les DU ne sont pas calculées (biocontrôle, traitement de semences...).

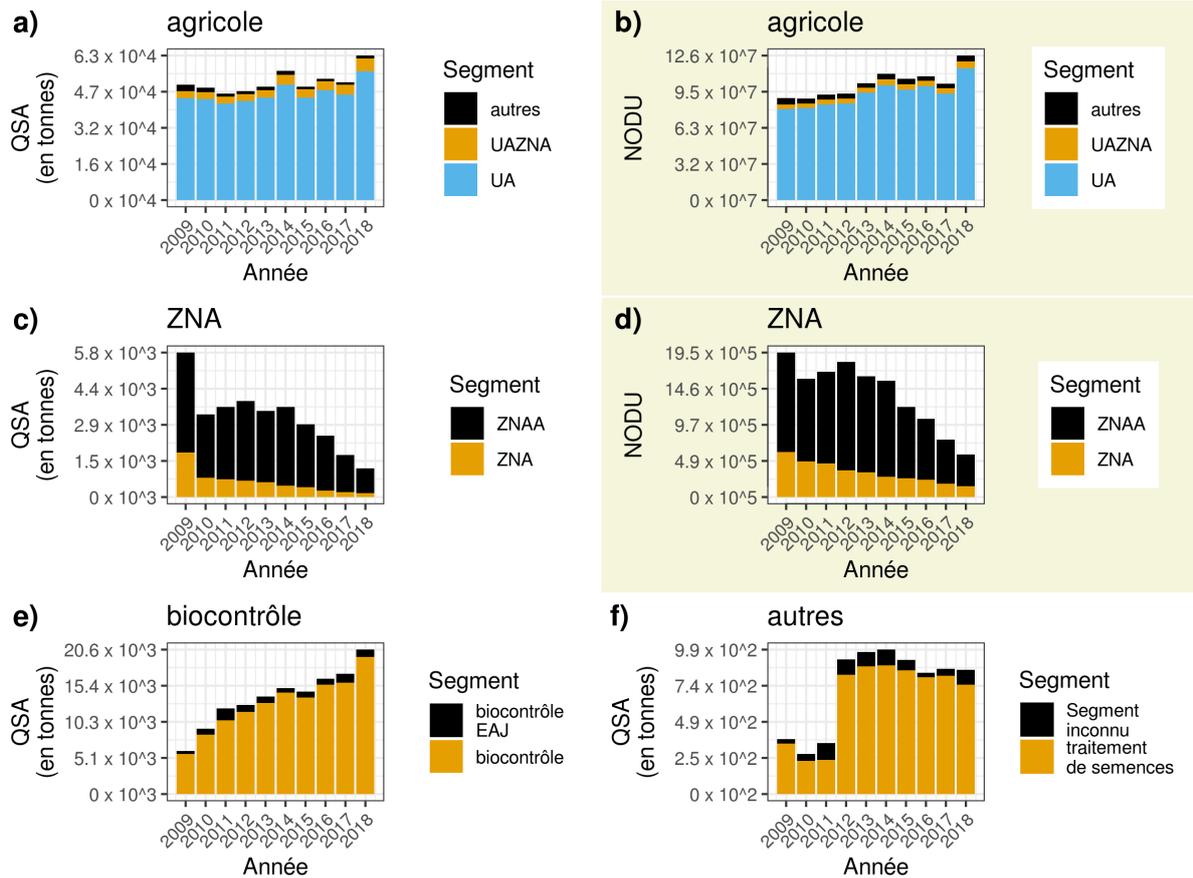


Figure 1.1.8 : Evolution de la QSA et du NODU selon les segments et les années (source : BNV-d bilan).

Les deux indicateurs, calculés pour le segment agricole avec la BNV-d Bilan, sont d'ailleurs relativement corrélés, tant au niveau national (coefficient de corrélation de Pearson : 0.89; voir **Fig. 1.1.9**) qu'aux niveaux les plus fins (code commune INSEE du distributeur, coefficient de corrélation de Pearson : 0.92). On constate, cependant, des différences importantes entre les deux indicateurs notamment dans la manière dont ils classent les années. Au niveau national, par exemple, on constate une QSA minimale pour les années 2011 et 2012 alors qu'on trouve un NODU minimal pour les années 2009 et 2010. Ces différences traduisent des dynamiques différentes entre les substances pondéreuses et celles utilisées plus fréquemment.

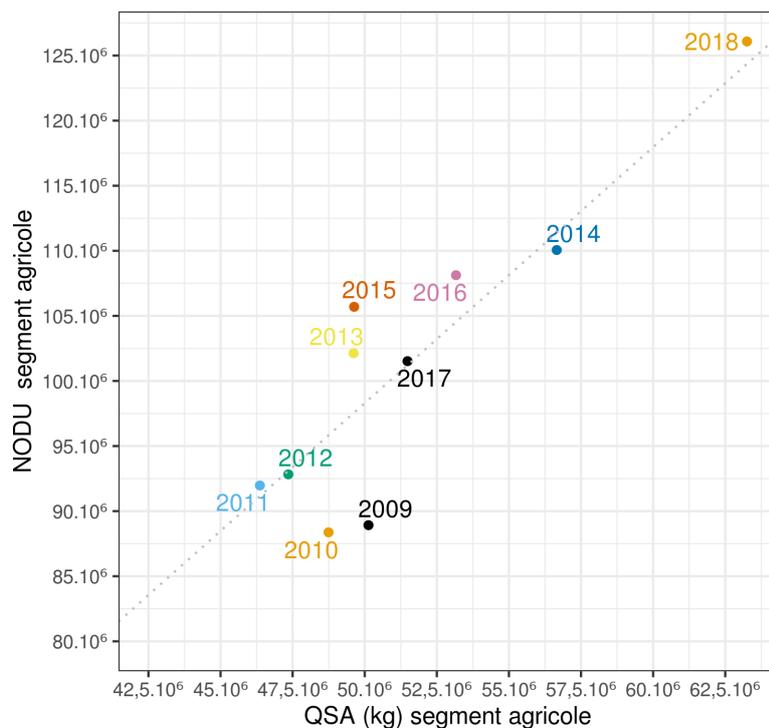


Figure 1.1.9 : Comparaison des NODU et QSA nationaux annuels selon les années (source : BNV-d bilan)

La QSA se limite à la masse des produits et permet d'observer l'évolution des ventes de substances sans faire appel à d'autres bases de données (EPHY, SAA, etc..). L'indicateur NODU, à l'inverse, propose une manière de comparer les substances actives vendues entre elles au moyen des DU. Il est utile de rappeler que les DU ne peuvent pas non plus être interprétées comme un indicateur de dangerosité ou de risque des substances (voir **section 1.1.5 Q3**). Le NODU est une mesure du nombre de traitements vendus sur un territoire et traduit l'intensité d'utilisation de produits phytosanitaires.

Depuis les années 1990, un certain nombre d'indicateurs ont été développés pour évaluer l'impact des produits phytosanitaires sur la santé humaine ou la dégradation de l'environnement. Un grand nombre d'entre eux évalue le risque de chaque pesticide individuellement :

- l'EIQ (Environmental Impact Quotient), développé à l'université de Cornell (New York), est un des premiers indicateurs qui a été largement utilisé. Il consiste en un système de notation des risques associés à la santé des travailleurs, à la santé des consommateurs, au devenir des pesticides dans l'environnement et leurs effets sur les organismes terrestres et aquatiques (Kovach et al., 1992).

- SYNOPSIS-TREND est un indicateur allemand basé sur les données de ventes qui évalue le risque environnemental en prédisant la concentration des pesticides dans différents compartiments et le taux d'exposition pour divers organismes cibles (Strassemeyer et al., 2017).
- I-Phy, testé en France et en Allemagne, calcule le risque de contamination de l'eau et l'air basé sur les propriétés des pesticides (van der Werf et Zimmer, 1998).
- NERI développé en Norvège et qui classe les pesticides en quatre classes de risque (Stenrod et al., 2008).

Plus récemment, un indicateur de la charge en pesticide (LI : Danish Load Index) prenant en compte l'impact global des pesticides a été introduit au Danemark pour remplacer l'usage de IFT (Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires) (Möhring et al., 2019). Le LI est proche dans sa construction de l'IFT et, dans une moindre mesure, du NODU. Il est basé, comme l'IFT, sur la somme des quantités de pesticides appliquées rapportées à leur dose homologuée standard pour une culture donnée avec, en plus, une pondération par un facteur de risque associé à chaque pesticide basé sur trois sous-indicateurs qui évalue le risque pour la santé humaine, l'écotoxicologie et le devenir dans l'environnement (Kudsk et al., 2018; Möhring et al., 2019). Selon les auteurs, le LI serait un meilleur indicateur pour les politiques publiques car il permettrait de mieux prendre en compte les risques extrêmes associés par exemple à une utilisation importante d'un produit particulièrement néfaste (Möhring et al., 2019). Cet indicateur promeut une démarche de réduction de l'impact des pesticides, non leurs quantités dans l'absolu. Cette approche n'est cependant pas aisée à mettre en œuvre car elle repose sur des arbitrages complexes relevant de choix sociétaux notamment sur la pondération des différents risques les uns par rapport aux autres comme entre la santé humaine et l'environnement, ou bien entre la toxicité sur différentes espèces. Dans le LI, par exemple, il est choisi que la toxicité sur les abeilles impacte 100 fois plus le risque écotoxicologique que celle sur les oiseaux ou sur les mammifères. En conséquence, ces pondérations rendent l'indicateur qui en résulte encore plus complexe à saisir que le NODU. Par ailleurs, le cas danois n'est pas non plus transférable directement en France car ce pays dispose de bases de données plus précises que la BNV-d, basées sur les utilisations réelles en pesticides et non les ventes : les agriculteurs

sont en effet contraint à déclarer leurs utilisations en produits phytosanitaires dans une base de données centralisée.

En définitive, tous les indicateurs donnent par définition une vision partielle et orientée d'un phénomène. On peut les répartir entre des indicateurs facilement quantifiables mais difficiles à interpréter en termes de risques pour l'homme et l'environnement (QSA) et ceux plus faciles à interpréter mais dont le calcul est plus complexe à réaliser et sujette à débat (LI). Pour bien appréhender un phénomène comme l'utilisation de pesticides et ses risques associés, il s'agit, dans la mesure du possible, de 1) mobiliser plusieurs indicateurs, chacun montrant une facette différente du phénomène, 2) s'intéresser aux substances actives qui contribuent le plus aux indicateurs pour mieux comprendre ce dont l'indicateur rend compte réellement et 3) décliner les indicateurs sur différentes échelles spatiales et temporelles ainsi que différentes catégories de substances actives ou d'AMM pertinentes pour la question à laquelle on souhaite répondre (cf. **section 1.1.4**). C'est cette démarche que nous avons suivie pour évaluer les déterminants externes de l'utilisation en produits phytosanitaires dans la **Partie 2**.

1.2. Acquisition et caractéristiques des données de la BNV-d

Les ventes enregistrées dans la BNV-d ont un niveau de précision, d'exhaustivité et d'exactitude qui doivent être connus et pris en compte lorsqu'on veut les mobiliser pour répondre à des questions sur l'utilisation des pesticides sur le territoire français. Un rapport réalisé en 2018 par un groupe de travail associé à l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) et l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) dresse un premier bilan sur la qualité de cette base de données et les pistes d'amélioration (Malherbe et al., 2019). Dans cette section, nous avons rassemblé l'ensemble des questions sur la qualité des données que nous avons pu identifier dans ce rapport, dans les échanges avec les chargés de mission Ecophyto et par notre manipulation de la BNV-d :

- 1) A partir de quand les données BNV-d d'une année donnée sont-elles suffisamment fiables pour être mobilisées? (**section 1.2.1**)
- 2) Quels produits et substances sont pris en compte et à quel niveau de détail ? (**section 1.2.2**)
- 3) Y a-t-il des erreurs ou des imprécisions dans les données publiées et ont-elles un impact important sur les indicateurs et leur évolution? (**section 1.2.3**)

Pour chacune des questions nous avons cherché à préciser, illustrer et quantifier les problèmes soulevés afin de sécuriser et fiabiliser la valorisation des données de la BNV-d, en particulier en appui du plan Ecophyto. Après une présentation des données disponibles dans la BNV-d, c'est-à-dire la quantité de produits phytosanitaires vendue selon le lieu de la vente ou l'acheteur final, il s'agit de déterminer la fiabilité de ces données telles qu'elles sont présentées. Il ne s'agit pas de traiter de la manière dont ces données reflètent bien, ou non, l'utilisation en produit phytosanitaire. Ce point sera abordé en **section 1.3.**

1.2.1. Présentation de générale de la BNV-d

La BNV-d est alimentée annuellement par les distributeurs français et les acheteurs français qui se fournissent en produits phytosanitaires à l'étranger via un site internet¹⁶. Les données sont collectées par les agences et offices de l'eau dans le cadre des déclarations pour la Redevance pour Pollutions Diffuse (RPD). Ces télédéclarations sont faites avec l'appui technique de l'INERIS. Depuis 2012, l'Agence de l'Eau Artois-Picardie est le gestionnaire principal de la BNV-d et est le seul organisme, avec l'appui de l'INERIS, pouvant déverser des données ou opérer des modifications (Borrell, Anaïs, 2018).

On trouve dans la BNV-d des produits phytosanitaires constitués de substances actives ou préparations contenant une ou plusieurs substances actives destinées à agir sur les végétaux dans le but de les protéger d'organismes nuisibles, d'agir sur leur processus vitaux hors nutrition, de favoriser leur conservation, ou bien de détruire ou limiter la croissance de végétaux indésirables (voir définition officielle des produits phytosanitaires dans l'article 3 du règlement (CE) n°1107/2009, reprise dans l'article L 253-1 du code rural). Ces produits sont utilisés principalement pour la production agricole mais aussi dans la gestion des espaces verts en général.

L'ensemble des produits phytosanitaires vendus soumis ou non à la RPD doivent être déclarés sous la forme d'un bilan (détaillé par distributeur) ou d'un registre (détaillée par acheteur), selon les obligations réglementaires du déclarant (Borrell, Anaïs, 2018). La BNV-d est fournie sous la forme de deux bases de données :

- i) une BNV-d **Bilan**, qui donne les quantités vendues de chaque produits phytosanitaires, définis par une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM), et la quantité de substances actives associées à partir de 2008, localisées au code commune INSEE de l'établissement du distributeur ou de son siège social. La BNV-d Bilan est alimentée par les bilans et les registres, ces derniers étant agrégés au code comme INSEE.
- ii) une BNV-d **Registre**, qui fournit les mêmes informations sur les quantités vendues mais localisées au Code Postal (CP) de l'acheteur final et à partir de 2013. Le registre impose aux

¹⁶ <http://redevancephyto.developpement-durable.gouv.fr/>

distributeurs de produits phytosanitaires d'associer chaque vente au CP l'acheteur final, c'est-à-dire, l'acheteur ou le client de l'acheteur, si ce dernier est un prestataire de service (ex : trieurs à façon). Dans le cas d'un acheteur final professionnel, le CP sera celui du siège de l'entreprise.

La BNV-d Registre n'est alimentée que par les registres.

Ces bases fournissent également d'autres informations notamment sur les produits, le lieu de ventes ou d'achats et les distributeurs (**Annexe C**).

1.2.2. Temporalité d'accès à des données stabilisées de la BNV-d

La disponibilité et la fiabilité des données de ventes pour une année donnée N dépendent du processus de déclaration et de contrôle mis en place par la loi sur l'eau 2006 (Borrell, Anaïs, 2018). Les distributeurs français et les acheteurs français qui se fournissent en produits phytosanitaires à l'étranger déclarent les ventes ou les achats d'une année N entre le 1^{er} janvier et 31 mars de l'année N+1. La forme de leur déclaration, registre obligatoire, registre optionnel ou bilan, dépend des obligations de ces derniers que nous préciserons plus loin (cf. **section 1.2.3**). Un accès aux ventes de l'année N est donc théoriquement possible à partir d'avril de l'année N+1. Ces données peuvent cependant être modifiées jusqu'à l'année N+3 par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et sont donc provisoires durant cette période. Des contrôles automatiques, effectués au moment de la télédéclaration et du versement des données, permettent de limiter les erreurs dans les quantités de produits ou dans l'écriture de certains mots ou codes (nom de la commune et son code INSEE, le code postal de l'acheteur, le numéro de SIREN du distributeur...) (Malherbe et al., 2019). Ce sont principalement les séries de contrôle des déclarations de distributeurs réalisés par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie après la période de déclaration et en fin d'année (exemple 2^e et 4^e trimestre de l'année N+1) qui peuvent faire constater des erreurs de quantités vendues et entraîner des modifications dans les données publiées. Pour cette raison et, bien que des modifications ultérieures puissent être effectuées, les données de l'année N sont déjà considérées comme suffisamment fiables en fin d'année N+1 (septembre - octobre) et sont donc transmises aux acteurs du plan Ecophyto à cette période (cf. **Fig. 1.2.1**).

Dans leur rapport de 2018, le groupe de travail sur la qualité des données reconnaît une fiabilité des données dans leur ensemble, mais note la présence ponctuelle de quantités manifestement erronées ou singulières (Malherbe et al., 2019). Selon eux, on peut considérer que les données sont stabilisés à la fin de l'année N+1 mais que des erreurs et des imprécisions peuvent persister (cf. **Fig. 1.2.1**). La description et la quantification de ces erreurs seront abordées en **section 1.2.4**.

1.2.3. Evolution des catégories de produits prises en compte et de la résolution spatiale et temporelle de la BNV-d

Les données enregistrées sont aussi affectées par l'historique des réglementations associées à la mise en place de la BNV-d. Un certain nombre d'arrêtés pris successivement entre 2011 et 2016 ont rendu progressivement obligatoire la déclaration de produits phytosanitaires avec un niveau de résolution spatiale et temporelle différent (Borrell, Anaïs, 2018). Cet historique affecte également le type et le niveau de détail des produits et substances qui sont pris en compte. Or, il est essentiel, notamment lors de l'étude des évolutions temporelles, de comparer des quantités de ventes qui correspondent à des acheteurs et des ensembles de types de produits comparables (même assiette).

Depuis sa mise en place, les évolutions majeures de la BNV-d sont :

- 1) l'extension de la liste des assujettis à la déclaration des ventes et,
- 2) l'extension de la liste des assujettis à la déclaration obligatoire d'un registre à la place d'un bilan.

Ces extensions sont réalisées après la première année d'obtention de données de ventes et peuvent donc impacter la perception de l'évolution de ces ventes. La première évolution affecte le volume et le type de produits vendus répertoriés dans la BNV-d, c'est-à-dire l'exhaustivité de la BNV-d. Par exemple, les produits de traitement de semences ne sont pas disponibles dans la base Bilan avant 2012, année à laquelle la transmission du bilan par les distributeurs de traitement de semence est rendue obligatoire. La deuxième évolution affecte la capacité de relier, via le code postal de l'acheteur final, les ventes à une localisation intra-nationale des achats, c'est-à-dire la précision de la BNV-d. A partir de 2013, un certain nombre d'assujettis déclarent leurs ventes sous la forme d'un registre au lieu d'un bilan. La BNV-d Registre est donc disponible à partir de cette date. Il est également considéré que les années de mise

en place des bases Bilan et Registre, 2008 et 2013 respectivement, doivent être exclues des analyses car l'intégralité des Bilans ou Registres n'ont pas été transmis.¹⁷ La **Fig. 1.2.1** résume quels produits phytosanitaires ou substances la BNV-d permet de suivre sur quelle période, sur quelle zone et à quel grain spatial.

¹⁷ L'Agence de l'Eau estime qu'en 2013, 30% des registres ont été déclarés et en 2014, 90% auraient été transmis.

Une conséquence de l'évolution de la structuration des données de la BNV-d est que sa mobilisation implique de choisir le jeu de données le plus adéquat en fonction de la question posée et des priorités qui en découlent.

Résolution temporelle

Si on souhaite étudier la vente de produits phytosanitaires sur de longues séries temporelles, il faut mobiliser la BNV-d Bilan à l'échelle nationale à partir de 2009. La sélection de produits appartenant aux segments agricole, biocontrôle et ZNA permet de disposer du plus long jeu de données (2009 à aujourd'hui). Les ventes amateurs ou de traitements de semences ne sont mobilisables qu'à partir de 2012 (**Fig. 1.2.1**). Sur la **Fig. 1.1.8f**, on peut constater que la prise en compte des distributeurs de semences est particulièrement visible avec une multiplication par quatre de la QSA sur ce segment traitement de semences. La prise en compte des ventes amateurs est moins visible avec la QSA du segment ZNAA, qui montre une forte valeur déjà en 2009 (**Fig. 1.1.8c et d**).

Résolution spatiale

Si on souhaite étudier les achats en produits phytosanitaires sur des échelles spatiales fines (région, département, petite région agricole), il faut privilégier la BNV-d Registre à partir de 2014 sur les segments agricole, biocontrôle ou ZNA. La BNV-d Registre rapporte les ventes des produits phytosanitaires aux codes postaux des acheteurs finaux (CP), il est donc possible de disposer de la localisation du siège des acheteurs finaux directement à cette échelle. Cependant, il n'existe pas de lien administratif direct entre les codes postaux et les unités spatiales administratives supérieures telles que la région, le département, la Petite Région Agricole (PRA). Pour pouvoir agréger les ventes à ces unités spatiales et calculer des indicateurs comme le NODU ou la QSA, il faut donc trouver un moyen d'attribuer les ventes des codes postaux à ces unités spatiales. Il existe des bases de données reliant les codes postaux aux communes identifiées par leur code INSEE, qui elles-mêmes sont reliées aux unités spatiales administratives supérieures. Ces bases de données confirment le lien complexe entre les codes postaux et les communes, puisqu'un grand nombre de codes postaux sont reliés à plusieurs communes (identifiée par un code INSEE) et que certaines communes sont reliées à plusieurs codes postaux. Il n'est pas possible de savoir exactement avec la BNV-d dans quelle commune les ventes ont été réalisées. Il

faut donc décider d'une stratégie de répartition des ventes de chaque code postal entre les communes auxquelles il est associé.

S'il est possible de répartir les ventes de manière uniforme entre les communes qui composent le CP, on peut obtenir une répartition probablement plus vraisemblable en pondérant cette répartition avec un facteur comme la surface ou le nombre de lieux-dits (cf. **Annexe D**). Cette répartition permet d'attribuer avec une très bonne certitude les ventes au niveau du département et des régions : moins de 1% de la QSA totale¹⁸ est localisée sur des CP reliés à plusieurs départements. On peut également attribuer les ventes à des échelles plus fines comme la PRA. Dans ce cas, une beaucoup plus grande part de la QSA est localisée sur des CP appartenant à plusieurs PRA (43.8 %), ce qui donne plus de poids à la technique de répartition. D'autres stratégies de répartition des achats au CP sur des échelles encore plus fines ont été développées dans le cadre du projet Spatialisation (exemple : aire d'alimentation de captage). Il s'agit de répartir les achats de produits phytosanitaires là où ils ont probablement été utilisés en s'appuyant sur les données d'occupation des sols et les usages prévues pour chaque produit (Seard et al., 2017). Cette répartition implique une réflexion sur le lien entre l'achat et l'usage qui sera abordé **section 1.3**.

Par ailleurs, la BNV-d Bilan peut également être mobilisée pour une échelle spatiale infra-nationale si on souhaite étudier le comportement de ventes des distributeurs en s'appuyant sur le code commune INSEE des distributeurs. Cependant, ce code INSEE devrait être utilisé avec précaution puisqu'il ne se rapporte pas toujours à la même localisation : parfois à la localisation du distributeur, parfois à celle du siège social d'une groupe de distributeurs. Par exemple, les ventes d'un négoce important sont toutes rapportées dans le département où se trouve son siège social, alors que ses ventes sont réalisées sur une partie du territoire national.

¹⁸ nationale, BNV-d Registre 2008 à 2018

1.2.4. Fiabilité des données enregistrée

Certaines erreurs ou imprécisions peuvent s'insérer dans les données au moment de la déclaration ou des opérations de gestion des bases de données avant leur publication en ligne. Il s'agit donc de les identifier et de quantifier leur impact sur la mesure des ventes et de leurs variations interannuelles, notamment au travers des indicateurs de suivi.

Les biais associés au NODU étant très similaires à ceux de la QSA, seul la QSA sera commenté dans les paragraphes suivants, celle-ci ayant une valeur pour l'ensemble des segments de la BNV-d. Les biais du NODU seront présentés à la fin de la section, cependant, dans le paragraphe sur la synthèse des biais.

Fiabilité des données Registre par rapport aux données Bilan

Une partie des erreurs ou des imprécisions de la BNV-d Registre peut être identifiées en la comparant à la BNV-d Bilan qui est plus complète sur la période 2014-2018. Dans la **Fig. 1.2.2**, le pourcentage de différence entre les indicateurs (QSA et NODU) calculés pour le Bilan et le Registre est présenté pour chaque année et chaque segment au niveau national.

On constate que les QSA calculées à partir du Bilan sont globalement plus grandes que celles du Registre, ce qui confirme bien que la base de données Bilan est plus exhaustive que celle Registre. Seulement deux observations annuelles (sur 35) des différences $(QSA_{\text{Bilan}} - QSA_{\text{Registre}})/QSA_{\text{Bilan}}$ sont négatives mais relativement faibles (pas plus de -1% de différence) et sur des segments spécifiques (traitement de semences, ZNA et inconnu). Enfin, les segments agricole et biocontrôle sont relativement cohérents entre les deux bases (< 2.2 % de différence pour la QSA).

Le segment agricole semble de mieux en mieux pris en compte dans le Registre au cours des années passant d'une différence de QSA entre Bilan et Registre de 2.1 à 0.7% entre 2014 et 2018 (**Fig. 1.2.2a**). Ce phénomène peut s'expliquer par l'élargissement de la liste des assujettis à l'obligation de transmission d'un registre en 2015. L'obligation s'étend en effet aux assujettis qui versent une Redevance Pollution Diffuse (RPD) de plus de 100 €, au lieu d'un montant plancher de RPD supérieur à 5000 € (cf. **Fig. 1.2.1**). Cette extension des assujettis n'explique pas la différence de QSA entre Bilan et Registre s'accroît pour le segment biocontrôle, qui s'accroît entre 2014 et 2018, passant d'une

différence de 0.7 % à 2.0 % (**Fig. 1.2.2b**). Ces résultats indiquent que la base de données Registre semble être relativement exhaustive pour les segments agricole et biocontrôle et peut donc être mobilisée sans limite majeure (différence de QSA < 2%). Des différences d'assiette de déclaration entre années des registres existent, cependant, et peuvent générer des variations interannuelles des indicateurs que l'on appellera "internes", car causées par des déterminants internes (biais) et non externes (causes de l'utilisation) (cf. **Fig. 0.1**). Les variations interannuelles internes de la QSA sont inférieures à 1% sur ces segments : une augmentation pour le segment agricole (max 0.6 % entre 2015 et 2016) et une diminution pour le segment biocontrôle (max 0.8 % entre 2017 et 2018), causées par, respectivement, un gain ou une perte des données de certaines ventes dans la base Registre.

Comme on pouvait l'attendre, les produits phytosanitaires vendus autorisés pour la vente aux amateurs (EAJ) sont peu représentés dans la BNV-d Registre (pourcentage de différence entre QSA Bilan et Registre, 50 à 70 % pour biocontrôle EAJ et 45 et 60% pour ZNAA ; **Fig. 1.2.2c et g**). Chaque année, les distributeurs pour amateurs transmettent leur bilan ou parfois leur registre. Ces résultats montrent qu'ils sont peu nombreux à transmettre le registre et confirment que la BNV-d Registre ne peut être mobilisée pour ces segments.

Pour le segment traitement de semences, on constate bien une réduction de la différence de la BNV-d Bilan par rapport à la BNV-d Registre entre 2014 et 2017 (7.5 % à presque 0 %, **Fig. 1.2.2e**) qui traduit très probablement l'obligation des distributeurs de traitement de semences à transmettre leur registre à partir de 2016. En 2018, cependant, la différence est de nouveau importante (11.0 %). Il est possible que cette augmentation relève d'erreurs sur les données 2018. Il faudrait vérifier dans les nouvelles extractions ce qu'il en est. En l'état, il semble plus raisonnable de mobiliser la BNV-d Registre sur le segment traitement de semence pour les années 2015 à 2017 uniquement.

Bien que les professionnels non agricoles (ZNA) soient légalement contraints à transmettre leur registre depuis 2008, il est préférable de ne pas mobiliser la BNV-d Registre sur ce segment. A part pour 2018 (1.7 %), les différences de QSA entre Bilan et Registre pour le segment ZNA sont assez importantes et

fluctuantes (entre 2.5 % et 5.6 %, variation interannuelle maximale de - 3.4 % entre 2017 et 2018, **Fig.**

1.2.2f).

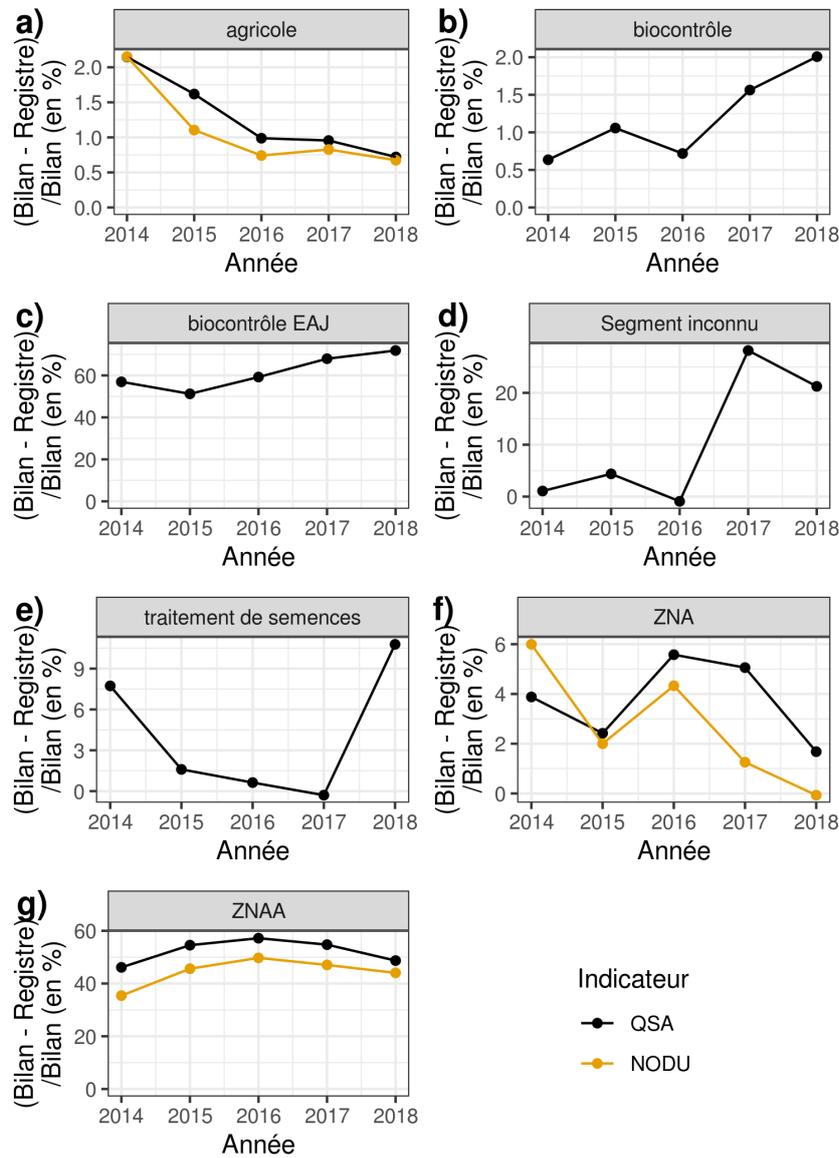


Figure 1.2.2 : Pourcentage de différence d'indicateurs (QSA et NODU) calculés entre les données bilan et registre selon les différents segments et les différentes années

Nous avons travaillé sur des bases de données Registre et Bilan séparé, ce qui implique que l'analyse des différences ne peut être réalisée qu'au moyen de corrélations. Pour mieux estimer la cohérence entre les deux bases et identifier d'éventuelles erreurs, il faudrait mobiliser une BNV-d jointe, fournissant à la fois les informations sur les distributeurs (code commune INSEE) et sur les acheteurs (code postal acheteur).

Ventes du Registre non localisés : codes postaux non renseignés ou erronés

Les codes postaux des acheteurs visent à mieux estimer le lieu d'utilisation des pesticides vendus. Dans la BNV-d Registre, certains codes postaux des acheteurs (CP) prennent la valeur zéro ou une valeur que l'on ne parvient pas à relier à un code postal en France. Cela signifie que les ventes associées ne peuvent être localisées et peuvent donc biaiser la comptabilisation des ventes pour chaque unité spatiale considérée.

Les codes postaux inconnus peuvent être dûs à des erreurs du distributeur (ex : 530, déclaration du CEDEX au lieu de CP) ou bien à des CP qui n'apparaissent pas dans les bases de données mobilisées. Ces codes postaux représentent cependant une quantité très faible des ventes (0.01% de la QSA tous segments confondus). Les CP à 0 étant en largement plus grand nombre par rapport aux CP inconnus (cf. **Fig. 1.2.3**), on peut considérer qu'ils sont principalement responsables des problèmes de localisations des données Registre (Registre non localisé).

Plusieurs causes ont pu être identifiées comme pouvant expliquer la valeur zéro de certains CP :

- Les ventes sont issues de **distributeurs amateurs** qui ne sont pas contraints à fournir le CP des acheteurs. Ce sont d'ailleurs, pour la période 2009 à 2018, les segments amateurs qui ont la plus forte proportion de CP à 0 (23.3% et 27.3% de la QSA des segments biocontrôle EAJ et ZNAA, respectivement). 13% de la QSA associée à un CP à 0 appartient à un segment amateur.
- Les déclarations de registres ayant subi des **modifications suite à un contrôle** par l'Agence de l'Eau perdent souvent l'information du CP qui est remplacé par 0. En effet, si des erreurs de quantités sont constatées par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, les distributeurs sont alors contraints de transmettre à nouveau leurs données corrigées mais peuvent le faire sous la forme

d'un bilan. Cette opération a donc pour conséquence de retirer des CP dans la base Registre publiée ultérieurement, ce qui peut affecter sensiblement la mesure des évolutions de ventes locales. Par exemple, en Bretagne, les ventes de prosulfocarbe sont passées d'une augmentation de 40% entre 2016 et 2017 à 14% entre deux bases de données Registre extraites avant ou après la réalisation d'un contrôle.

- Certains CP qui correspondent aux **ventes de la SNCF** sont nuls. La consommation importante et spatialement distribuée de produits phytosanitaires par certaines entreprises en France interroge sur les CP qu'on peut attribuer à ces ventes. Cette question se pose en particulier pour la SNCF pour le traitement des voies de chemin de fer. La SNCF se fournit à 4 distributeurs seulement qui ont chacun une logique distincte de déclaration, dont certains n'indiquent pas le CP (qui est donc à 0). Le sens des CP effectivement localisés par certains distributeurs est également incertain : une partie faisant référence au siège social de la SNCF.

Les causes présentées ci-dessus ont été identifiées sur une BNV-d Registre extraite avant octobre 2019. A partir de novembre 2020, des opérations effectuées par les DRAAF et l'Agence de l'Eau sont en cours pour "restaurer les CP" qui ont été retirés à la suite de d'une opération de contrôle de l'Agence de l'Eau.

Si pour certaines ventes de produits dans des zones spécifiques les variations associées à des CP à 0 peuvent être notables (ex: prosulfocarbe en Bretagne), la part de la QSA associée aux CP 0 (QSA non localisée) est cependant plus limitée au niveau national sur les segments qui sont théoriquement mobilisables de la BNV-d Registre sur la période 2009-2018, c'est à dire le segment agricole, biocontrôle et ZNA (cf. **Fig. 1.2.1**). La part de QSA non localisée est tout de même non négligeable prenant certaines années jusqu'à 6.1 % du segment agricole (**Fig. 1.2.3a**), 7.6 % du segment biocontrôle (**Fig. 1.2.3b**) et 12.1% du segment ZNA (**Fig. 1.2.3f**). On constate également des variations interannuelles importantes de la part de QSA non localisée, avec pic en 2016 pour les segments agricole et biocontrôle (**Fig. 1.2.3a** et **b**). La perte et le gain de la localisation de certaines ventes peuvent donc générer des variations interannuelles internes de la QSA effectivement localisée (disposant d'un CP) allant jusqu'à 3.1 % (segment agricole) et 5.5 % (segment biocontrôle) de QSA en plus, entre 2016 et 2017.

Pour les autres segments, amateur ou traitement de semences, la part de QSA non localisée est plus importante et plus variable (**Fig. 1.2.3c, e et g**) et peut être source d'autant plus de biais. Comme on pouvait s'y attendre avec l'historique des arrêtés (**Fig. 1.2.1**), on constate une diminution de la part de QSA non localisée pour le segment traitement de semences à partir de 2016, année d'obligation des distributeurs de semences à fournir un registre.

On constate également qu'en 2018, la part de QSA non localisée est globalement plus faible sur l'ensemble des segments (**Fig. 1.2.3**). On peut se demander si c'est le signe, à partir de cette année, d'une meilleure conservation des CP dans la BNV-d Registre, au moment notamment des contrôles réalisés par l'Agence de l'Eau. Il faudrait, avant de conclure, mobiliser une extraction plus tardive pour vérifier que cette proportion faible en 2018 n'est pas un artefact, dû à un plus faible nombre de contrôles réalisés sur l'année 2018 au moment du téléchargement des données (octobre 2019).

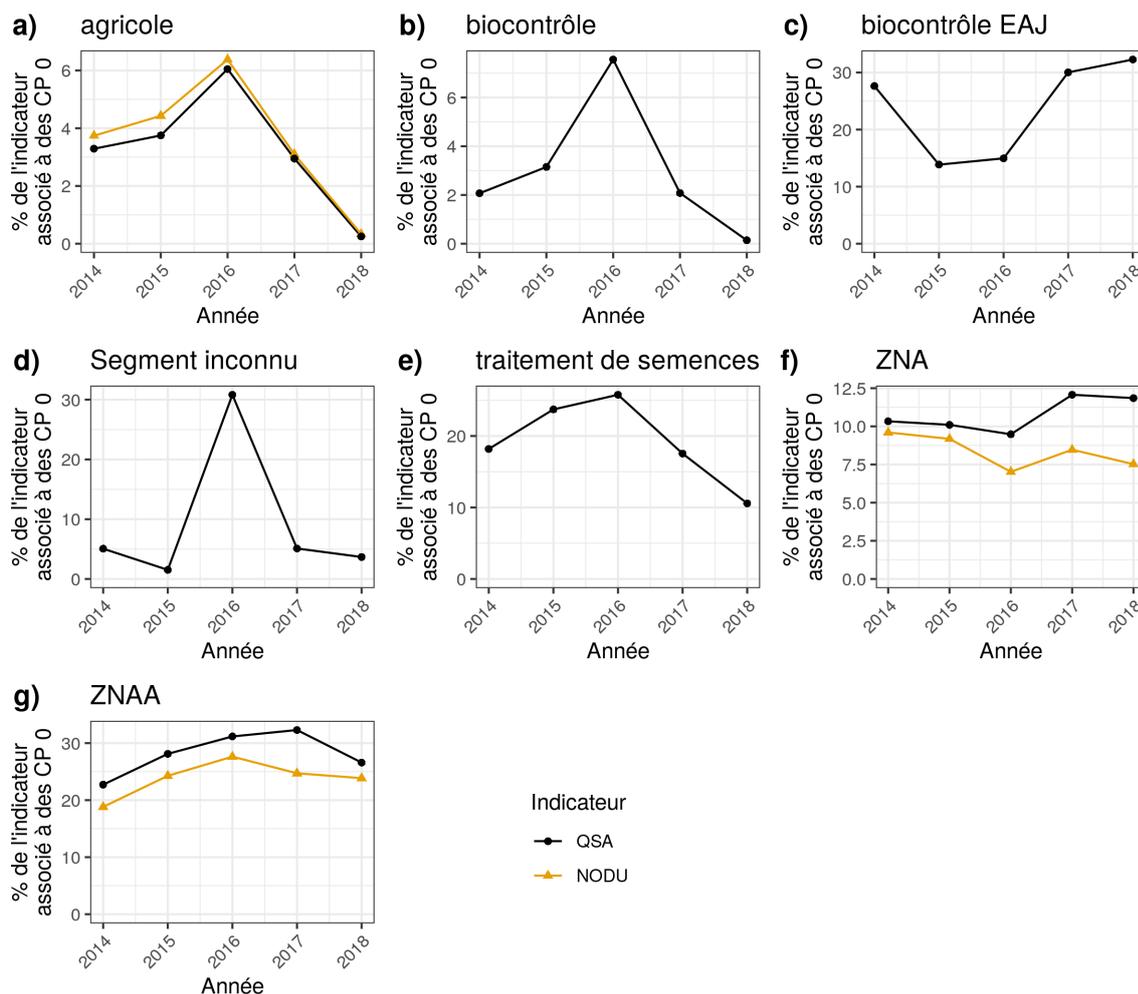


Figure : 1.2.3 : Pourcentage des indicateurs (QSA et NODU) associés à un CP 0 (BNV-d registre) selon les années et les différents segments.

Cette absence d'information sur la localisation de certaines ventes pourrait probablement être minimisée par l'amélioration de la méthode de contrôle des distributeurs allant vers une conservation d'un maximum de CP en cas de problème constaté. De même, un archivage annuel de version de la BNV-d Registre et Bilan serait souhaitable afin de permettre de la récupération d'information perdue à la suite de contrôle, comme le code postal, au lieu de l'écraser dans la base. Ces améliorations ne pourront pas, cependant, améliorer les données déjà récoltées actuellement (2009-2018). On pourrait, en joignant les bases Bilan et Registre, associer au moins un code INSEE du distributeur à chaque CP de l'acheteur final faisant défaut, mais cette approximation présente également des biais dont nous discuterons par la suite (cf. Fiabilité des données Registre par rapport aux données Bilan et **section 1.3**).

Achat à l'étranger

Les achats à l'étranger n'étant pas déclarés avant 2012, l'obligation de leur déclaration peut donc artificiellement augmenter les ventes des segments agricole, ZNA et biocontrôle dans la base de données Bilan. Pour évaluer l'effet de la prise en compte des achats à l'étranger, nous nous avons mobiliser une version de la BNV-d Registre en accès libre en ligne¹⁹, qui spécifie entre 2013 et 2018 si les ventes sont issues d'achats à l'étranger. On peut constater que globalement, les ventes effectivement déclarées à l'étranger restent assez faibles et influencent peu les indicateurs : la part des achats à l'étranger dans la QSA n'est pas très importante (< 2 %, hors segment inconnu, **Fig. 1.2.4**). Elle est très faible pour les segments biocontrôle EAJ, ZNA, traitement de semence et ZNAA (< 0.5 % ; **Fig. 1.2.4c, e, f et g**). Cette part semble augmenter progressivement pour les segments agricole et biocontrôle, ce qui peut traduire éventuellement une meilleure prise en compte des achats à l'étranger au cours des ans. Elle reste cependant relativement faible : inférieure à 1.1 % et à 1.9 % pour le segment agricole et biocontrôle, respectivement. Cette meilleure prise en compte des achats à l'étranger pourra créer des augmentations interannuelles internes de la QSA nationale d'un maximum de 0.4 % (segment agricole) et 1.5 % (segment biocontrôle). On peut noter qu'une part relativement plus importante de produits sans segment attribué proviennent d'achat à l'étranger (jusqu'à 4.7%), mais ce segment représente une part faible de la QSA totale (< 0.2 % ; cf. **section 1.1.3**).

¹⁹ BNV-d détaillé au code postal mais anonymisé, c'est à dire que les code postaux avec trop peu d'acheteurs ne sont pas communiqués (<http://www.data.eaufrance.fr/jdd/a69c8e76-13e1-4f87-9f9d-1705468b7221>)

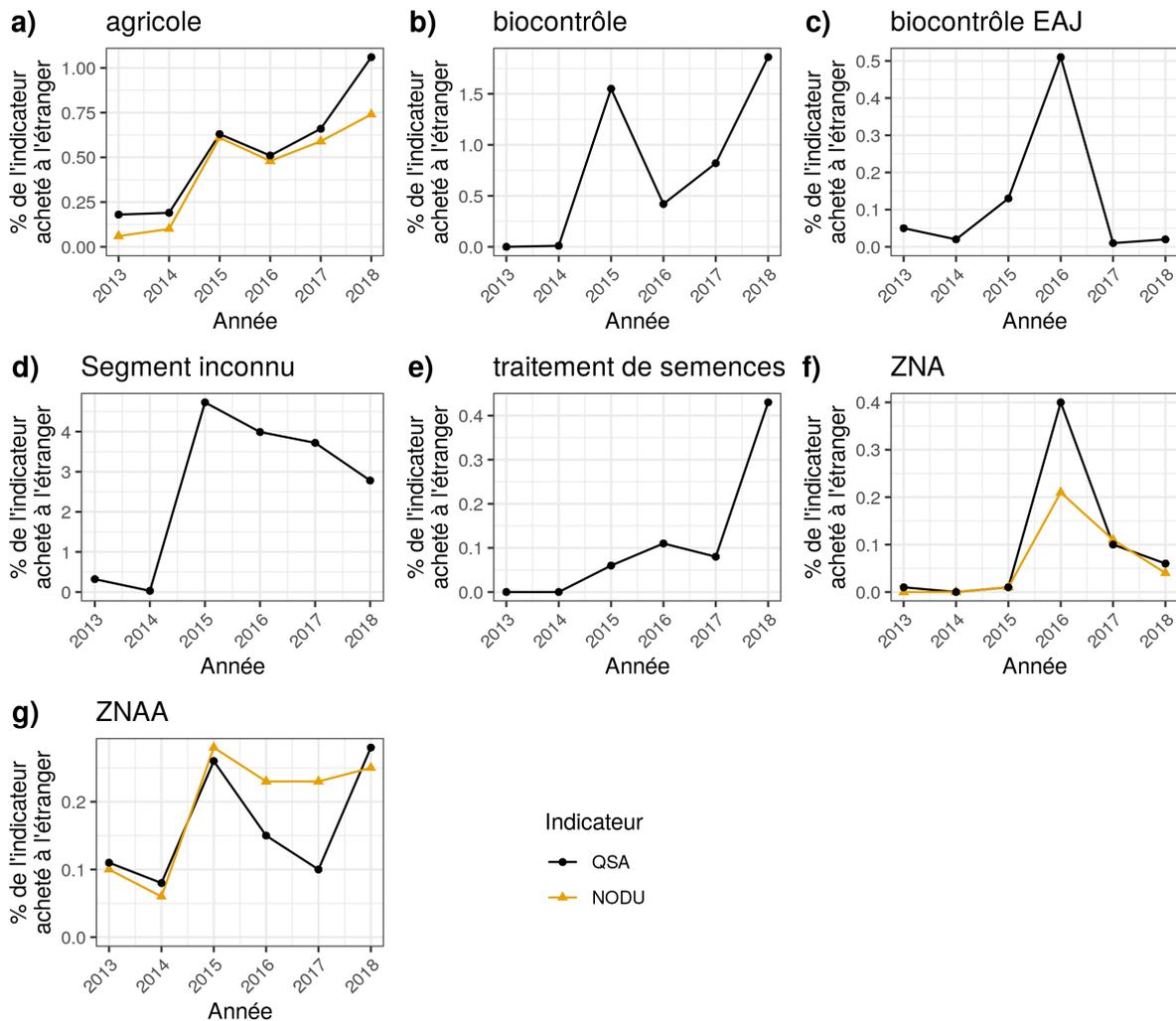


Figure 1.2.4 : Part du NODU et de la QSA qui sont associée à des achats à l'étranger selon les années et les segments

Si les achats déclarés à l'étranger n'affectent pas fortement la QSA au niveau national, il est possible cependant que les variations de QSA dans les zones frontalières soient plus impactées ou que les ventes de certains produits ou substances soient affectées plus fortement individuellement dans le cas où, par exemple, le prix d'un produit serait particulièrement avantageux à l'étranger.

Au niveau des régions, également, la part du de la QSA du segment agricole associée à des achats à l'étranger reste souvent faible (entre 0 et 1% ; **Tableau 1.2.1**). On note, cependant, des parts non négligeables en Corse, Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Haut-de-France (> 1.3 %; **Tableau 1.2.1**).

Tableau 1.2.1 : Part du NODU et de la QSA sur segment agricole entre 2014 et 2018 issus d'achat à l'étranger selon les régions (anciennes régions).

Nom Région	Code Région	% QSA agricole achat étranger	% NODU agricole achat étranger
CORSE	94	3.00	4.01
OCCITANIE	76	2.45	2.45
PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR	93	2.27	2.54
HAUTS-DE-FRANCE	32	1.38	0.92
AUVERGNE-RHONE-ALPES	84	0.61	0.43
GRAND EST	44	0.33	0.23
INDETERMINE *	NA	0.32	0.92
NOUVELLE-AQUITAINE	75	0.15	0.13
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE	27	0.12	0.06
PAYS DE LA LOIRE	52	0.10	0.13
BRETAGNE	53	0.01	0.02
CENTRE-VAL DE LOIRE	24	0.01	0.01
GUADELOUPE	1	0.00	0.00
GUYANE	3	0.00	0.00
ILE-DE-FRANCE	11	0.00	0.00
LA REUNION	4	0.00	0.00
MARTINIQUE	2	0.00	0.00
MAYOTTE	6	0.00	0.00
NORMANDIE	28	0.00	0.00

* Le champ région "INDETERMINE" correspond aux ventes qui n'ont pas été attribuées à une région.

Il existe également des incertitudes sur la proportion de ventes à l'étranger qui sont effectivement déclarées et peuvent éventuellement entraîner une sous-estimation de la part de la QSA impactée et, plus globalement, des achats de produits phytosanitaires en France.

Enfin, bien que l'impact des achats à l'étranger dans la BNV-d soit actuellement relativement faible, il serait utile de disposer de cette information dans les BNV-d Registre et Bilan non anonymisé pour pouvoir éventuellement écarter ces achats quand on étudie l'effet des déterminants externes sur les variations interannuelles et qu'on veut limiter au minimum les sources de variations internes des ventes d'une année à l'autre.

Différences de localisations des ventes entre la BNV-d Bilan et Registre

Les différences entre la BNV-d Bilan et Registre pour la QSA du segment agricole sont bien plus importantes au niveau des départements (entre -99% et 100% ; **Fig. 1.2.5**) qu'au niveau national. Comme

elles peuvent être à la fois négatives et positives, nous avons représenté ces variations par la différence entre la QSA Bilan et la QSA Registre par rapport à la QSA maximale entre les deux bases. Les différences s'échelonnent donc entre 100%, QSA Registre nulle, et -100%, QSA Bilan nulle.

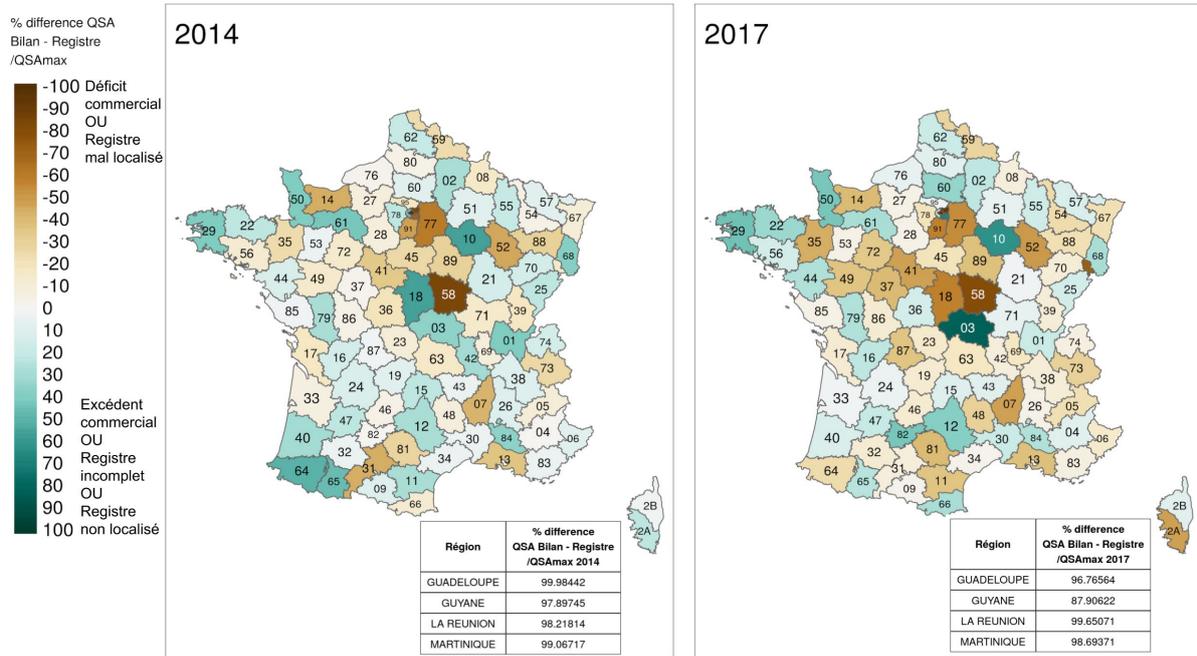


Figure 1.2.5 : Différences entre les QSA agricoles calculés avec la BNV-d bilan et la BNV-d registre rapportées à la QSA maximale entre les deux bases (en pourcentage), selon les départements et les années (2014 et 2017).

Contrairement à l'échelle nationale où l'on pouvait supposer la conservation des QSA entre les deux bases, on s'attendait à une différence de QSA pour des échelles plus fines. Ces différences peuvent exprimer des différences entre la localisation des ventes (code commune INSEE) et la localisation des achats (Code postal) : les valeurs positives traduisent un excédent commercial alors que celles négatives traduisent un déficit commercial dans le département. Ainsi, on constate que les départements comme la Nièvre (58), la Seine-et-Marne (77), la Haute-Marne (52), l'Ardèche (07), le Calvados (14) ou l'Île-et-Vilaine (35) semblent avoir un déficit commercial (différence négative) pour les années 2014 et 2017 (Fig. 1.2.5). En parallèle, des départements à proximité ont des différences positives importantes pour les mêmes années comme l'Aube (10), l'Allier (03), le Finistère (29), la Manche (50) et l'Aveyron (12) (Fig. 1.2.5). Ces différences pourraient donc être associées en partie à des excédents commerciaux. Une part des déficits commerciaux (différence négative) pourrait être causé par des achats à l'étranger (cf. Achat à l'étranger). Cependant, cette explication ne semble pas correspondre. Les régions administratives avec le plus d'achat à l'étranger identifiée (cf. section "Achat à l'étranger"), comme

la Corse qui a 1.8 % de QSA achetées à l'étranger en 2017 (données Registre avec les achats à l'étranger), ne correspondent pas clairement à des différences négatives. Par exemple, on a une différence positive de QSA de 1.7 % pour la région Corse en 2017.

L'échelle nationale nous a permis d'établir un manque de données de ventes dans la BNV-d Registre (Registre incomplet) qui peuvent expliquer également une partie des différences positives observées. Pour les régions d'outre-mer, par exemple, les fortes différences négatives pour 2014 et 2017 (> 88%, QSA Registre quasi nulle ; **Fig. 1.2.5**) s'explique probablement plus par une base Registre incomplète que par des excédents commerciaux. Cependant, l'ampleur des différences positives et négatives observées sur l'ensemble des départements ne peut s'expliquer uniquement par ce phénomène qui cause, au niveau national, que des différences positives de QSA de moins de 2.1% (**Fig. 1.2.2**).

Nous savons également qu'une part non négligeable des données Registre n'est pas associée à une localisation (jusqu'à 6,1 % de la QSA agricole en 2016 ; **Fig. 1.2.3**). Une part des différences positives observées entre la BNV-d Bilan et Registre peut donc également s'expliquer des achats des données Registre non localisés.

Enfin, une part des différences négatives observées entre la BNV-d Bilan et Registre sont associés à des départements clairement urbains : Paris (75) et Seine Saint-Denis (93) (**Fig. 1.2.5**). Ces différences correspondent probablement à des CP rattachés à des sièges d'exploitation situés en ville, loin de la zone d'achat des pesticides (BNV-d Bilan) et de la zone d'utilisation des produits phytosanitaires achetés (cf. **section 1.3**).

Comme dit précédemment, nous avons travaillé sur des bases de données Registre et Bilan séparées alors que les différences entre les deux bases aux échelles fines pourraient être mieux comprises en mobilisant une BNV-d jointe Bilan et Registre. De même, disposer également de l'information de la provenance, étrangère ou non, des achats pourraient permettre de tracer l'impact des ventes à l'étranger sur les différences entre Bilan et Registre.

Autres sources de variations temporelles : les ventes aux amateurs

Le segment agricole inclut des produits qui ont des usages autorisés en agriculture mais pas strictement. Ce regroupement est basé sur l'hypothèse que les produits à usages mixtes (segment UAZNA ou autres) ont été principalement achetés pour un usage agricole. Comme les sous groupes du segment agricole n'ont pas été détaillés dans la **Fig. 1.2.1**, il est possible que certains produits de ces sous groupes voient leurs ventes artificiellement augmenter dans la base Bilan en 2012 après la prise en compte des distributeurs amateurs. On ne remarque pas au niveau national, cependant, d'augmentation particulière de la QSA ou du NODU des sous-groupes agricole - autres ou agricole - UAZNA en 2012 (**Fig. 1.1.8a et b**). Le faible impact des ventes aux amateurs peut expliquer une consommation en produits amateurs beaucoup plus faibles que les produits agricoles et également par la forte restriction de la liste des produits autorisés aux amateurs par la loi n° 2014-110, dite "loi LABBÉ" du 6 février 2014.

Substances non soumises à RPD

La liste des substances soumises à RPD d'une année donnée (N) est publiée tous les ans dans un "arrêté substance" à l'automne de l'année précédente (N-1) (Borrell, Anaïs, 2018). Bien que les redevables doivent déclarer l'ensemble des ventes de produits phytosanitaires réalisées, soumis ou non à la RPD, il semblerait que les volumes de ventes de produits contenant des substances soumises à la RPD soient plus fiables que les autres. D'une part, les contrôles de bilans ou de registres sont réalisés principalement sur des produits soumis à RPD, ce qui signifie que leurs données sont plus fiables. D'autre part, certains produits non soumis à la RPD ne seraient pas toujours déclarés dans la BNV-d. Par exemple, certains produits de biocontrôle disposant d'une AMM et issus de distributeurs concernés par le Certificat d'Economie de Produits Phytopharmaceutique²⁰ (CEPP) n'auraient pas été déclarés dans la BNV-d, car ils étaient déjà soumis à une autre déclaration dans le cadre de ce CEPP (Malherbe et al., 2019).

Il peut être intéressant, pour s'appuyer sur des évolutions plus fiables, de ne regarder que les variations des substances toujours soumises à RPD²¹ sur une période d'étude donnée (193 substances dans la BNV-d Bilan). Pour le segment agricole et ZNA, cela revient à travailler, pour la période 2009 à 2018, respectivement sur 77.1% et 73% de la QSA et 71.5% et 84% du NODU. On ne peut avoir accès à ce niveau de fiabilité pour le segment biocontrôle puisque la large majorité des substances qui le compose ne sont jamais soumises à RPD (97% de la QSA de ce segment) et donc par définition leur déclaration est plus aléatoire.

²⁰ Dispositif mis en place le 1er juillet 2016 en métropole visant à inciter les distributeurs de produits phytopharmaceutiques à promouvoir ou à mettre en œuvre auprès des utilisateurs professionnels des actions permettant de réduire l'utilisation, les risques et les impacts de ces produits.

²¹ Certaines substances sont soumises à la RPD seulement certaines années sur la période 2009 à 2018 (175 substances dans la BNV-d Bilan). Pour une minorité de substances, les années sans RPD correspondent à des années où la substance n'est pas encore autorisée ou bien interdite.

Quantités de substances non renseignées

Il arrive que dans la BNV-d, les quantités de substances (Q_{SA}) ne soient pas toujours renseignées alors que la quantité de produit (Q_{AMM}) est renseignée. On trouve dans les bases Registre et Bilan 145 couples de substances et produits commerciaux (AMM) qui n'ont jamais leurs quantités de substances renseignées et qui correspondent, pour la large majorité, au segment inconnu (sans segment attribué par le ministère ; cf. **section 1.1.3**) : 76.3 % (106 couples) et 88.2 % (67 couples) de ces couples ($Q_{SA}=0$) pour les BNV-d respectivement, Bilan et Registre. Sur les 92 substances incluses dans ces couples, 45 affichent des quantités de substances nulles pour tous les produits et toutes les années (cf. Liste **Annexe E**). Ces produits correspondent probablement aux produits déclarés dans la BNV-D que le référentiel de l'INERIS ne parvient pas à décomposer en substances (ex : biocides, ou quantités non exprimées en kg ou L²²). Pour adresser cette problématique, une réflexion doit être menée pour chacun des produits n'ayant pas de Q_{SA} . Pour les 45 substances qui n'ont jamais de quantité, il faut déterminer pour chacune des substances dans quelle mesure une Q_{SA} , homogène au autres Q_{SA} de la BNV-d (L ou kg), peut être calculée. Pour les autres couples, il semble que ce soit plutôt la décomposition de la substance dans un produit donné (AMM) qui n'ait pas été mobilisée. Dans ce cas, il s'agirait de rechercher une base de données fournissant la décomposition.

Nous avons pu également constater que d'autres couples de substances et produits commerciaux affichaient des quantités nulles seulement certaines années (51, cf. Liste **Annexe F**). La présence non systématique de quantités relève probablement d'une erreur de la base de données. Ces couples n'ont pas de segments attribués pour la plupart (**Annexe F**) et représentent une part très faible voire nulle de la QSA des autres segments (**Fig. 1.2.6a, b, c, f**). Pour corriger ces erreurs apparentes, on peut probablement compléter les quantités de substances manquantes à partir des Q_{AMM} et des rapport Q_{SA}/Q_{AMM} connus dans la BNV-d, mais la recherche de base de données donnant la concentration en substance dans chaque AMM serait le moyen le plus sûr de connaître la quantité de substance associée.

²² exemple : pièges à phéromone, micro-organisme

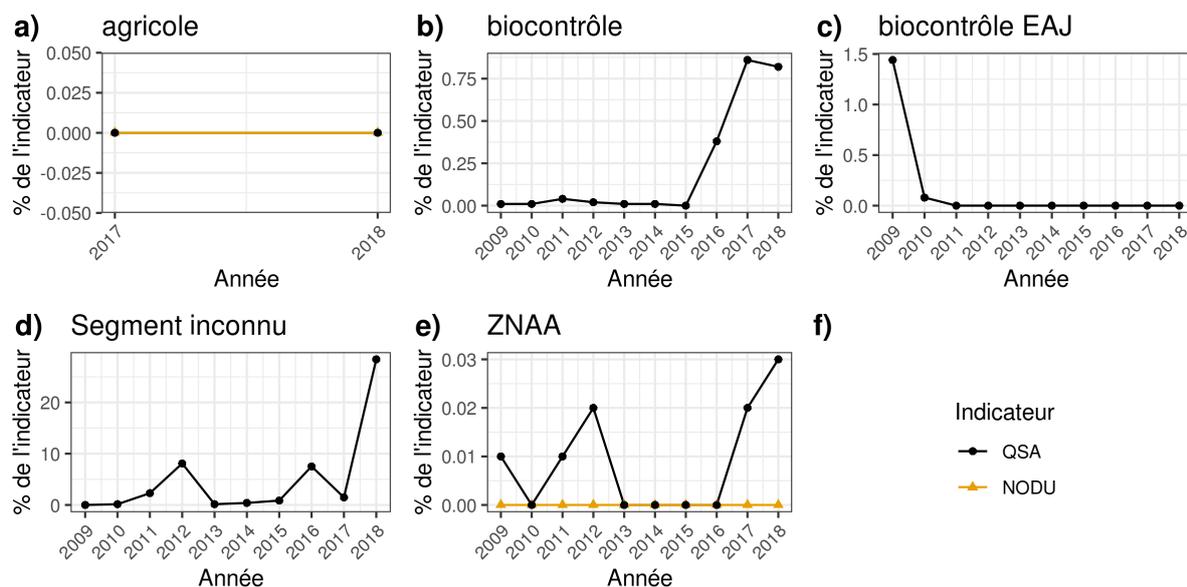


Figure 1.2.6 : Pourcentage des indicateurs QSA et NODU selon les segments qui correspondent aux ventes de couples AMM - substances qui ont certaines années seulement une quantité de substances associées nulles (Source : BNV-d bilan). Le segment ZNA n'est pas représenté car il n'inclut pas de tels couples.

Autres données relatives aux substances

Dans leur rapport, le groupe de travail a pu identifier un certain nombre d'erreurs dans les données relatives aux substances dans la BNV-d (Malherbe et al., 2019). Par exemple, certains numéros d'identification des substances actives (numéro CAS) correspondent à différents noms de substances qui sont parfois synonymes (67-97-0 associé au ferbame, au colecalciferol et au fer des sulfates ferreux) mais parfois totalement différents (52315-07-8 associé à la cyperméthrine et la zéta-cyperméthrine). Il constate également que certaines substances identiques sont écrites avec plusieurs orthographes (ex : "alphachloralose" et "alpha-chloralose") alors que certains noms de substances ne permettent pas de différencier certains sels ou esters.

L'ensemble des erreurs mentionnées peut entraîner principalement des difficultés dans l'identification précise des substances concernées dans la BNV-d et, en conséquence, affecter le calcul des DU et du NODU. Le groupe conseille à ce sujet la création d'un identifiant unique pour l'ensemble des substances de la BNV-d. Dans l'attente d'un tel identifiant, il peut être souhaitable a minima de mobiliser le nom de la substance et du CAS simultanément pour identifier une substance de manière plus certaine.

Erreurs ponctuelles de saisies

Un certain nombre d'erreurs ponctuelles ont pu être identifiées dans la BNV-d par le groupe de travail (Malherbe et al., 2019) comme des quantités singulières ou manifestement erronées : en 2017 une vente anormalement élevée de l'AMM 2130075 est due à une déclaration en kg au lieu de tonnes. Ces erreurs ont été corrigées et des contrôles automatiques supplémentaires ont été suggérés pour limiter leur apparition.

L'ensemble des erreurs ponctuelles est associée à des substances spécifiques et ne devraient pas, en théorie, affecter très fortement les indicateurs plus globaux, en particulier le NODU qui dépend d'un plus grand nombre de substances que la QSA. Pour le segment agricole 2017 par exemple, les 10 substances contribuant le plus à la QSA représentent 52.9 % de la QSA alors que celles contribuant le plus au NODU ne représente que 24.4% du NODU. La présence potentielle d'erreurs ponctuelles dans cette base de données doivent conduire à être vigilant lors de sa mobilisation :

- 1) Ne pas se limiter au calcul des indicateurs et investiguer l'évolution de différentes décompositions (segment, fonction) ainsi que les principaux contributeurs à la QSA ou au NODU observé.
- 2) Faire remonter les erreurs observées afin de permettre l'amélioration dynamique de la base

Le groupe de travail suggère l'ajout d'un champ dans la BNV-d permettant d'identifier les données singulières. Ils permettront de faciliter leur prise en compte et l'identification d'erreurs (Malherbe et al., 2019).

Synthèse des biais

Dans la section 1.2.6, nous avons fait l'inventaire des sources d'erreurs ou d'imprécisions potentielles dans la BNV-d et cherché dans la mesure du possible à quantifier l'impact sur les indicateurs QSA et NODU. La quantification des biais pour les segments principaux et leurs causes sont synthétisés pour la QSA (**Tableau 1.2.2**) et le NODU (**Tableau 1.2.3**). De manière globale, les erreurs identifiées entraînent deux types de biais interdépendants :

- Un biais sur l'exactitude des ventes d'une année donnée (Part de l'indicateur concerné)
- Un biais dans les variations interannuelles observées qui découle de la variation de l'exactitude d'une année à l'autre. Ce biais fait partie des déterminants internes de l'évolution des ventes et des indicateurs (Variation interannuelle interne).

Tableau 1.2.2 : Synthèse des biais de la BNV-d et estimation de leur effet sur l'exactitude et les variations interannuelles internes de la QSA

Biais	Segment	causes possibles	BNV-d mobilisé	Part de la QSA* concernée par le biais	Variation interannuelle de cette part	Effet sur les variations interannuelles internes de la QSA
Registre incomplet (Pertes de données Registre par rapport au Bilan)	agricole	Elargissement de la liste des assujettis à déclaration Registre	Bilan et Registre	0.7 à 2.1 %	principalement négative max : - 0.6 % (2015 - 2016)	augmentation max : + 0.6 %
	biocontrôle	-		0.7 à 2.0 %	principalement positive max : + 0.8 % (2016-2017)	diminution max : - 0.8 %
	ZNA	-		1.7 à 5.6 %	fluctuante max : - 3.4 % (2017-2018)	fluctuante max : + 3.4 %
	traitement de semences	Obligation pour les distributeurs de traitement de semences en 2016		- 0.3 à 11.0 %	très fluctuante max : + 11.0 % (2017-2018)	très fluctuante max : - 11.0 %
Ventes Registre non localisées (CP à 0)	agricole	CP à 0 :	Registre	0.2 à 6.1 %	pic en 2016 max : - 3.1 % (2016-2017)	creux en 2016 max : + 3.1 %
	biocontrôle	Déclaration Bilan au lieu de Registre suite à un contrôle		0.1 à 7.6 %	pic en 2016 max : - 5.5 % (2016-2017)	creux en 2016 max : + 5.5 %
	ZNA	Achat SNCF (segment ZNA)		9.5 à 12.1 %	fluctuante max : + 2.6 % (2016 - 2017)	fluctuante max : - 2.6 %
	traitement de semences			10.6 à 25.8 %	pic en 2016 max : - 8.2 % (2016-2017)	creux en 2016 max : + 8.2 %
Achat à l'étranger	agricole	Mise en place progressive des déclarations des achats à l'étranger	Registre, source publique non exhaustive	0.2 à 1.1 %	principalement positive max : + 0.4 % (2014-2015)	augmentation max : + 0.4 %
	biocontrôle			0.0 à 1.9 %	fluctuante max : + 1.5 % (2014-2015)	fluctuante max : + 1.5 %
	ZNA			0.0 à 0.4 %	pic en 2016 max : + 0.4 % (2015-2016)	pic en 2016 max : + 0.4 %
	traitement de semences			0.0 à 0.4 %	Principalement positive max : + 0.4 % (2017-2018)	Principalement positive max : + 0.4 %

* QSA annuelle nationale

Tableau 1.2.3: Synthèse des biais de la BNV-d et estimation de leur effet sur l'exactitude et les variations interannuelles internes du NODU

Type de biais	Segment	causes possibles	BNV-d mobilisé	Part du NODU* concernée par le biais	Variation interannuelle de cette part	Effet sur les variations interannuelles internes du NODU
Registre incomplet (Pertes de données Registre par rapport au Bilan)	agricole	Elargissement de la liste des assujettis à déclaration Registre	Bilan et Registre	0.7 à 2.2 %	Principalement négative max : - 1.0 % (2015 - 2016)	augmentation max : + 1.0 %
	ZNA	-		0.0 à 6.0 %	très fluctuante max : - 4.0 % (2017-2018)	très fluctuante max : + 4.0 %
Ventes Registre non localisées (CP à 0)	agricole	Déclaration Bilan au lieu de Registre suite à un contrôle	Registre	0.3 à 6.4 %	pic en 2016 max : - 3.3 % (2016-2017)	creux en 2016 max : + 3.3 %
	ZNA			7.0 à 9.6 %	fluctuante max : - 2.2 % (2015 - 2016)	fluctuante max : + 2.2 %
Achat à l'étranger	agricole	mise en place progressive des déclarations des achats à l'étranger	Registre, source publique non exhaustive	0.1 à 0.7 %	principalement positive max : + 0.5 % (2014-2015)	augmentation max : + 0.5 %
	ZNA			0.0 à 0.2 %	pic en 2016 max : + 0.2 % (2015-2016)	pic en 2016 max : + 0.2 %

* NODU annuel national

On constate que le NODU est affecté de manière relativement similaire à la QSA par les différents biais présentés dans la **section 1.2.4**, qui concernent principalement la complétude et l'exactitude des données de ventes Registre. Les autres biais présentés, liés aux substances non soumises à redevance (RPD) ou à des erreurs dans les quantités, ne peuvent pas être réellement quantifiés et ne permettent pas d'estimer leurs effets sur les indicateurs et leurs variations.

Les pertes de données identifiées dans la base Registre et les ventes de la base Registre qui ne sont pas localisées ont une influence sur les indicateurs. Au total, pour le segment agricole, ces 2 biais peuvent engendrer des pertes d'informations représentant jusqu'à 7.1 % de la QSA (1.0 + 6.1 % en 2016) qui n'apparaîtra pas dans les évaluation des ventes locales, ainsi que des variations interannuelle internes des indicateurs allant jusqu'à 3.7 %. Ces estimations sont des moyennes nationales et, en l'état, il n'est pas possible de quantifier leur influence sur les échelles plus fines avec la BNV-d car on ne peut connaître la localisation des informations perdues. La prise en compte des achats à l'étranger n'a pas pour le moment beaucoup d'impact sur la QSA et le NODU (moins de 1% des indicateurs), mais les achats à l'étranger qui n'ont pas été déclarés représentent également une perte dans les indicateurs qu'on ne peut

cependant pas mesurer. On peut, par contre, retirer les ventes issues de ces achats à l'étranger, si l'on cherche à étudier les variations interannuelles des ventes ou des indicateurs ayant la même assiette de déclaration.

1.3. Des ventes aux utilisations

Dans la **section 1.3**, nous avons abordé les biais associés à l'enregistrement des ventes dans la BNV-d qui constituent une partie des déterminants internes (biais) de l'évolution des ventes de produits phytosanitaires (cf. **Fig. 0.1**). Cependant, l'objectif final, notamment dans le cadre du projet Avi-NODU, est d'estimer l'utilisation réelle en produits phytosanitaires et de chercher à déterminer aussi précisément que possible les déterminants externes (causes) influant sur cette utilisation. Avant cela, il convient encore d'interroger dans quelle mesure les ventes enregistrées dans la BNV-d nous permettent d'estimer l'utilisation en produits phytosanitaires. Il peut, notamment, y avoir un décalage à la fois spatial et temporel entre les ventes et l'utilisation d'un produit (**Fig. 1.3.1**). Ces décalages peuvent varier selon le type d'acheteur final, amateur ou professionnel, agricole ou non agricole. Pour simplifier la démarche, nous nous sommes ici intéressés aux ventes professionnelles agricoles (segment agricole et biocontrôle). Parmi les scénarios possiblement envisageables, on peut parler de décalage temporel si les produits achetés sont stockés sur l'exploitation l'année administrative de l'achat et utilisés une année ultérieure (**Fig. 1.3.1B**) ou bien de décalage spatial si le code postal de l'acheteur renseigné dans la BNV-d Register n'est pas le code postal où le produit sera réellement utilisé (**Fig. 1.3.1C**).

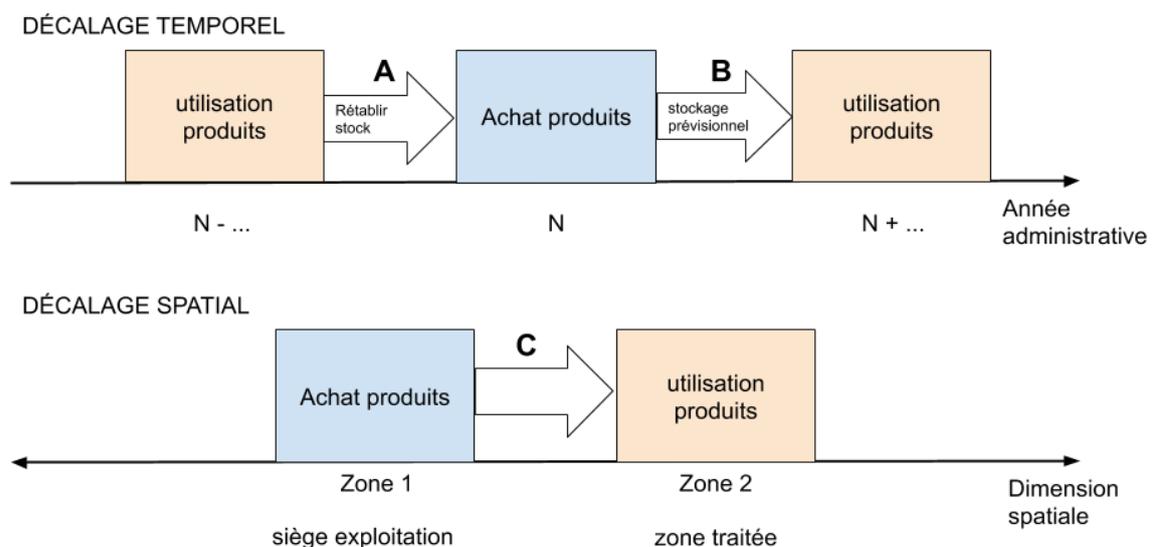


Figure 1.3.1 : Schéma des décalages temporels (A et B) et spatiaux (C1 et C2) entre l'année et la zone de ventes et l'année et la zone d'utilisation

1.3.1. Décalage temporel

On peut faire l'hypothèse qu'une partie importante de l'utilisation en produits phytosanitaires se fera l'année d'achat des produits, les produits phytosanitaires étant coûteux et leur stockage sur du long terme étant un poids important dans la trésorerie de l'exploitation. Plusieurs possibilités pouvant, cependant, entraîner un décalage temporel (type B) peuvent être appréhendées :

- 1) Cas des campagnes de culture à cheval sur une année administrative (cultures d'hiver) : certains produits achetés l'hiver d'une année donnée pourront éventuellement servir à des traitements au printemps de l'année suivante.
- 2) Achat anticipé en réaction à une augmentation des prix l'année suivante, suite par exemple aux augmentations de la RPD qui sont annoncées et connues des agriculteurs à l'automne de l'année précédant leur application.
- 3) La présence de stocks d'une année sur l'autre (par exemple après une campagne avec des conditions relativement plus favorables que prévues en termes de pressions ravageurs)

1.3.2. Décalage spatial

Dans la BNV-d Registre l'achat de certains produits phytosanitaires à usages strictement agricoles par des entités localisés dans des zones urbaines (sans SAU) a été constaté (cf. **section 1.2.4 "Différences de localisations des ventes entre la BNV-d Bilan et Registre"**). L'explication de ce décalage spatial est que le siège de certaines exploitations agricoles est situé dans un code postal (urbain) différent des parcelles traitées (**Fig. 1.3.1C**). Nous avons cherché à quantifier en partie le décalage spatial en comparant les SAU et le NODU agricole - UA (usages strictement agricoles) calculés au niveau de la PRA. En effet, en absence de décalage spatial entre achat et utilisation, on s'attend à une corrélation grossière entre la SAU et le NODU agricole - UA, corrélation tout de même imparfaite du fait de la diversité des agricultures regroupées dans la SAU. Par ailleurs, la présence de sièges d'exploitation en zone urbaine doit pouvoir être identifiée par un NODU agricole - UA important dans une PRA ayant une SAU faible ou nulle.

Pour calculer les SAU, nous nous sommes appuyés sur des cartographies des occupations du sol entre 2013 et 2017 créées à partir du Registre Parcellaire Graphique (RPG) et des Statistiques Agricoles

Annuelles (SAA) (**Annexe B.9**). Les occupations du sol incluses dans la SAU sont décrites **Annexe B.9**. On constate bien une tendance à la corrélation entre les NODU de chaque PRA et leur SAU : leurs rapports sont souvent d'ordre de grandeurs similaires (**Fig. 1.3.2**). On trouve cependant deux types de cas qui ont un rapport entre le NODU et la SAU très différent du rapport médian :

- 1) Un NODU bas par rapport à la SAU (en bas à droite). On trouve dans ces PRA beaucoup de région de pâturage (Alpes niçoises, Queyras, Beaufortain, Région Pyrénéennes...) dont les surfaces de pâturage (estives et landes, **Annexe B.9**), incluse dans la SAU, sont logiquement peu associées à des traitements phytosanitaires.
- 2) Un NODU fort par rapport à la SAU (en haut à gauche). Les rapports les plus forts sont associés à des ventes non localisées (CP à 0 et inconnus), qui n'ont pas en conséquence de SAU attribué. D'autres rapports comme la ceinture de Paris et, dans une moindre mesure, la vallée de la seine représentent probablement bien une "mauvaise" localisation des données Registre, c'est à dire des lieux d'entités d'achats (domiciliation de la structure juridique) distincts du lieu d'utilisation (localisation du parcellaire de l'exploitation).

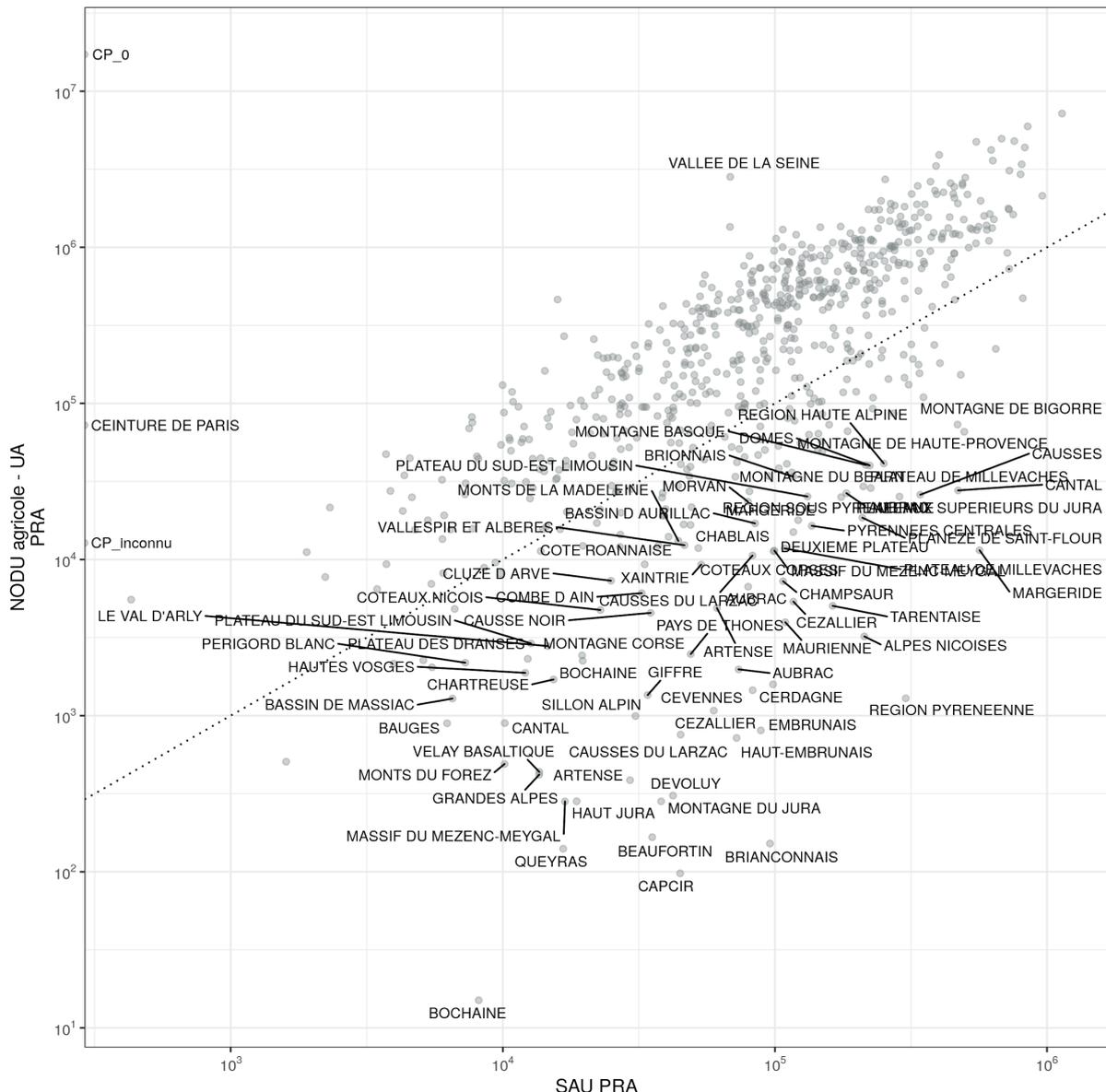


Figure 1.3.2 : NODU à usage strictement agricole (Segment agricole - UA) en fonction de la SAU au niveau de la PRA. La ligne pointillée représente la droite $y=x$. Les PRA qui sont nommés ont des rapports NODU/SAU d'un ordre de grandeur distinct du rapport médian.

L'ensemble des PRA avec des rapports NODU / SAU hors norme, incluant les zones pastorales mais hors CP à 0 ou inconnus, représentent une très faible part du NODU national (0.97 % entre 2014 et 2015 ; **Fig. 1.3.3**) avec peu de variation interannuelle. On peut en déduire que cette part-cide NODU mal localisée est relativement faible : les sièges d'exploitation dans des tissus urbains devraient peu affecter le NODU au niveau des PRA. En particulier, cette part de NODU mal localisé identifiée est très faible en comparaison de celle associée aux ventes non localisées (4.47% du NODU entre 2014 et 2015, **Fig 1.3.3**) qui a déjà été discuté en **section 1.2.4**. Ces ventes non localisées sont un biais important dans

l'acquisition des données la BNV-d, qui impactera également en retour la quantification de l'utilisation en produits phytosanitaires à plus fines échelles.

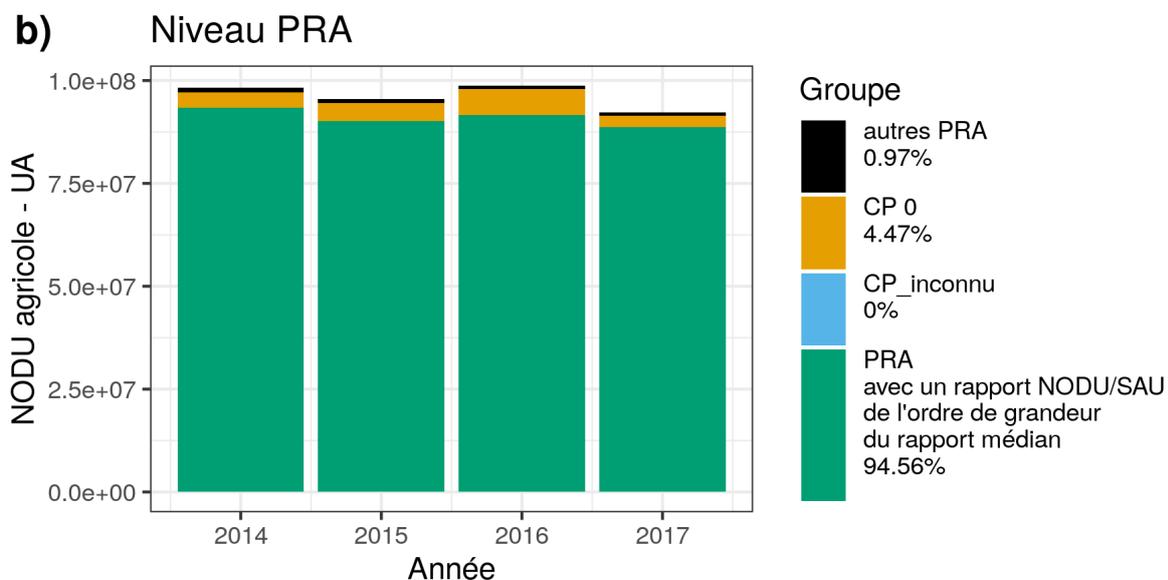


Figure 1.3.3 : Évolution du NODU agricole - UA entre 2014 et 2017 (BNV-d Registre) selon le rapport NODU/SAU dans la PRA.

D'autres décalages spatiaux que nous n'avons pas quantifiés peuvent persister cependant. En particulier, certaines exploitations agricoles peuvent avoir des terres sur un ou plusieurs Codes Postaux (CP) distincts de son siège administratif, qui n'est pas nécessairement en zone urbaine. Plus la zone étudiée sera petite, plus le décalage spatial entre achat et utilisation a de chance d'être important. Il existe également des cas de décalages spatiaux bien identifiés pour les ventes professionnelles non agricoles (segment ZNA). Les achats réalisés par la SNCF qui fournissent un réel CP (pas un CP à 0) en sont un cas non négligeable car ces derniers représentent des volumes importants au regard des certaines substances actives et du segment ZNA qui seront utilisés sur des voies ferrées parcourant un très large territoire.

1.3.3. Gestion des décalages

Comme l'utilisation réelle annuelle de produits phytosanitaires sur toute la France n'est pas connue par ailleurs, il n'est pas possible de complètement quantifier le biais de ces décalages temporels et spatiaux de la BNV-d. Afin d'atténuer les décalages temporels, on peut lisser les évolutions, sur la base par exemple de moyenne triennales. Pour les décalages spatiaux, il est conseillé de privilégier *a priori* une échelle spatiale relativement grande comme la région administrative ou le département, permettant principalement de limiter les problèmes associés aux ventes mal localisées. Cependant, des approches à des grains spatiaux et temporels plus fins restent envisageables : année, PRA, CP ou îlots de parcelles.

Dans ce contexte, le projet Spatialisation vise à développer une méthode de répartition des ventes au niveau départemental permettant de localiser les zones d'utilisation des produits phytosanitaires achetés sur un grain très fins (îlots de parcelles agricoles) (US-ODR, 2018). Cette méthode s'appuie notamment sur l'usage prévu de chaque produit vendu (EPHY, **Annexe B**), sur la localisation des sièges d'exploitation et sur des cartes d'occupation du sol (**Annexe B**). Cette approche est particulièrement intéressante quand on travaille sur des territoires hétérogènes (concentration locale de cultures spécialisées) dont on veut comprendre le fonctionnement spécifique (ex : aire d'alimentation de captage). Un travail d'évaluation de la fiabilité de cette méthode est en cours et consiste notamment en une comparaison des utilisations déclarées par les agriculteurs avec les ventes de la BNV-d spatialisé sur des îlots dans une région test (US-ODR, 2018, Truche et al., 2019).

Par ailleurs, il est possible de mobiliser les ventes à des grains spatiaux et temporels intermédiaires (année, PRA, CP) lorsqu'on cherche à étudier l'effet d'éventuels déterminants externes de l'utilisation (statut réglementaire, assolement, pression phytosanitaires, etc.). D'une part, certains déterminants réglementaires (RPD) peuvent permettre d'identifier et de prendre en compte d'éventuels décalages temporels comme l'achat anticipé de produits phytosanitaires précèdent une augmentation des prix des produits phytosanitaires. D'autre part, certains déterminants dits externes, comme l'assolement ou la pression phytosanitaire, sont plus directement associés à l'utilisation qu'à la vente de produits phytosanitaires. Leur comparaison avec les ventes peut ainsi permettre de quantifier la part des ventes

qui peut être réellement associée à une utilisation et donc d'approcher d'une meilleure compréhension des déterminants qui font varier les choix et pratiques en matière de traitements phytosanitaires.

Partie 2 : Déterminants externes des variations des ventes de produits phytosanitaires dans la BNV-d

Dans cette partie, nous avons mobilisé la BNV-d pour étudier différents facteurs pouvant influencer l'évolution des utilisations de produits phytosanitaires (déterminants externes ; **Fig. 0.1**). Les études scientifiques s'intéressant à l'utilisation de produits phytosanitaires ont pu montrer l'importance de plusieurs facteurs sur des agricultures très variées à travers la planète : des facteurs économiques (ex : prix de vente de la culture, prix des intrants, possession des terres agricoles exploitées, crédits agricoles, taille d'exploitation) (Rahman, S et al., 2003, Rahman, 2015, Gong et al., 2016, Rahman et Chima, 2018, Wu et al., 2018, Rosenheim et al., 2020), des facteurs sociologiques (ex : connaissances, technicité et éducation des agriculteurs) (Pettersson ans Lehman, 1994, Fan et al., 2015, Rahman, 2015), des facteurs agronomiques et environnementaux (ex : climat, context paysager, caractéristique de la culture, pression en bioagresseurs) (Rahman, 2003, Meisner et al., 2017, Rahman et Chima, 2018) et des facteurs associés aux réglementations gouvernementales (interdiction, taxation des produits, plan de réduction) (Pettersson et Lehman, 1994, Böcker et Finger, 2016, Femenia et Letort, 2016, Hossard et al., 2017).

Dans cette partie, avec l'appui de la BNV-d, nous avons exploré l'effet de plusieurs facteurs importants de la littérature et en lien avec des questions spécifiques que se posaient le MTE et le MAA sur l'utilisation de produits phytosanitaires en France ces dernières années. Tout d'abord, des facteurs réglementaires concernant l'effet des autorisations et des interdictions de produits phytosanitaires (**section 2.1**), ainsi que l'effet des augmentations de taxation des produits (Redevance Pollution Diffuse) (**section 2.2**). Puis nous avons étudié des facteurs agronomiques et environnementaux, au travers notamment de l'effet des surfaces agricoles converties ou en conversion en Agriculture Biologique (AB) sur les produits phytosanitaires autorisés en AB (**section 2.3**) et l'effet plus général de l'assolement et des pressions en bioagresseurs sur les produits phytosanitaires (**section 2.4**).

D'après la littérature, on s'attend à un effet fort de l'assolement car on trouve des usages très différents entre les cultures, pas seulement pour des raisons agronomique (différence en terme de sensibilité aux

bioagresseurs) mais aussi pour des raisons économiques car les cultures sont souvent associées à des systèmes de production qui peuvent impacter fortement l'utilisation en produits phytosanitaires (prix de ventes de la culture).

2.1. Effet des autorisations et des interdictions des produits phytosanitaires

2.1.1. Contexte

L'impact réglementaire le plus attendu sur les ventes de produits phytosanitaires, que l'on regarde les produits commerciaux (identifiés par une Autorisation de Mise sur le Marché ou AMM) ou les substances actives (SA), est l'effet de leur statut d'autorisation ou d'interdiction. Cet effet n'est pas simplement binaire. En effet, l'autorisation, comme l'interdiction des produits est souvent progressive, par usage. De plus, ces impacts peuvent être affectés par la constitution de stocks en anticipation de l'interdiction d'un produit, ou par l'adoption progressive d'un produit après son autorisation pour un usage. Enfin, on peut s'interroger sur l'impact des interdictions sur les utilisations globales de produits phytosanitaires, à savoir si ces interdictions conduisent à réduire l'utilisation globale ou bien à des substitutions entre produits. Dans cette section, nous avons exploré :

- 1) si les ventes d'un produit commercial (AMM) ou d'une substance avant son autorisation et après son interdiction sont bien nulles ou quasi-nulles,
- 2) si la dynamique de leurs ventes diffère dans les premières années après l'autorisation et les dernières années avant l'interdiction,
- 3) l'impact des interdictions sur le NODU ou la QSA totale et
- 4) si on peut mettre en évidence des cas de substitutions d'une substance active par d'autres, suite à son interdiction.

2.1.2. Matériels et méthodes

La réglementation étant la même pour toute la France, les quantités ont été regardées uniquement à l'échelle nationale. Nous avons donc mobilisé la BNV-d Bilan, qui compte un plus grand nombre d'années observées (2009 à 2018). Ces données ont été complétées de manière à donner la valeur 0 à toutes les quantités de produits (AMM) ou de substances actives qui n'auraient pas de valeur vendues une année donnée de la période étudiée. N'ayant pas besoin d'avoir une exhaustivité des quantités de produit vendues pour étudier l'impact des interdictions et des autorisations nous avons considéré les produits de l'ensemble des segments. Pour étudier l'impact sur la totalité des ventes, cependant, nous avons regardé l'effet sur le NODU segment par segment (agricole, ZNA, ZNAA), avec un focus sur le segment agricole.

Pour établir les périodes sur lesquelles les AMM et donc les substances sont autorisées à la vente, nous nous sommes basés sur le catalogue EPHY et sur une méthode de sélection de l'année d'interdiction et d'autorisation (**Annexe B.1**). Ensuite pour analyser les dynamique de ventes autour de la période d'autorisation, nous avons sélectionné, parmi les 4443 AMM communes à la BNV-d Bilan et à EPHY :

- 2647 AMM pour lesquels nous avons une quantité vendue dans la BNV-d pour une année à plus ou moins 10 ans de l'année d'autorisation.
- 2094 AMM pour lesquels nous avons une quantité vendue dans la BNV-d pour une année à plus ou moins 10 ans de l'année d'interdiction.

En appliquant la même méthode aux substances actives (**Annexe B.1**), nous avons sélectionnés, sur 514 substances communes à la BNV-d et EPHY :

- 164 substances pour évaluer la dynamique de ventes autour de l'année d'autorisation
- 77 substances pour évaluer la dynamique de ventes autour de l'année d'interdiction.

Aucune des substances sélectionnées ne présente de problème de quantité de substance non renseignée (cf. **Partie 1 section 1.2.4**).

La base de données EPHY ne fournissant pas l'historique complet des AMM, nous n'avons pas accès aux dates d'anciennes périodes d'autorisation pour les produits ayant été interdits temporairement. Ainsi, il est possible que certaines années d'autorisation sélectionnées soient plus tardives qu'elles ne le sont en réalité. De même, les dates de fin de distribution n'étant pas toujours mentionnées dans la base EPHY, l'année d'interdiction choisie provient parfois de la date de retrait du produit (cf. définitions **Annexe B.1**). Il est donc possible que la vente de certains des produits soit encore autorisée jusqu'à 6 mois après cette date, et donc l'année suivant l'année d'interdiction reportée.

Afin de mettre en évidence d'éventuelles substitutions de substances interdites par d'autres substances, et d'observer leur effet sur les fluctuations du NODU, nous avons fait appel à l'expertise des chefs de projet Ecophyto en D(R)AAF et du COPIL du projet Avi-NODU. Nous leur avons demandé de proposer, parmi les substances figurant dans la BNV-d, des couples {substance à substituer ; substances remplaçantes potentielles} qui pourraient illustrer la dynamique de remplacement d'une substance interdite. Plusieurs informations complémentaires ont été demandées comme l'année de basculement possible. Nous avons reçu des propositions de 4 interlocuteurs. Parmi les propositions reçues, certaines ont été écartées pour cette étude car elles n'étaient pas directement mobilisables : remplacement de substances par une famille de substances, par des produits absents de la BNV-d, substitutions de produits commerciaux, année d'interdiction hors de la période couverte par le BNV-d. Pour simplifier, nous avons également retiré les substances qui n'appartenaient pas au segment agricole. Chacune des propositions a été faite pour des usages spécifiques (culture et bioagresseurs), mais nous avons regardé si on pouvait observer ces éventuelles substitutions via la contribution de chaque substance au NODU ($Nodu_{SA}$) sur l'ensemble du segment agricole. En tout, 13 substances à substituer avec 28 substances distinctes en remplacement ont été conservées (**Tableau 2.1.1**).

Tableau 2.1.1: liste des positions de couples de substitutions

Substances à substituer	Substances remplaçantes potentielles	Année d'interdiction suggérée
imidaclopride	flonicamide	2018 à 2017
	spirotetramat	2018 à 2017
	chlordantraniliprole	2018 à 2017
	téfluthrine	2018 à 2017
	lambda-cyhalothrine	2018 à 2017
iprodione	captane	2018
	fenpyrazamine	2018
	fluopyram	2018
	isofetamide	2018
glufosinate ammonium	glyphosate	2018
	2,4-d	2018
amitrole	glyphosate	2016
	2,4-d	2016
metam-sodium	NA	2018
linuron	clomazone	2018
chlortoluron	prosulfocarbe	2017
trifluraline	napropamide	2008
	diméthachlore	2008
	métazachlore	2008
	clomazone	2008
	quinmerac	2008
thiaclopride	spirotetramat	2017
	chlordantraniliprole	2017
	téfluthrine	2017
méthiocarbe	metaldehyde	2014
acétochlore	s-métolachlore	2012

	dimethenamide	2012
isoproturon	glyphosate	2015 à 2017
chlortoluron	flufenacet	2015 à 2017
	prosulfocarbe	2015 à 2017
dimethoate	spinosad	2016
	spirotriamat	2016
	deltaméthrine	2016
	phosmet	2016
	cyantraniliprole	2016
	lambda-cyhalothrine	2016
	spinetoram	2016
ioxynil	pendiméthaline	2016

2.1.3. Résultats et discussion

Effet du statut d'autorisation des produits et substances actives sur leurs ventes

Analyse au grain des produits commerciaux (AMM)

Dans la **Fig. 2.1.1a** et **b**, on peut voir, respectivement, l'augmentation et la diminution de la quantité relative d'une AMM en fonction de son année d'autorisation ou d'interdiction (barre verticale en pointillé). L'effet de l'année d'autorisation est logiquement net : les quantités relatives de produits vendues sont nulles avant la première autorisation (99.7% des AMM). Après cette date, les quantités vendues de produits augmentent progressivement (en moyenne et en médiane) dans les deux années qui suivent l'autorisation. Cette période représentant probablement la mise en place commerciale de l'AMM. Au-delà de la tendance générale observée, une grande variabilité entre les AMMs est constatée.

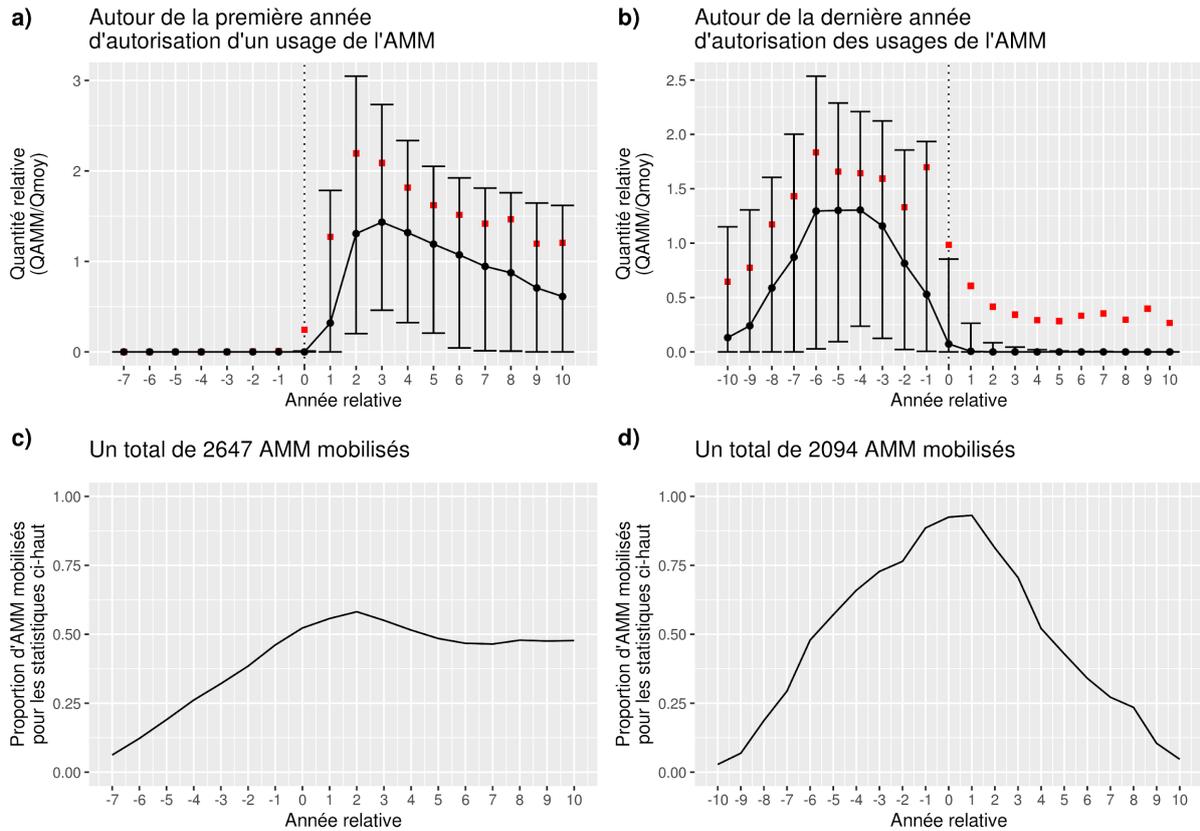


Figure 2.1.1 : Evolution des quantités d'AMM, exprimée en quantité relative ($QR_{AMM} = Q_{AMM} / Q_{AMM} \text{ moyenne}$), par rapport à a) la première année d'autorisation d'un usage et b) l'année où tous les usages sont interdits. Les années sont exprimées en Année relative (Année relative = Année réelle - Année pivot). Les points, la courbe et les écart-types noirs représentent la QR_{AMM} médiane avec les quantiles à 0.25 et 0.75. Les carrés rouges représentent les moyennes des QR_{AMM} . c) et d) représentent les proportions des AMM mobilisées pour le calcul des statistiques par année relative pour a) et b), respectivement.

L'effet de l'année d'interdiction est également important mais pas systématique. La moitié des produits (AMM) observés ont une quantité vendue quasiment nulle et, pour une large majorité des AMM (75 %), les quantités vendues tombent en dessous de la moitié de leur quantité vendue moyenne ($QR_{AMM} < 0.5$; **Fig. 2.1.1b**) dès l'année suivant l'interdiction (Année relative = 1; **Fig. 2.1.1b**). On observe une tendance de réduction des ventes qui s'amorce deux ans avant l'année d'interdiction (Année relative = -2 ; **Fig. 2.1.1b**).

Certaines AMM, cependant, continuent d'être vendues après l'interdiction de leurs usages. Parmi les AMM les plus pondéreuses concernées, les quantités vendues après l'interdiction sont bien réduites par rapport aux quantités vendues avant l'interdiction (sauf l'AMM 2090118 ; **Tableau 2.1.1**). Ces ventes expliquent notamment le maintien de la moyenne des quantités relatives d'AMM vendues autour de 0.5 (**Fig. 2.1.1b**). Il faut relativiser cette moyenne car elle n'a pu être calculée que sur un échantillon réduit : on ne connaît la quantité vendue quatre ans après l'interdiction que pour 50% des AMM initiales (1091

AMM; **Fig. 2.1.1d**). A ce stade, la cause de ces ventes hors autorisation n'est pas clairement établie. On peut formuler des hypothèses ad hoc pour expliquer ces ventes postérieures à l'interdiction : 1) ces AMM sont vendues dans le cadre de dérogations 120 jours, 2) les dates d'interdiction de ces AMM ont été basées sur leur date de retrait et alors qu'elles peuvent encore être distribuées²³, 3) il y a des erreurs dans la BNV-d Bilan (erreurs dans la déclaration des distributeurs ou dans la gestion de la base), 4) il y a des erreurs dans le catalogue E-PHY, ou bien 5) il y a eu des ventes hors cadre réglementaire. Il faudrait explorer ces pistes une par une mais on peut déjà avancer quelques points. Certaines de ces ventes doivent rentrer dans le cadre des 120 jours (ANSES, 2018), car il y a eu des dérogations sur la période étudiée et le catalogue EPHY qui a servi à établir les périodes d'autorisation ne les prend pas en compte. Une date d'interdiction basée sur la date de retrait ne peut pas expliquer les ventes au-delà d'une année, car les délais entre l'année de retrait et de fin de distribution ne dépassent pas les six mois. Certaines erreurs sont reportées dans le catalogue EPHY et la BNV-d donc les hypothèses 3 et 4 ne sont pas à exclure.

Tableau 2.1.1 : Top 10 des AMM soit "encore vendues" lorsque la date d'interdiction est passée. Les quantités moyenne vendues par an sur l'ensemble de la période et après l'interdiction, ainsi que le nombre d'années concernées après l'interdiction sont renseignées dans les deux colonnes de droites.

AMM	Exemple de Nom de produit	Nom de la substance active en quantité supérieure	Quantité moyenne vendues sur la période	Quantité moyenne vendues après interdiction	Nombre d'année après interdiction
2090118	TROOPER	pendiméthaline	702742.16	624659.7	9
9000471	BASTA F1	glufosinate ammonium	852730.97	380517.3	1
9800294	TARTAN	glyphosate	729986.05	96275.1	1
9100537	GLYPHOGAN	glyphosate	681072.83	60241.65	2
9400456	SUPER GREEN	sulfate de fer (sulfate ferreux heptahydrate)	888082.4	10127.25	2
9100266	TROPHEE	acétochlore	760112.86	2565100	5
8700304	METAREX RG	metaldehyde	1203574.5	6176.25	2
9800207	MESUROL PRO	méthiocarbe	1299897.68	3883	3
8800677	ONCOL S	benfuracarbe	789494.34	1821.43	7

²³ Une analyse complémentaire pourrait permettre de vérifier cette hypothèse en regardant quelle année a été mobilisée (année de retrait, année de fin de distribution, année de fin d'utilisation) comme année d'interdiction pour ces AMM vendues hors autorisation

9700562 HARNESS acétochlore 1009252.65 176 5
 MICROTECH
 MONSANTO

Analyse au grain des substances actives

L'évolution des substances vis à vis de leur date d'autorisation (premier usage autorisé) et leurs dates d'interdiction (aucun usage autorisé) donne des tendances similaires à celle des AMM (**Fig. 2.1.2**). On remarque également une tendance ascendante après l'année d'autorisation (Année relative = 2 ; **Fig. 2.1.2a**) mais celle-ci est moins marquée et plus variable selon les substances. Ce constat n'est pas surprenant car les substances sont présentes dans de nombreuses AMM qui ne sont pas toujours autorisées sur les mêmes périodes rendant plus complexes les dynamiques d'évolution.

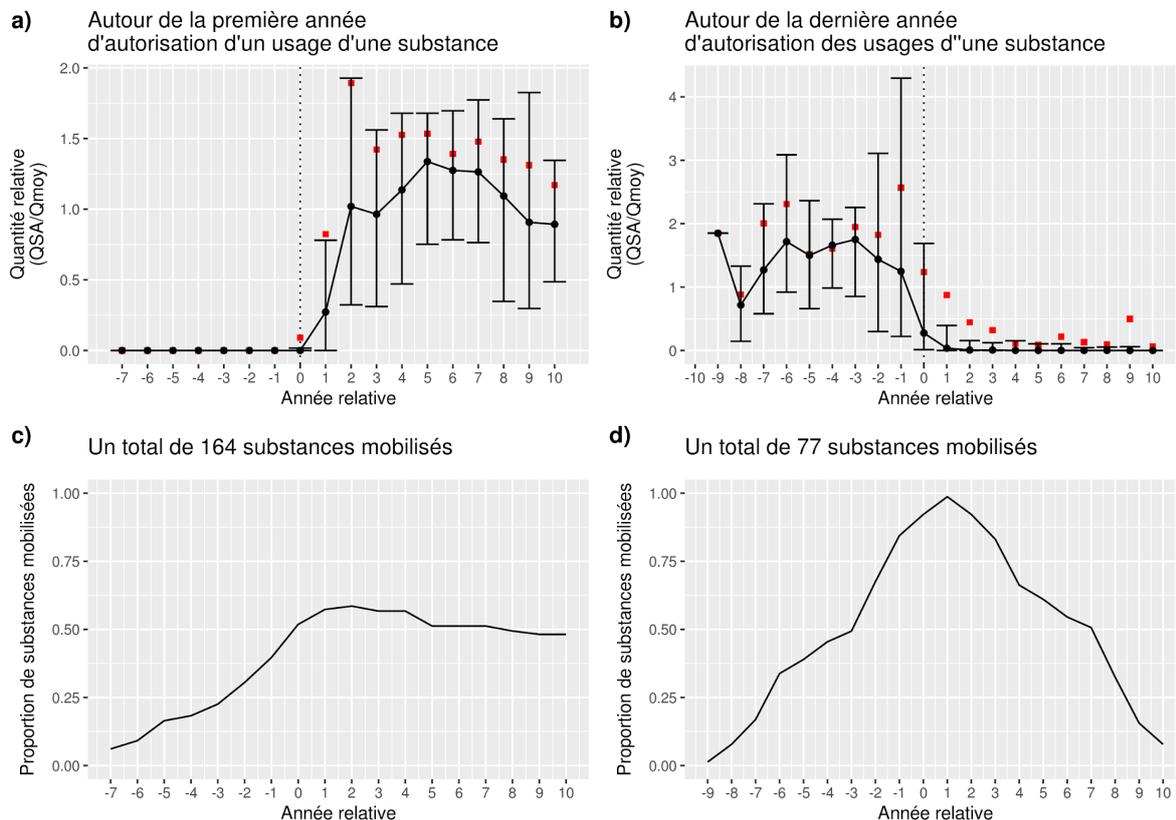


Figure 2.1.2 : Evolution des quantités de substances actives, exprimées en quantité relative ($QR_{SA} = Q_{SA} / Q_{SA}$ moyenne), par rapport à a) la première année d'autorisation d'un usage et b) l'année où tous les usages sont interdits. Les années sont exprimées en Année relative (Année relative = Année réelle - Année pivot). Les points, la courbe et les écart-types noirs représentent la QR_{SA} médiane avec les quantiles à 0.25 et 0.75. Les carrés rouges représentent les moyennes des QR_{SA} . c) et d) représentent les proportions des substances mobilisées pour le calcul des statistiques par année relative pour a) et b), respectivement.

On constate bien une diminution des quantités de substances actives vendues après leur année d'interdiction avec cette fois une tendance plus nette que pour les AMM (**Fig. 2.1.2b**) : trois ans après

l'interdiction, la quasi-totalité des substances n'est plus ou quasiment plus vendue. On peut observer que certaines substances sont encore vendues plusieurs années après (ex: 12 substances pour année relative = 9 ; **Fig. 2.1.2b**). L'existence de ventes de substances interdites, même en faible quantité, nécessite une investigation que nous n'avons pas conduite dans ce rapport. Les mêmes hypothèses que pour les AMM peuvent être proposées pour expliquer ce phénomène. La dérogation de 120 jours évoquée (hypothèse 1) pourrait être une bonne explication aux ventes éparses de ces substances après la date d'interdiction. On n'observe pas, contrairement aux AMM, de tendance claire descendante avant l'année d'interdiction.

Il faut préciser que l'on analyse ici un échantillon de substances beaucoup moins représentatif des substances de la BNV-d que des AMM (cf. **section 2.2.2**), ce qui donne moins de poids aux résultats sur les substances que sur les AMM. Ceci peut s'expliquer par un nombre plus restreint de substances qui ont leur année d'autorisation et d'interdiction suffisamment proche des années de ventes disponible dans la BNV-d Bilan (2009 à 2018) pour être intégrées aux analyses. Les périodes d'autorisation des substances, portées souvent par plusieurs AMM, sont en effet en moyenne plus longues que celles des AMM.

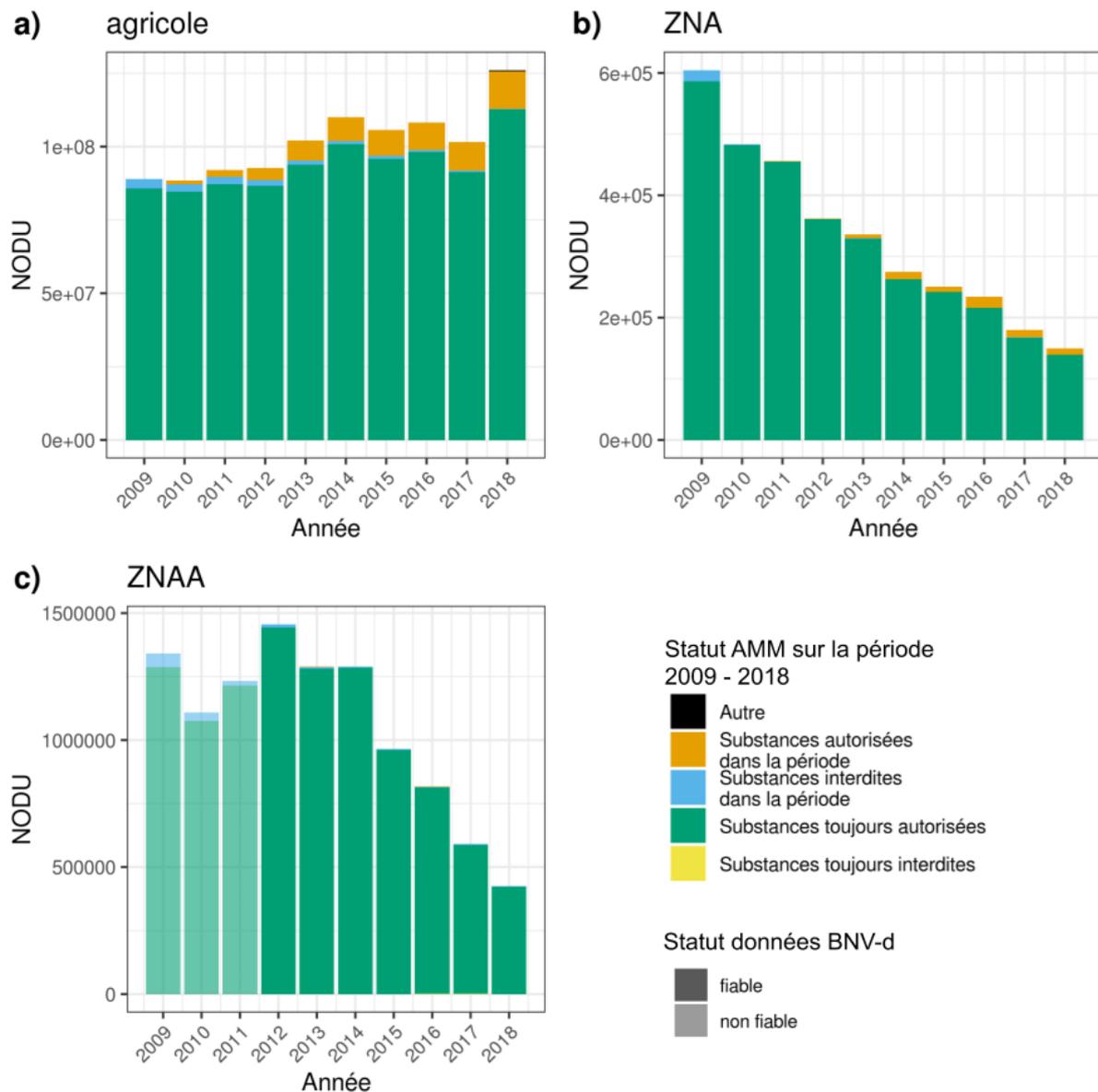
Au final, le nombre de substances impactées par les interdictions de leurs AMM peut être plus important que celui retenu dans cette analyse (seule les interdictions de la totalité des AMM d'une substance ont été considérées) : il suffit que l'AMM ou même l'usage le plus important d'une substance soit interdit pour que cela se ressente sur les ventes nationales de la substance concernée.

Effet des interdictions de substances sur la totalité des ventes

L'analyse précédente donne un poids égal à chaque produit ou substance au moyen des quantités relatives (division par la moyenne). Pour estimer l'impact des interdictions sur des indicateurs plus globaux comme la QSA ou le NODU, cependant, il faut regarder la part prise par ces substances interdites dans les indicateurs ainsi que l'évolution de ces derniers à la suite de leur interdiction.

Les substances qui voient l'ensemble de leurs AMM interdites durant la période observée ne concernent, pour le segment agricole, qu'une part négligeable du NODU agricole (1.48 %) et de la QSA agricole (1.63 %) et qui diminue au cours du temps (**Fig. 2.1.3a**). La part de ces indicateurs associée à des AMM

interdites durant la période est beaucoup plus importante : 22.6 % pour la QSA agricole et 17.0 % pour le NODU agricole (**Fig. 2.1.4a**). L'impact des interdictions d'AMM sur les indicateurs du segment agricole est donc potentiellement beaucoup plus important. On ne voit pas cependant de tendance globale à la diminution dans le segment agricole, malgré les interdictions de 72 substances et 1253 AMM sur la période (**Fig. 2.1.3a** et **Fig. 2.1.4a**). A l'inverse, on remarque une augmentation non négligeable des substances autorisées²⁴ (ou ré-autorisées) dans la période (6.23 % du NODU agricole), ainsi que des AMM autorisées (ou ré-autorisées ; 30.9 % du NODU agricole).



²⁴ Les 5 substances les plus importante en Q_{SA} sont phosphonate de disodium, cuivre du sulfate tribasique, fluxapyroxad, amétoctradine et bixafen

Figure 2.1.3 : Part du NODU selon les segments et le statut réglementaire des substances dans la période 2009 - 2018. Les NODU du segment ZNAA avant 2012 ne sont pas considérés comme "fiables" (cf Fig. 1.2.1).

Pour les autres segments, et pour le segment ZNAA en particulier (usages non agricoles amateurs), on constate que les substances, pour la plupart, sont déjà autorisées et le restent sur toute la période, mais qu'une grande partie des AMM est interdite dans la période (36.7 % du NODU ZNA et 50.3 % du NODU ZNAA ; **Fig. 2.1.4b et c**). À l'inverse du segment agricole, on observe une diminution du NODU total pour ces deux segments, qui semble, pour le NODU ZNAA, s'expliquer par la diminution du NODU ZNAA issus des AMM interdites au cours de la période. On constate, surtout pour le NODU ZNA, une diminution également importante des substances autorisées pendant toute la période. Les diminutions ne semblent donc pas exclusivement le fait des interdictions. On peut conclure de ces résultats que si les interdictions semblent avoir eu une influence sur les NODU des segments ZNA et ZNAA, elles n'ont pas eu d'effet visibles sur le NODU du segment agricole.

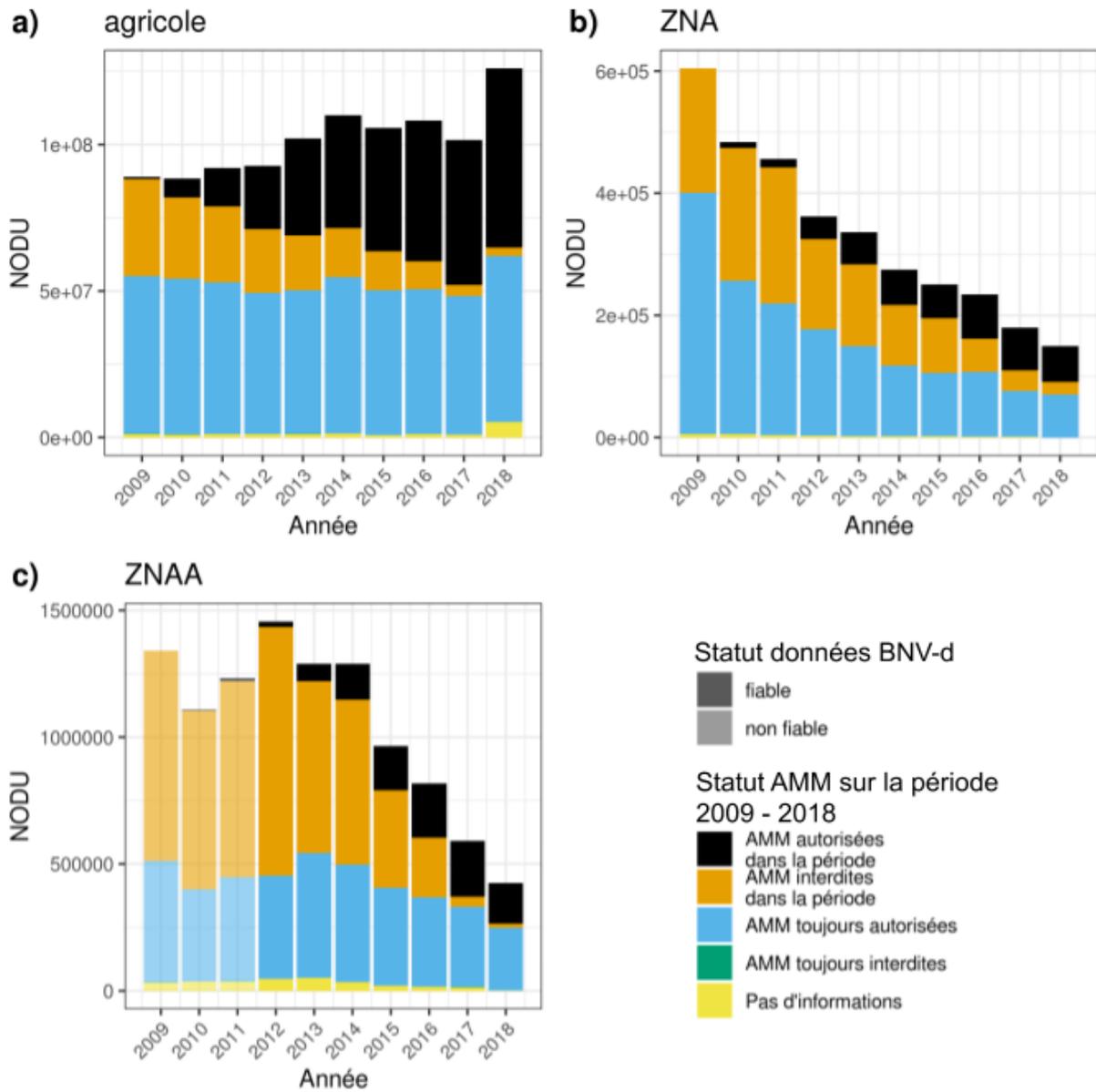


Figure 2.1.4 : Part du NODU selon les segments et le statut réglementaire des AMM dans la période 2009 - 2018. Les NODU du segment ZNAA avant 2012 ne sont pas considérés comme "fiables" (cf Fig. 1.2.1).

Interdiction et substitution de substances

Dans cette section, nous allons chercher à mettre en lumière des dynamiques de substitution de substances actives au moyen des exemples fournis par les experts et leur traduction en termes de NODU agricole.

La totalité des suggestions de substitutions fait suite à des interdictions de substances que l'on appellera "substances à substituer". On constate que l'ensemble des substances mentionnées dans les propositions (à substituer ou remplaçantes) représente une part non négligeable du NODU agricole (19.1% entre 2008 et 2018). En 2009, les substances à substituer représentent 11% du NODU agricole, ce qui représente, si aucune substitution n'a lieu, la baisse attendue de NODU après leur interdiction. On observe bien une diminution du NODU des substances à substituer, mais on constate également une augmentation progressive du NODU des substances remplaçantes potentielles (**Fig. 2.1.5**). Cette anti-corrélation conforte l'hypothèse de l'existence de substitutions, d'autant que la tendance générale du NODU agricole sur la période n'est clairement pas à la baisse (**Fig. 2.1.5**). On peut noter, par ailleurs, une tendance générale croissante sur l'ensemble des substances remplaçantes mentionnées.

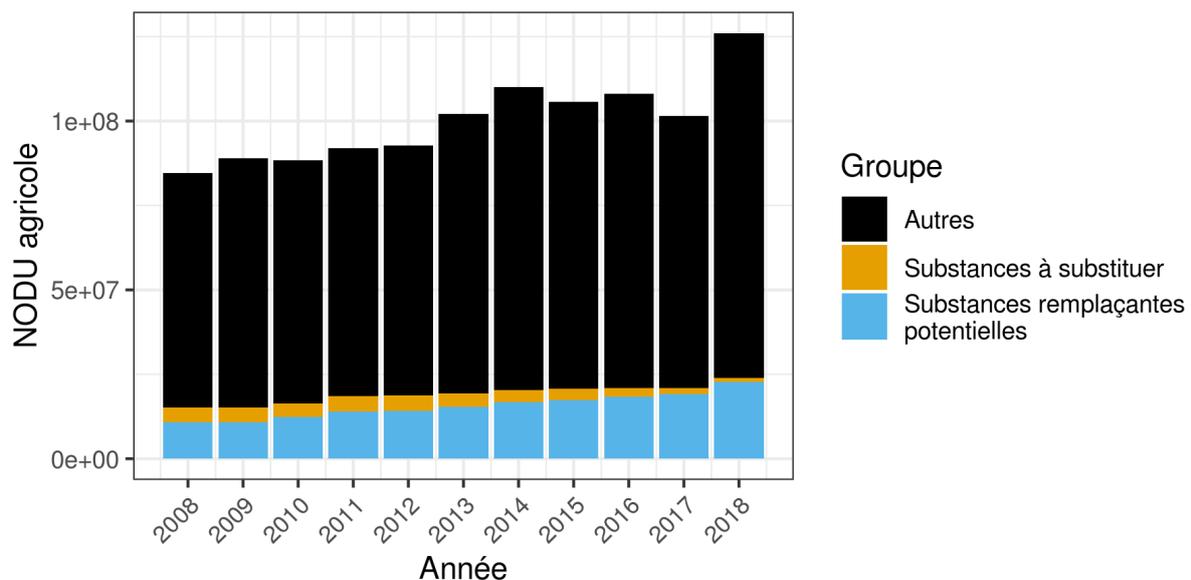


Figure 2.1.5 : Part du NODU agricole pris pas les substances mentionnées dans les propositions de substitution.

Si on regarde les dynamiques pour chaque substance à substituer et leurs substances remplaçantes potentielles (par exemple **Fig. 2.1.6**), on constate, pour une grande partie d'entre elles, une substitution sur les volumes de ventes, c'est-à-dire une tendance à la diminution des substances à substituer et une

tendance à l'augmentation de certaines substances remplaçantes potentielles. Par exemple, le s-métolachlore et l'acétochlore évoluent en parallèle jusqu'en 2012, puis les quantités de l'acétochlore chutent jusqu'à s'annuler en 2014 (interdiction en 2012) et, à l'inverse, le s-métolachlore augmente et se stabilise en 2014 (**Fig. 2.1.6c**). Nous avons trié les résultats obtenus pour les 13 substances à substituer en 3 groupes : un groupe montrant une tendance à la substitution et dont les substances potentiellement remplaçantes sont spécifiques à chaque substance interdite (**Fig. 2.1.6**), un groupe montrant une tendance à la substitution des volumes vendus mais qui a des substances remplaçantes en commun entre substances interdites, ce qui complexifie les patterns observés (**Fig. 2.1.7**) et un groupe sans tendance claire à la substitution (**Fig. 2.1.8**).

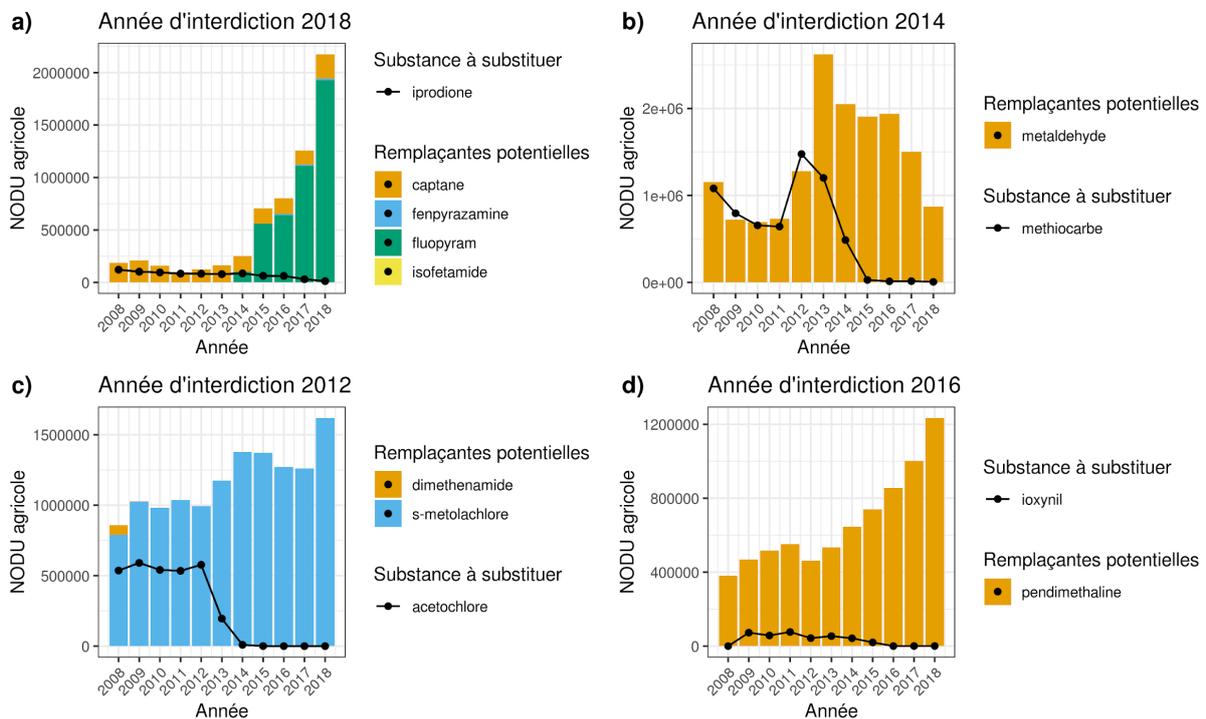


Figure 2.1.6: Dynamiques de vente de substances interdites au cours de la période et n'ayant pas de substances potentiellement remplaçantes en communs (**Groupe 1**). Part de NODU agricole entre 2008 et 2018 prise par les substances à substituer (courbe noire) et par la totalité des substances remplaçantes potentielles proposées (barres en couleur) (BNV-d Bilan). L'année ou les années d'interdiction suggérée sont mentionnées dans le titre de chaque graphique.

Les substances à substituer (sauf le chlortoluron ; **Fig. 2.1.8d**) ont un point d'inflexion qui correspond aux années d'interdiction qui ont été suggérées par les personnes sollicitées²⁵. Ce point d'inflexion est

²⁵ Nous n'avons pas vérifié si ces années correspondent ou non à nos estimations.

suivi, pour les groupes **Fig. 2.1.6** et **Fig 2.1.7**, par une augmentation des substances potentiellement remplaçantes, parfois très nettement à la hausse. On constate plusieurs types d'impacts des substitutions sur le NODU à court terme : soit l'augmentation de NODU des substances remplaçantes potentielles est bien plus forte que la diminution de la substance à substituer (**Fig. 2.1.6a** et **d** et **Fig. 2.1.7a, b, et e**), soit elle est similaire (**Fig. 2.1.6b** et **c** et **Fig. 2.1.7d**) ou soit elle est plus faible (**Fig. 2.1.6** et **Fig. 2.1.7c**).

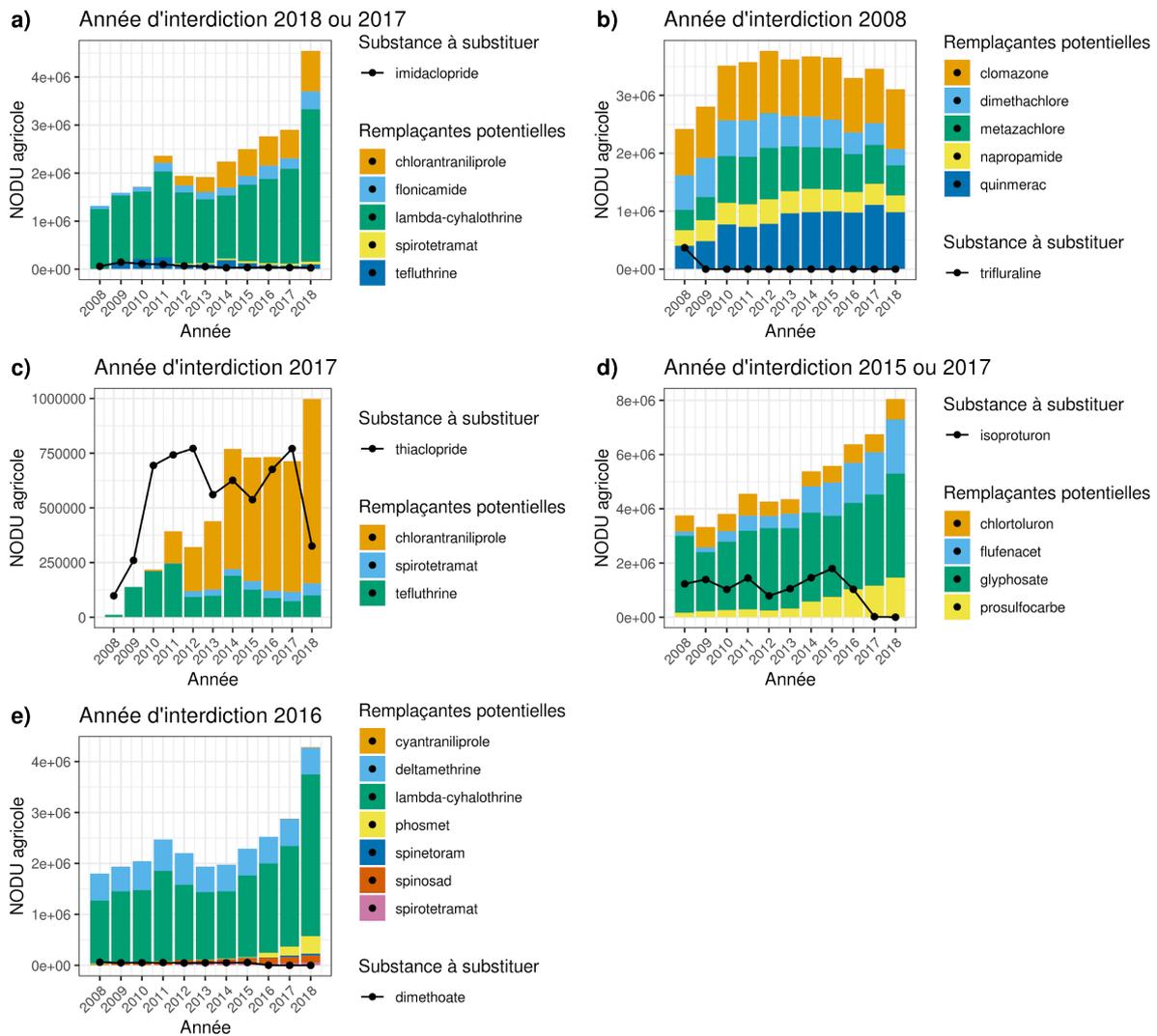


Figure 2.1.7: Dynamiques de ventes de différentes substances interdites au cours de la période, ayant des substances potentiellement remplaçantes en communs et présentant une tendance observable à la substitution des volumes de vente (**Groupe 2**) (cf. Figure 2.1.6).

Certaines observations vont dans le sens d'une augmentation du NODU dans sa globalité mais on ne peut pas conclure que cette augmentation est intrinsèquement liée à la substitution entre substance dans les pratiques agricoles. Par exemple, pour le deuxième groupe, des substances remplaçantes sont potentiellement impliquées dans le remplacement de plusieurs substances (ex : la lambda-cyhalothrine en remplacement potentiel de l'imidaclopride et du diméthoate **Fig. 2.1.7a** et **e**) : il n'est donc pas

possible de découpler les effets, en tout cas à l'échelle nationale. Les cas de substitutions du premier groupe (**Fig. 2.1.6**) sont légèrement plus certains dans la mesure où les substances remplaçantes potentielles ne sont concernées que par une substitution (sous réserve d'autres substitutions potentielles importantes non relevées, celles-ci n'ayant pas de prétention à être exhaustives). Par ailleurs, d'autres phénomènes pourraient expliquer la tendance observée, comme par exemple, une augmentation de l'utilisation de substances potentiellement remplaçantes pour des utilisations différentes des utilisations des substances à substituer considérées.

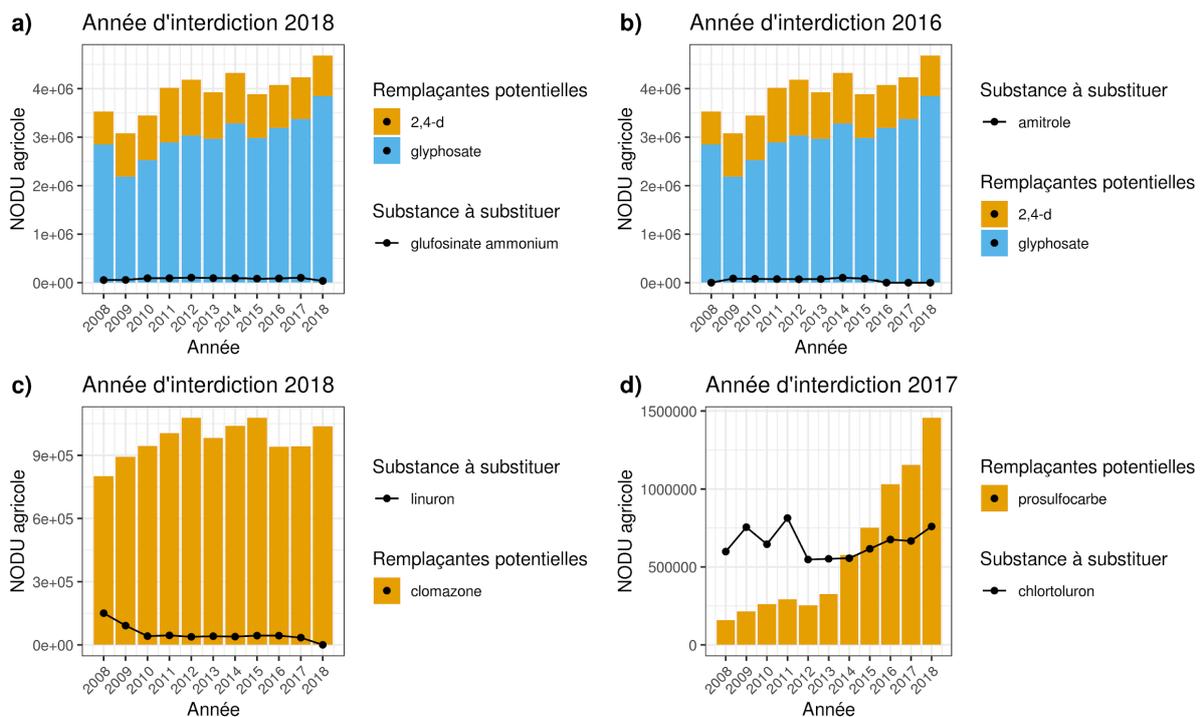


Figure 2.1.8: Dynamiques de ventes de substances interdites au cours de la période, ayant des substances potentiellement remplaçantes en communs et sans tendance observable de substitution des volumes vendus (**Groupe 3**) (cf. Figure 2.1.6).

Les exemples observés dans les deux premiers groupes (**Fig. 2.1.6** et **Fig. 2.1.7**) semblent indiquer qu'un bon nombre de propositions de remplacement transmises sont fondées et méritent d'être creusées plus précisément si l'on veut démontrer la substitution dans les pratiques aux champs au-delà de la substitution observée dans les volumes vendus au niveau national. La BNV-d ne permettant pas de connaître précisément pour quel usage telle ou telle substance a été mobilisée, il est difficile de conclure sur un effet de substitution d'une substance par une autre par les utilisateurs de produits phytosanitaires. Il faut également préciser que ces graphiques à l'échelle nationale ne prennent pas en compte les dynamiques locales qui sont pourtant l'échelle à laquelle les éventuelles substitutions auront lieu.

L'approche présentée ici est corrélative à grande échelle. Pour argumenter la substitution dans les pratiques au champ, on pourrait regarder avec des analyses statistiques multivariées si on retrouve ces anti-corrélations à des grains spatiaux bien plus fins. Avec les années 2019 et 2020, on disposerait de 6 années dans la BNV-d Registre pour observer ces dynamiques à de plus fines échelles. Il pourrait également être intéressant de regarder les dynamiques des AMM sous-jacentes. Nous avons vu, en effet, que les AMM changeaient beaucoup plus d'une année à l'autre (**Fig. 2.1.4a**). Il pourrait être intéressant de regarder si les dynamiques de changement d'AMM sont le résultat uniquement de stratégies commerciales ou bien si elles sont également en lien avec des interdictions d'AMM. Il serait également intéressant d'essayer d'estimer l'importance des substitutions de manière plus générale, sans partir d'exemples suggérés par des experts. En mobilisant la base EPHY, il devrait être possible d'identifier des AMM ou des substances avec des usages similaires, de lister parmi ces AMM ou substances celles qui sont interdites, puis de regarder comment les autres AMM ou substances sont affectées autour de la date d'interdiction.

2.2. Effets des augmentations de redevances pollution diffuse

2.2.1. Introduction

Depuis la mise en place du plan Ecophyto en 2008, qui visait une réduction de moitié de l'usage des produits phytosanitaires, une taxation des produits phytosanitaires, appelée Redevance pour Pollution Diffuse (RPD), a été instaurée progressivement sur la base de taux différenciés selon les catégories de toxicité des substances actives pour l'homme et l'environnement. Dans la **Fig. 2.2.1**, nous avons représenté des statistiques globales des RPD de chaque substance taxée selon les années en nous basant sur l'ensemble des substances présentes dans la table des RPD (584 substances actives²⁶ ; **Annexe B**) : RPD moyenne, RPD médiane, RPD pondérée par la part dans les indicateurs totaux de QSA ou de NODU de chaque substance. Les classes et les niveaux de taxation de la RPD ont augmenté substantiellement au 1er janvier des années 2015 et 2019 (augmentation de la RPD moyenne et des RPD pondérées, **Fig. 2.2.1**). L'augmentation plus forte de la RPD pondérée par le NODU nous permet d'affirmer que l'augmentation de la RPD concerne en particulier les substances contributives du NODU.

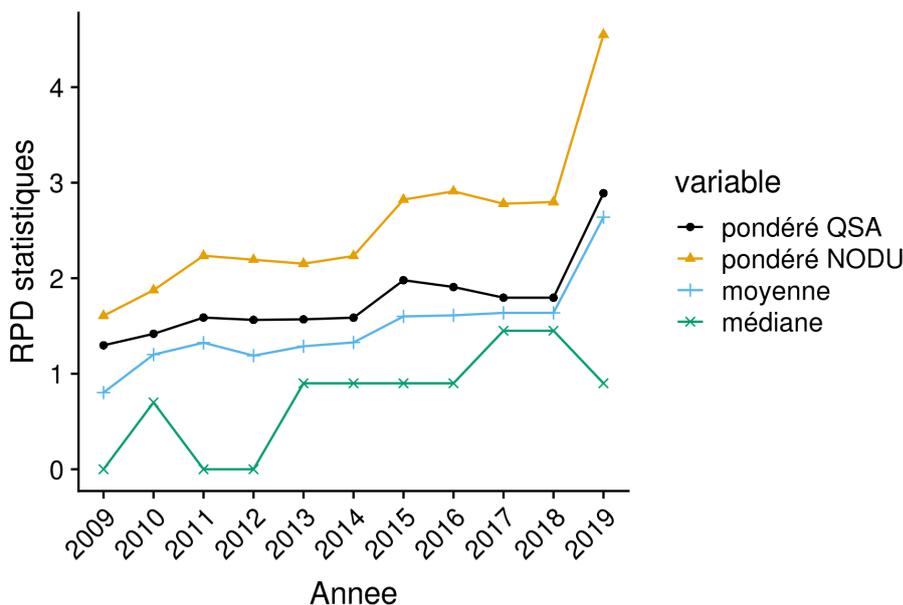


Figure 2.2.1 : Évolution de statistiques de la RPD (€/kg) sur l'ensemble des substances au cours du temps (médiane, moyenne et pondération par la QSA ou le NODU) tous segments confondus. Pour la Qsa et Nodu de 2019 nous avons utilisé les Qsa et Nodu de 2017 pour la pondération.

La prise en compte de ce constat d'augmentation de la RPD amène différentes interrogations :

²⁶Avec ou sans RPD, les substances mobilisés pour les statistiques **Fig. 2.2.1** représentent 100% de la QSA et du NODU total, tous segments confondus. Seulement quelques substances manquantes par rapport à la BNV-d (63).

- 1) L'augmentation de taxation a-t-elle un effet sur l'usage global ? (hypothèse H1 et H2; **Fig. 2.2.2**)
- 2) Enregistre-t-on des fluctuations d'achats anticipant une augmentation de RPD ? (hypothèse H2 et H3 ; **Fig. 2.2.2**)

En effet, l'effet recherché de la RPD est d'entraîner une modification des comportements d'achats des agriculteurs se traduisant par une réduction conséquente et durable des ventes de substances qui voient leur RPD augmenter (Q1 ; hypothèse H1 et H2; **Fig. 2.2.2**). La question 2 concerne ce qu'on appellera par la suite un effet d'anticipation, effet fréquemment avancé pour expliquer certaines augmentations du NODU (notamment en 2018). Il consiste en des achats supplémentaires de produits phytosanitaires par des agriculteurs (année n-1) lorsqu'ils prennent connaissance d'une augmentation de redevance l'année suivante (année n) (hypothèse H2 et H3; **Fig. 2.2.2**). Ces achats étant anticipés on s'attend également à une baisse accentuée des achats l'année de l'augmentation (année n) par rapport aux années normales.

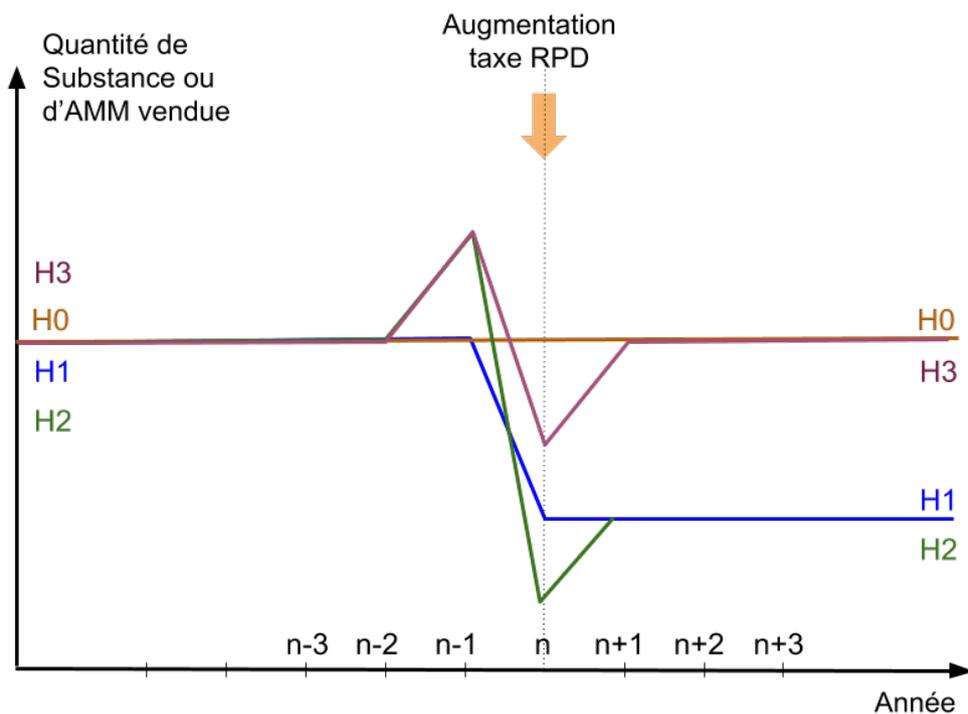


Figure 2.2.2: Représentation schématique des différents scénarios envisagés. H0 : pas d'effet de l'augmentation de la taxe sur les ventes de la substance. H1 : diminution durable des ventes de la substance sans anticipation (sans effet rebond). H2 : diminution durable des ventes de la substance avec anticipation. H3 : diminution ponctuelle des ventes de la substance avec anticipation puis retour à la normale.

Une difficulté qui s'ajoute à la schématisation de la **Fig. 2.2.2** réside dans le fait qu'il n'y a pas seulement l'effet de la redevance sur les ventes qui entre en ligne de compte mais aussi un grand nombre d'autres facteurs pouvant intervenir simultanément (pression en bioagresseurs, substitutions de substances

actives, etc.). L'absence d'effet de la redevance (H_0) ne se traduit donc pas forcément par des ventes constantes. Il s'agit donc de prendre en compte la tendance générale d'évolution des ventes sur une période donnée pour voir s'il y a des variations des ventes spécifiquement autour des années de changement de RPD (cf. **section 2.2.2 "Matériel et Méthodes"**).

2.2.2. Matériel et Méthodes

Pour évaluer les évolutions de la RPD nous nous sommes appuyés sur une table fournie par le MTE donnant pour chaque substance concernée le montant annuel de sa redevance (en € / kg de substance) entre 2008 et 2020 (**Annexe B.10**). Pour l'année 2009, qui inclut un changement de redevance en cours d'année, nous avons choisi arbitrairement la redevance de la deuxième partie de l'année.

Du fait d'une réglementation ayant lieu à l'échelle nationale, les quantités ont été regardées uniquement à cette échelle. Cette échelle nous a permis également de mobiliser la BNV-d Bilan et donc une série temporelle plus longue (2009 à 2018). Comme précédemment, les données ont été complétées de manière à donner la valeur 0 à toutes les quantités de produits (AMM) ou de substances actives qui n'auraient pas de valeur vendue une année donnée de la période étudiée. Pour l'ensemble des analyses de ce chapitre nous n'avons mobilisé que les données du segment agricole (agricole - autres, agricole - UAZNA, agricole - UA). Pour suivre l'effet des redevances sur les substances nous avons calculé leurs quantités vendues au niveau national, que l'on a exprimé en Nodu_{SA} ²⁷ pour pouvoir comparer les substances entre elles.

Pour analyser l'effet des changements de RPD sur les ventes nous avons mobilisé plusieurs outils statistiques : des tests de Fisher et des modèles linéaires.

²⁷ NODU d'une substance donnée voir formule **section 1.1.2**

Test de Fisher

Les tests de Fisher permettent de répondre à des questions ciblées sur les deux années qui ont connu une forte augmentation de la RPD (2015 et 2019, cf. **Fig. 2.2.1**). Ces tests visent à examiner les deux questions formulées précédemment pour ces deux cas particuliers. Les données n'étant pas encore disponibles pour l'année 2019 au moment de l'analyse, la question 1 n'a pu être traitée que pour l'augmentation de l'année 2015. Les tests de Fisher sont des tests statistiques qui analysent des tables de contingence et testent si des catégories sont en lien les unes avec les autres (H_0 pas de lien).

Pour la **question 1**, nous avons testé si, pour les substances qui avaient une augmentation de redevance entre 2014 et 2015 (augmentation $dTax$ supérieure à 0.85 €/Kg), il y avait une diminution de leur $Nodu_{SA}$ suite à l'augmentation de la RPD en 2015; une diminution de $Nodu_{SA}$ étant établie par une différence positive entre la moyenne de $Nodu_{SA}$ entre 2011 et 2013 et la moyenne de $Nodu_{SA}$ entre 2016 et 2018. Nous avons fait ce test sur 317 substances actives pour lesquelles les ventes étaient non nulles au moins 1 année avant les effets attendus de la taxe (entre 2009 et 2013), au moins 1 année après (entre 2016 et 2018) et au moins 5 années au total (hors années 2014 et 2015).

Pour la **question 2**, nous avons fait deux tests : un en lien avec l'augmentation de RPD en 2015 et un autre en lien avec celle de 2019 (année n ; **Fig. 2.2.2**). Nous avons testé si les substances qui avaient une augmentation de la redevance entre l'année $n-1$ et n (augmentation $dTax$ supérieure à 0.85 €/Kg) étaient l'objet d'un effet d'anticipation, que nous avons estimé par une augmentation du $Nodu_{SA}$ entre les années $n-2$ et $n-1$ précédant l'augmentation de la RPD l'année n (augmentation supérieure à 0 NODU). Cette augmentation de $Nodu_{SA}$ entre 2013 et 2014, ou entre 2017 et 2018, traduit l'effet d'anticipation pour, respectivement, 2015 et 2019. Dans les tests de Fisher réalisés sur l'effet d'anticipation (**Q2**), nous avons retiré l'effet de la tendance générale sur le $Nodu_{SA}$ afin de prendre en compte d'éventuelles tendances générales d'évolution des substances, indépendante de l'augmentation de la RPD. Pour cela, nous avons soustrait au $Nodu_{SA}$ la valeur prédite chaque année par un modèle linéaire $Nodu_{SA} \sim \text{Année}^{28}$, pour l'ensemble des substances pour lesquelles la tendance était significative ($p \text{ value} > 0.05$). Pour les autres

²⁸ Un modèle pour chaque substance des quantités nationales vendues par année

substances, nous avons seulement soustrait la moyenne de $Nodu_{SA}$ sur l'ensemble de la période d'étude. Nous avons fait le test de 2015 et 2019 sur 370 substances actives qui ont des valeurs pour les années $n-1$ et $n-2$ (2013, 2014, 2017 et 2018), ainsi qu'au moins 5 années au total pour calculer les tendances (hors $n-1$ et $n-2$).

Modèle linéaire

Un modèle linéaire permettant de tester l'ensemble des deux questions simultanément et sur l'ensemble des années a également été mobilisé pour l'ensemble des substances :

$$Nodu_{SA} \text{ norm} \sim n + RPD + dRPD_{n/n+1}$$

avec :

$Nodu_{SA}$: $Nodu_{SA}$ national par substance active et par an

$Nodu_{SA} \text{ norm}$: $Nodu_{SA}$ normalisé, c'est à dire le $Nodu_{SA}$ centré et réduit indépendamment pour chaque substance

$$= \text{moyenne}(Nodu_{SA}) / \text{déviation.standart}(Nodu_{SA})$$

n : l'année

RPD : la valeur de la RPD une année donnée (€/kg)

$dRPD_{n/n+1}$: la différence de RPD entre l'année donnée (n) et l'année suivante ($n+1$)

L'effet de l'année n permet de prendre en compte les tendances d'évolution, si celles-ci existent, de chaque substance qui seraient indépendantes de modifications de RPD. Un effet de l'année traduirait donc une tendance générale d'augmentation ou de diminution sur l'ensemble des années. La valeur de RPD permet de voir si la RPD affecte durablement les ventes. Un effet négatif signifierait qu'il existe une diminution durable des ventes corrélée à l'augmentation de la RPD. La différence de RPD entre l'année en cours et la suivante ($dRPD_{n/n+1}$) permet d'évaluer l'effet d'anticipation, c'est-à-dire si les ventes des produits plus taxés l'année suivante ont été plus importantes que les autres années.

Afin de prendre en compte d'éventuels effets d'autorisation et d'interdiction qui ont été mis en évidence précédemment, nous avons supprimé les données qui se situent hors des périodes d'autorisation (mobilisation base de données EPHY cf. **section 1.1.2**). Nous n'avons gardé que les substances qui avaient au moins 5 années observées (85 % des substances actives de la BNV-d Registre agricole).

2.2.3. Résultats et discussion

Deux années, 2015 et 2019, connaissent des augmentations plus importantes de RPD sur des substances contribuant à une part importante du NODU (52 et 214 substances qui représentent 20% et 76% du NODU agricole en 2014 et 2018; **Fig. 2.2.3**). Plus précisément, on note une transition d'un nombre important de substances des classes de redevances de 1-2 à 5-6 €/kg de substances actives en 2015, substances qui contribuent également de manière importante au NODU entre 2014 et 2015 (19.4 %).

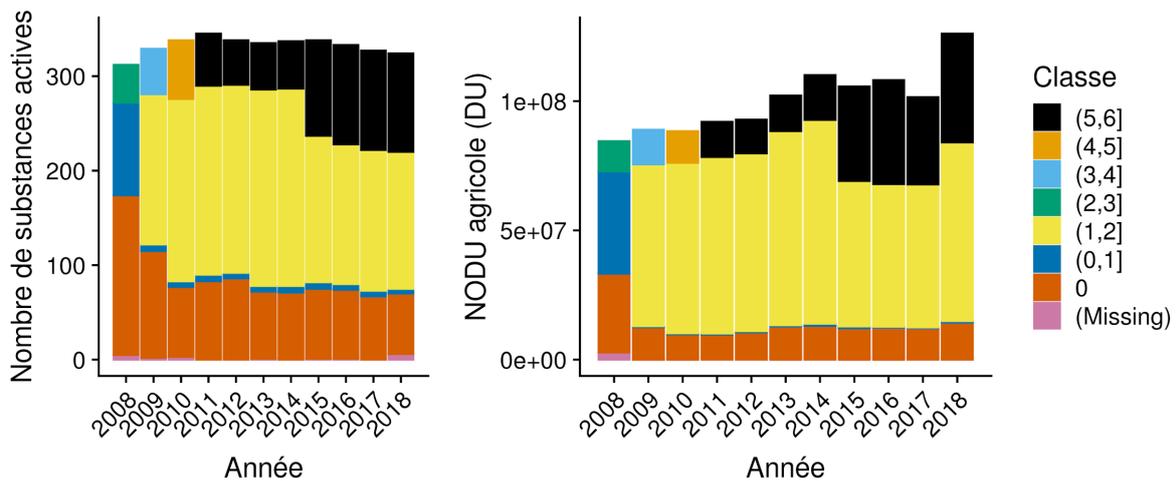


Figure 2.2.3: Nombre de substances actives et NODU en fonction des classes de taxes RPD pour le segment agricole (UA, UAZNA et autres). Les valeurs de RPD sont exprimées en €/kg de substances actives.

De manière générale, dans toutes nos analyses statistiques, on ne constate pas d'effet de diminution durable des ventes de substances suite à l'augmentation de la RPD (**Q1** ; hypothèses H0 ou H3 ; **Fig. 2.2.2**). Dans les modèles linéaires réalisés (1) et (2), la RPD n'a pas d'effet significatif sur le NODU normalisé de chaque substance ($Nodu_{SANorm}$; **Tableau 2.2.1**). Le test de Fisher ne nous a pas permis non plus de mettre en évidence que les substances ayant connu une augmentation de redevance en 2015 (> 0.85 €/kg) voyaient leur ventes ($Nodu_{SA}$) significativement diminuer après 2015 (Test Fisher ; p value = 0.65, facteur de risque = 1.18). Il faut cependant noter que nous n'avons pas encore assez de recul pour évaluer l'effet de l'augmentation particulièrement forte de la RPD en 2019 (**Fig. 2.2.1**). Il est en effet possible que les niveaux supérieurs de taxation mis en place aient un effet plus dissuasif sur les ventes (Böcker et Finger, 2016, Femenia et Letort, 2016).

Le modèle (2) (**Tableau 2.2.1**) qui donne un poids important aux substances les plus contributives montre seulement un effet positif et significatif de l'année sur les NODU des substances. Cela signifie

qu'il y aurait une tendance à l'augmentation des ventes pour les substances qui contribuent fortement au NODU. Ce résultat confirme l'importance de tenir compte de la tendance générale dans les tests de Fisher pour analyser l'effet d'anticipation **Q2** (cf Matériels et méthodes).

Tableau 2.2.1 : Modélisation linéaire de l'effet de la RPD sur le Nod_{SA} des substances normalisées ($Nod_{SA}norm$).

Modèle de régression linéaire	Estimation	p value	R ²	F
<i>(1) $Nod_{SA}norm \sim Année + RPD + dRPD$</i>				
<i>Année</i>	0.0031	0.62		
<i>RPD</i>	0.0189	0.07		
<i>dRPD</i>	0.0554	< 10 ⁻³	0.0057	5.86
<i>(sans pondération)</i>				

<i>(2) $Nod_{SA}norm \sim Année + RPD + dRPD$</i>				
<i>Année</i>	0.0950	< 10 ⁻¹⁵	0.0833	92.02
<i>RPD</i>	- 0.0105	0.34		
<i>dRPD</i>	0.0210	0.16		
<i>avec pondération Nod_S</i>				

(1) modèle où les substances ont un poids équivalent et (2) modèle où les substances avec un fort $Nod_{SA}norm$ ont plus de poids. Pour l'ensemble des substances les années où une substance est interdite ont été supprimées.

Nos analyses ont permis de mettre en évidence un léger effet d'anticipation des ventes précédant une hausse de RPD (H3 ; **Fig. 2.2.2**). Dans le modèle linéaire classique (1), la variation de RPD entre une année donnée et l'année suivante (dRPD) a un effet positif sur les NODU des substances en général (modèle (1) ; **Tableau 2.2.1**), ce qui signifie que les substances qui ont eu une plus forte hausse de RPD une année donnée ont eu également plus de ventes l'année précédente. L'effet d'anticipation n'est pas visible, cependant, pour les substances qui contribuent davantage au NODU : l'effet du dRPD n'est pas significatif dans le modèle qui donne un poids plus important aux substances les plus contributives (modèle (2); **Tableau 2.2.1**).

Pour la période de transition de RPD 2018-2019, mais pas pour celle de 2014-2015, les substances qui ont une augmentation de la RPD sur cette période ont également une augmentation des ventes entre les deux années qui précèdent la période d'augmentation de la RPD (test Fisher, 2015 : p value = 0.65 et facteur de risque 1.10 ; 2019 : p value < 10⁻³ et facteur de risque = 2.33). Le nombre total de substances, le nom et les caractéristiques des 5 substances les plus contributives du NODU sont représentés **Tableau 2.2.2**, pour chacun des groupes du test Fisher traitant de l'effet d'anticipation suite à l'augmentation de la RPD en 2019.

Ces résultats vont dans le sens de l'existence d'un effet d'anticipation, principalement dirigé par l'augmentation en RPD de 2019, c'est-à-dire des achats qui semblent plus importants en 2018 pour les substances avec une augmentation de RPD en 2019. Pour vérifier la cohérence des ventes avec un effet d'anticipation en 2018, on pourrait notamment vérifier que les ventes pour l'année 2019 et les suivantes, non disponibles au moment de la réalisation de ce travail, retournent bien à la "normale" des ventes après 2018 (H3 ; **Fig. 2.2.2**). Du fait que l'augmentation de la RPD en 2015 n'ait pas montré d'effet d'anticipation, on ne peut pas non plus conclure que le phénomène d'augmentation observé est indépendant des années. Certains facteurs particuliers à la période 2017 - 2018 et aux substances les plus taxées peuvent également être à l'origine de l'augmentation de leurs ventes entre 2017 et 2018 (conditions climatiques, autres mesures réglementaires). Par exemple, la RPD n'est pas la seule mesure qui peut affecter les ventes en 2018. D'autres mesures réglementaires peuvent avoir un effet d'anticipation, comme l'interdiction, pour toutes les ventes, des remises, rabais et ristournes, à compter de début 2019 (loi EGALIM). D'après certains chefs de projet Ecophyto en région, cette mesure a eu un effet important d'anticipation des ventes en 2018. Cette mesure touche *a priori* toutes les substances et ne devrait donc pas remettre pas en cause les résultats précédents sauf si les rabais et ristournes touchent particulièrement les substances avec une augmentation de RPD.

Tableau 2.2.2: Top 5 des substances les plus contributives du NODU en 2018 selon leurs variations de vente (2017-2018) et de la RPD (2018-2019).

Groupe	Nombre total de substances par groupe	Top 5 substances actives	% du NODU 2018	dNodu _{SA, corrigé} (2018 - 2017)*	dTax*** (2019 - 2018)
augmentation des ventes en 2018 et augmentation de la redevance en 2019 :		metsulfuron-methyl	3.97	1539726	3.5
		cyperméthrine	3.32	657348	31.12
		glyphosate	3.05	331352	31.12
dNodu _{SA, corrigé} > 0 dTax > 0,85	162	tebuconazole	2.89	647209	3.9
		lambda-cyhalothrine	2.52	1078718	2.5

augmentation des ventes en 2018 et pas d'augmentation de la redevance en 2019 :		di flufénicanil	2.49	331894	-1.1
		cloquintocet-mexyl	1.92	204483	0
		phosphure d'aluminium	1.75	443775	0
dNodu _{SA, corrigé} > 0 dTax <= 0,85	89	mefenpyr-diethyl	1.56	534777	0
		fosetyl-aluminium	1.11	439825	0

pas d'augmentation des ventes en 2018 et augmentation de la redevance en 2019 :		propiconazole	1.34	-94199	31.12
		cyproconazole	1.02	-135600	8.9
		propyzamide	0.83	-219821	3.9
dNodu _{SA, corrigé} <= 0 dTax > 0,85	52	thiencarbazone-methyl	0.74	-188497	3.9
		tribenuron-methyle	0.62	-47379	31.12

pas d'augmentation des ventes en 2018 et pas d'augmentation de la redevance en 2019 :		chlormequat chlorure	1.43	-164149	0
		quinmerac	0.78	-178617	-1.1
		métaldehyde	0.69	-633199	0
dNodu _{SA, corrigé} <= 0 dTax <= 0,85	67	2,4-d	0.67	-19386	-1.1
		deltaméthrine	0.42	-2126	0

** Le Nodu_{SA} corrigé représente le Nodu_{SA} pour lequel ont été supprimés la tendance générale (cf. Matériels et méthodes). Le dNodu_{SA} corrigé représente l'augmentation des ventes en 2018 (Nodu_{SA} 2018 corrigé - Nodu_{SA} 2017 corrigé)

*** dTax l'augmentation de la taxe en 2019 (RPD 2019 - RPD 2018).

De manière générale, les résultats des analyses sur l'effet de la RPD sur l'achat anticipé de substances n'indiquent pas un impact ni très robuste, ni très fort. D'une part, on ne trouve pas toujours d'effet

d'anticipation selon les différentes analyses réalisées (tests Fisher ou modèles linéaires). D'autre part, on remarque de fortes variations de NODU pour les substances qui n'ont pas de changement de redevance ($dTax = 0$; **Fig. 2.2.4**) et une faible capacité explicative du modèle linéaire (1) ($R^2 = 0.0057$, **Tableau 2.2.1**). L'effet d'anticipation n'est donc pas à exclure mais son effet n'est probablement pas linéaire et reste cantonné à certaines substances (**Fig. 2.2.4**). Ces résultats semblent montrer, par ailleurs, que l'effet d'anticipation n'est pas en mesure d'expliquer la majeure partie des variations du NODU. Il nous faut donc considérer d'autres déterminants.

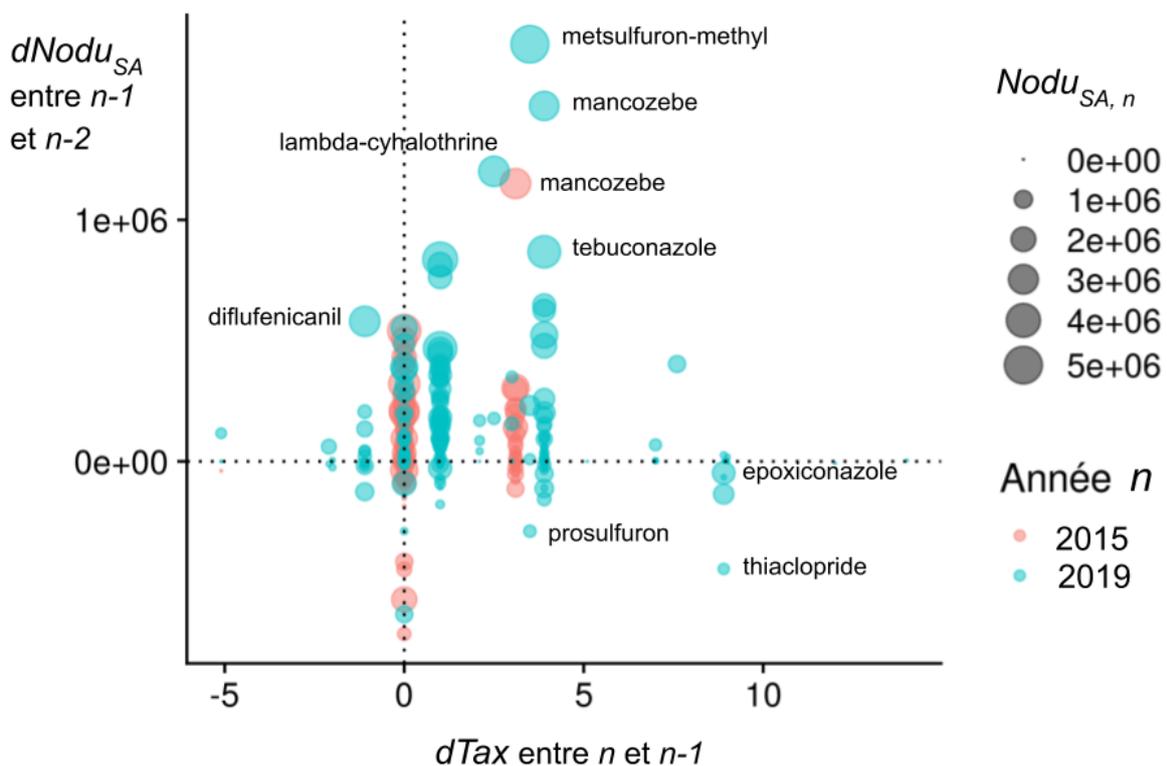


Figure 2.2.4: Différence de $Nodu_{SA}$ pour chaque substance en fonction de la variation de la RPD ($dTax$) de l'année suivante ($dNodu_{SA}$ entre $n-1$ et $n-2$ vs. $dTax$ entre n et $n-1$). Le $Nodu_{SA}$ de l'année n est représenté par l'aire des points. Dans ce graphe, seulement deux années d'augmentation sont considérées (éq. année $n = 2015$ et $n = 2019$) et représentées en rouge et turquoise, respectivement.

A noter que les substances actives sont présentes, en quantités variables, seules ou en association au sein d'un même produit commercial (AMM). Ceci vient nettement complexifier la lecture de l'augmentation de la RPD qui, de fait, se matérialise de façon variable sur le prix des différents produits commerciaux, eux-mêmes associés à des stratégies commerciales de la firme ou du distributeur (remise, etc.).

2.3. Effet de l'évolution des surfaces agricoles certifiées en Agriculture Biologique

2.3.1. Introduction

Ces dernières années, les surfaces agricoles certifiées en Agriculture Biologique (AB) ont fortement augmenté (+ 18.0 % entre 2008 et 2009 et + 13.6 % entre 2016 et 2017 ; **Fig. 2.3.1**). On constate également en parallèle une progression de la QSA du segment biocontrôle depuis 2009 (cf. **Partie 1 section 1.1.6**), qui traduit potentiellement, et en partie, une évolution des ventes de produits autorisés en Agriculture Biologique (AB). En effet, les produits de biocontrôle et autorisés en AB ont des critères de sélection en commun, même s'ils sont définis de manière indépendante (**Annexe B.2**). Dans cette analyse, nous nous sommes demandé si :

- 1) les produits autorisés en Agriculture Biologique étaient liés à des produits du segment biocontrôle (et biocontrôle EAJ) ainsi qu'à leur progression ces dernières années ?
- 2) les surfaces agricoles certifiées AB peuvent-elles expliquer les tendances observées pour les produits autorisés en Agriculture Biologique ?

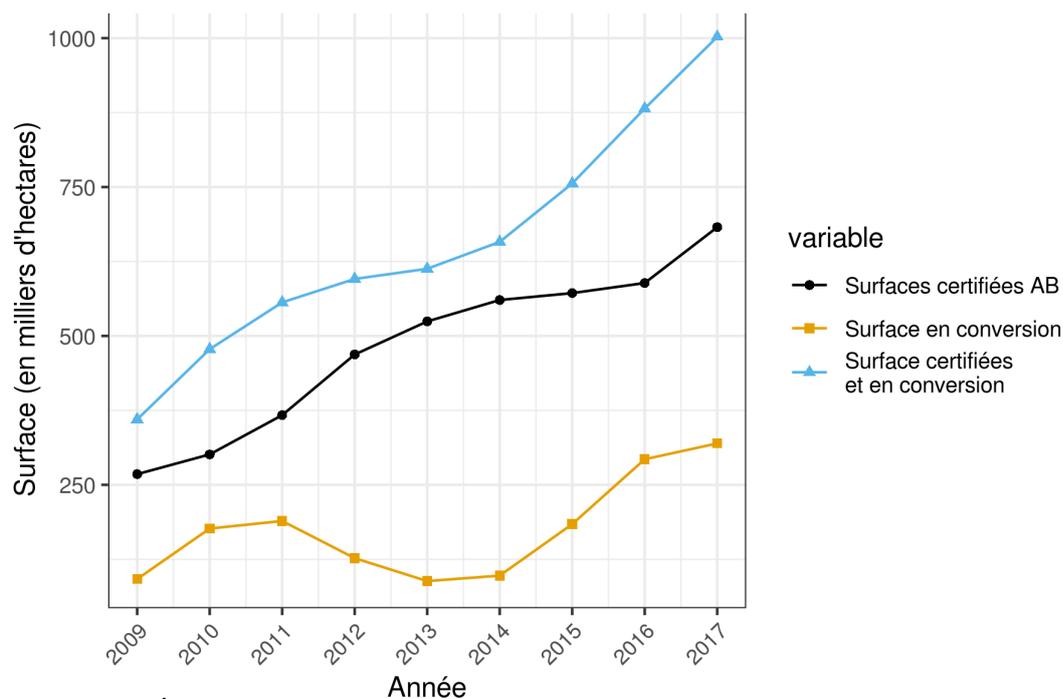


Figure 2.3.1: Évolution des surfaces agricoles certifiées en Agriculture Biologique entre 2009 et 2017 (source : Agence Bio ; cf. Matériels et méthodes).

2.3.2. Matériels et méthodes

Pour estimer les surfaces agricoles concernées par l'agriculture biologique (AB) nous avons utilisé des données de l'Agence Bio entre 2008 et 2017 au niveau départemental (données soumises au secret statistique). Ces données donnent accès au détail des surfaces par type de culture (cf. **Tableau 2.3.1**). Les Surfaces Toujours en Herbe (STH), sur lesquelles il ne devrait pas y avoir d'utilisation de produits phytosanitaires, ainsi que les surfaces labellisées "Autres" ont été exclues des analyses. Elles représentent respectivement 37.8 et 5.2 % des surfaces totales certifiées AB ou en conversion entre 2008 et 2017.

Tableau 2.3.1 : Définition des types de cultures selon les données de l'Agence Bio

Type de culture	Définition	Exemples
Céréales	Céréales et mélanges céréaliers avec ou sans légumineuses.	Blé dur, blé tendre, maïs doux, maïs grain, riz, orge, sarrasin, épeautre, seigle, sorgho, triticale...
Cultures fourragères	Prairies temporaires et autres cultures fourragères en excluant les surfaces toujours en herbe (Prairies permanentes, landes et parcours)	Prairie temporaire, betterave fourragère, choux fourrager, colza fourrager, luzerne, maïs fourrage, mélanges fourragers, ray-grass, trèfle...
Fruits	Fruits (arboriculture dont fruits à coques, fruits frais et fruits de transformation)	Pommes, poires, pêches, abricots, amandes, clémentines, châtaignes, figues, framboises, olives...
Légumes frais	Légumes frais y compris maraîchage sous serre ou de plein champ dont pomme de terre	Ail, betteraves rouges, carottes, céleris, choux, courges, endives, épinards, melons, pommes de terre (hors féculières), petits pois, tomates...
Légumes secs	Graines issues exclusivement de plantes de la famille des légumineuses	Pois chiches, lentilles...
Oléagineux	Plantes cultivées spécifiquement pour la production d'huile	Colza, lin non textile, soja, tournesol...
PPAM	Plantes à parfum aromatiques et médicinales	Aneth, basilic, calendula, coriandre, lavande, menthe...
Protéagineux	Plantes riches en protéines	Féverole, lupin, pois protéagineux.
Vigne	Viticulture (dont 4% de raisin de table au niveau national)	Raisin de cuve, raisin de table

Pour suivre l'évolution des substances autorisées en AB nous avons utilisé les données de la BNV-d Bilan de 2009 à 2017 et Registre de 2014 à 2017. Pour établir la liste des substances autorisées en AB, nous avons mobilisé une liste de produits autorisés en AB fournie par l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB) qui donne les AMM des produits. Par la suite, nous avons présenté des bilans au niveau des substances plutôt que des produits commerciaux.

Les quantités de substances actives vendues autorisées en AB ou appartenant aux segments biocontrôle (**Annexe B.2**) ont été suivies entre 2009 et 2017 au moyen de la BNV-d Registre. Pour la question 2, c'est-à-dire le lien avec les surfaces agricoles certifiées AB, nous avons considéré uniquement les produits autorisés en AB, hors produits amateurs (sans segment ZNAA et biocontrôle EAJ).

2.3.3. Résultats et discussion

On constate que la QSA du segment biocontrôle est en grande partie constituée de substances actives également autorisées en Agriculture Biologique (AB) (**Fig. 2.3.2a**), et que ces substances contribuent en grande partie à l'augmentation de la QSA biocontrôle entre 2009 et 2017. La QSA des produits autorisés en AB est également majoritairement issues du segment biocontrôle (non EAJ), c'est à dire des "agents ou produits agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures" (L.253-6 du CRPM) parmi lesquelles ont été retirés les substances présentant certains dangers pour la santé humaine et l'environnement.

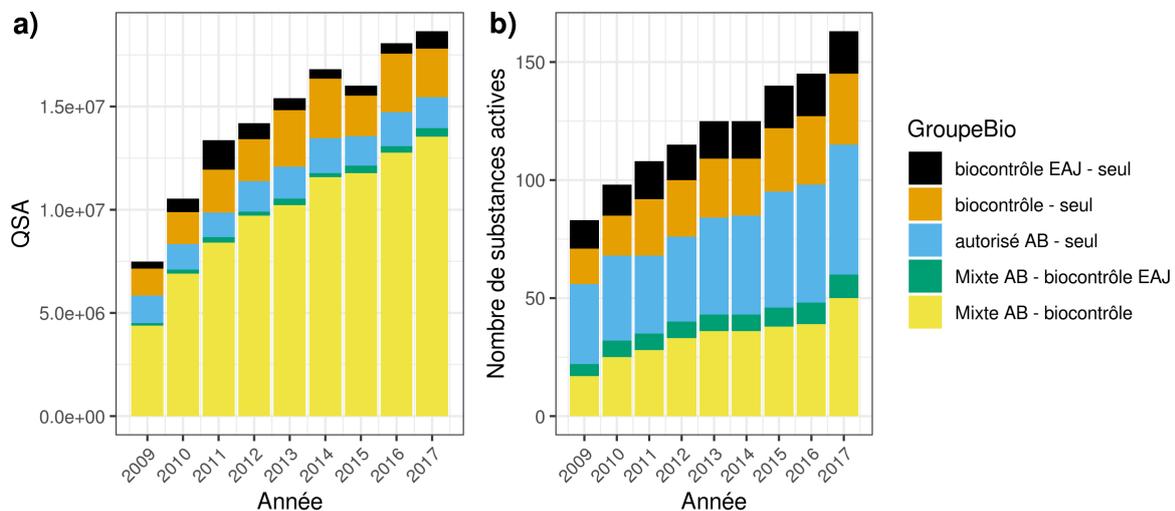


Figure 2.3.2 : a) QSA et b) nombre de substances actives autorisées en Agriculture Biologique (AB) et/ou associés aux segments biocontrôle et biocontrôle EAJ en fonction des années (BNV-d Registre).

On remarque, cependant, que bien que cela ne représente pas une part importante de QSA, il existe un nombre important de substances différentes qui sont soit autorisées en AB, soit appartiennent au segment biocontrôle (**Fig. 2.3.2b**). On note que le nombre de substances autorisées en AB, incluses ou non dans le segment biocontrôle, est également en progression sur la même période. On peut donc conclure que la progression de la QSA biocontrôle est bien associé à la progression de produits autorisés en AB et

inversement (Q1), mais qu'une partie de la dynamique des produits autorisés en AB, qui n'est pas visible avec la QSA, n'est pas nécessairement liée à celle du segment biocontrôle.

Conformément aux attentes, les quantités de substances actives autorisées en AB non amateur (QSA AB) sont très corrélées au niveau national avec les surfaces agricoles certifiées ou en cours de certification AB (SAU BIO²⁹) (Fig. 2.3.3a). L'augmentation de la SAU BIO est une explication robuste pour l'augmentation du volume de ventes des produits autorisés en AB (Q2). Les produits autorisés en AB et non amateurs peuvent, cependant, être aussi utilisés par des professionnels ou des agriculteurs sur des surfaces qui ne sont pas cultivées en AB. L'augmentation de la QSA AB peut donc également traduire un mouvement plus général de transition des systèmes vers des pratiques plus durables, et donc un usage moindre de produits phytosanitaires classiques. Pour approfondir cette question, on pourrait étudier à échelle plus fine le lien entre les quantités de produits autorisés en AB et les surfaces agricoles AB, les surfaces agricoles en conventionnel ou les surfaces non agricoles (voir approche similaire développée en section 2.4).

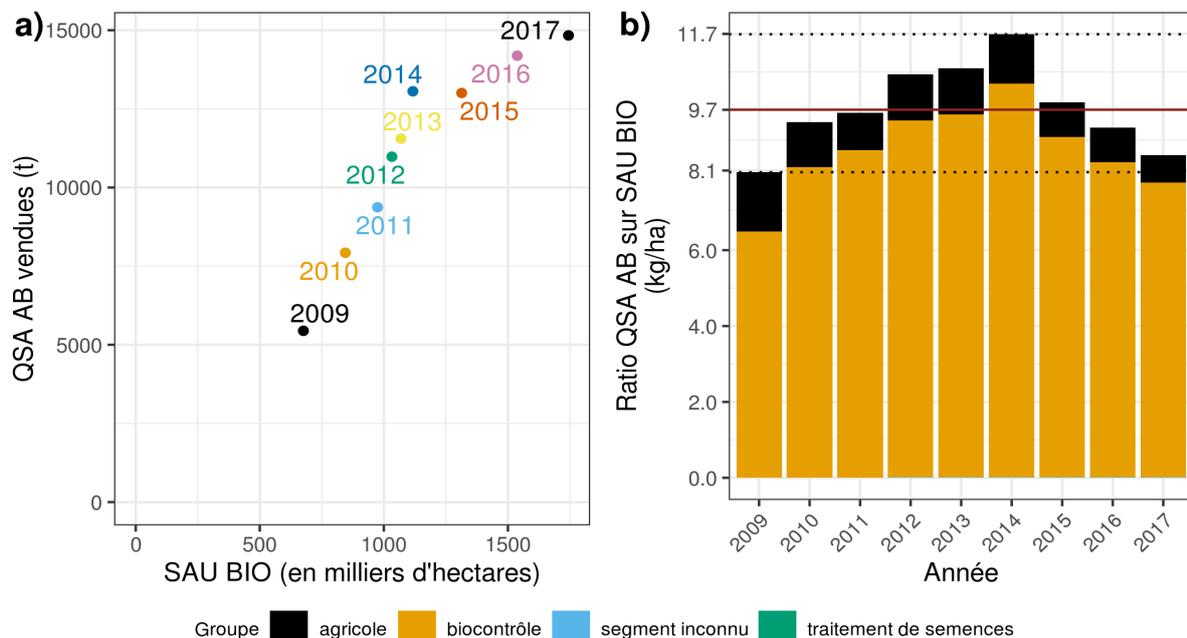


Figure 2.3.3 : a) Quantités de substances actives des produits autorisés en AB (QSA AB) en fonction des surfaces certifiées ou en cours de certification AB (SAU BIO en tonnes). b) Ratio des QSA AB sur la SAU BIO, selon les segments sur l'ensemble de la France entre 2008 et 2017. Les substances du groupe "amateur" ont été exclues. Quelques substances autorisées en AB sont classées dans le segment traitement de semence ou n'ont pas de segment (segment inconnu), mais représentent un volume tellement faible en QSA qu'on ne les voit pas.

²⁹ Hors surfaces toujours en herbe (STH)

Lorsque l'on rapporte les quantités de produits autorisés en AB aux surfaces BIO (QSA BIO / SAU BIO ; **Fig. 2.3.3b**), il apparaît une dynamique d'intensification entre 2009 (8.1 kg / ha) et 2014 (11.7 kg / ha), puis un retour en 2017 au niveau de 2009. Les corrélations entre QSA AB et SAU BIO ont également été explorées au niveau départemental avec la BNV-d Registre entre 2014 et 2017. Certains départements montrent bien cette corrélation mais ce n'est pas le cas pour tous (données non présentées). On peut noter que ces observations de ces dernières années et au niveau national ne vont pas dans le sens d'une intensification de l'utilisation de produits autorisés en agriculture AB. Cette dynamique et cette fluctuation sont, cependant, difficiles à appréhender. Elles pourraient autant être dues à un biais de déclaration, qu'à une dynamique d'adaptation des protections phytosanitaires au contexte des différentes années pour l'agriculture AB. Pour la première hypothèse, on sait notamment que les substances du segment biocontrôle, et donc à fortiori une majeure partie des produits autorisés en AB (en QSA), ne sont pas soumises à la RPD et donc par définition leur déclaration est plus aléatoire. La dernière hypothèse ne peut être appréhendée aisément car le suivi de pression de bioagresseurs, s'il est appréhendé, l'est de façon nettement moins structurée que pour les cultures conventionnelles non AB (réseau d'épidémiosurveillance).

Dans la **Fig. 2.3.4a**, on constate que les cultures fourragères représentent près de la moitié de la SAU BIO. Ces surfaces ne sont pas *a priori* les plus consommatrices de produits phytosanitaires. Les céréales, suivi de la vigne, représentent également une part importante. Globalement, les surfaces AB des différents types de cultures ont augmenté nettement depuis 2009, avec une stagnation entre 2011 et 2013, ce qui signifie que toutes ces surfaces participent à l'augmentation générale de la SAU BIO.

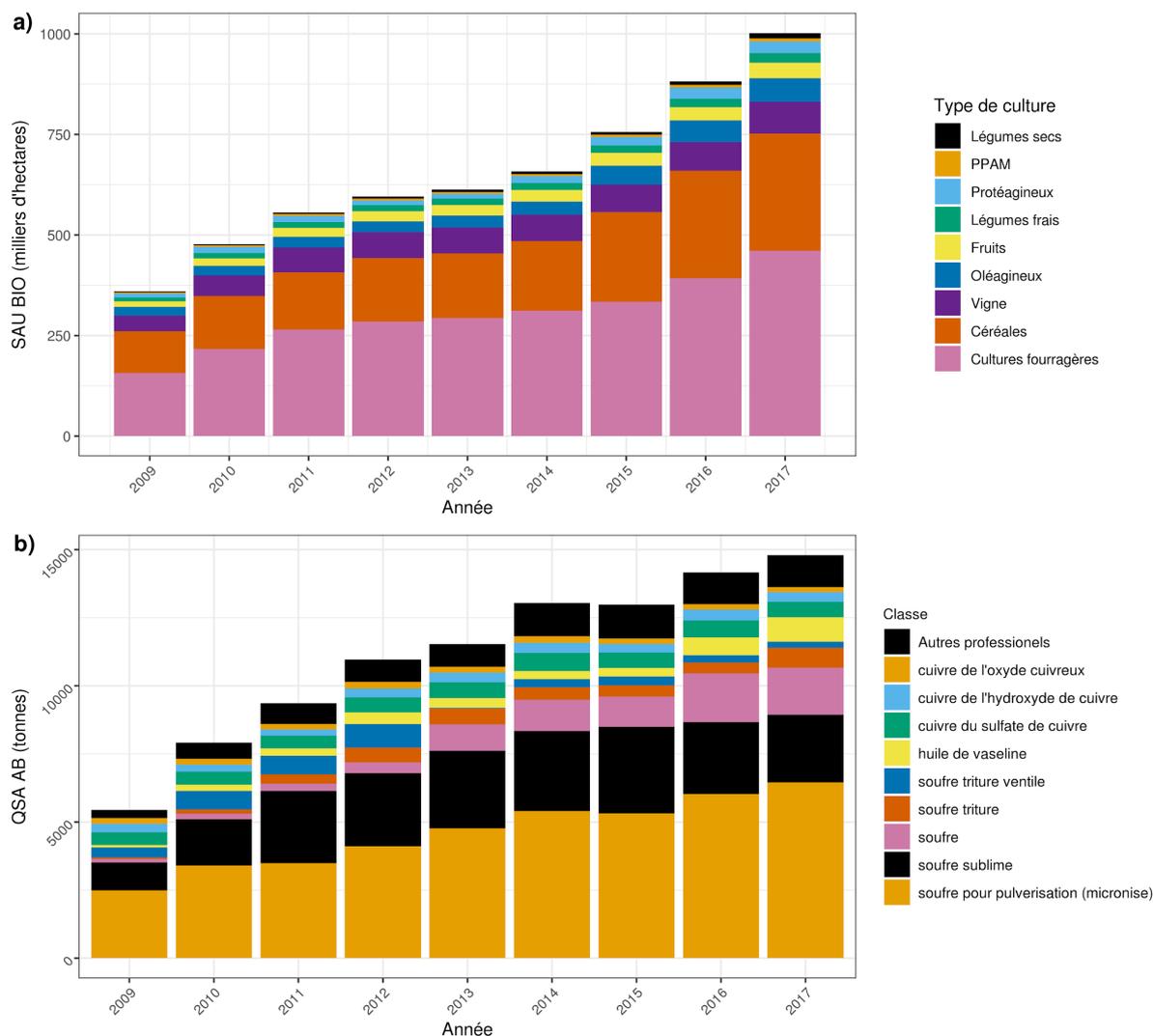


Figure 2.3.4: a) Évolution de la SAU BIO selon les différents types de cultures (milliers d'hectares). b) Part de QSA AB (tonnes) prise par les substances actives les plus contributives (substances actives appartenant au moins 1 année au top 5 de la QSA AB). Seules les substances du segment agricole et biocontrôle sont représentées.

La **Fig. 2.3.4b** nous montre la prépondérance du soufre dans les substances actives qui constituent la QSA AB (> 75%). Le soufre explique d'ailleurs la majeure partie de la tendance d'augmentation de la QSA AB avec un léger ralentissement de sa progression depuis 2014. Le soufre étant potentiellement utilisable sur la totalité des cultures dont la vigne et les grandes cultures, il est logique qu'il progresse en QSA à mesure de l'augmentation des surfaces. On remarque également des variations dans le type de soufre utilisé au cours du temps avec une diminution du soufre sublimé au profit du soufre. Le cuivre représente également une part non négligeable de la QSA mais cette part est de moins en moins importante à partir de 2014. Ces deux types de substances sont utilisées en quantités relativement

importantes (Exemple d'usages AB³⁰, soufre : 3.5-4.5 kg/ha et cuivre : 0.75-5 kg/ha), ce qui peut expliquer en partie la part importante qu'elles prennent dans la QSA AB. L'huile de vaseline représente également une part croissante de la QSA, tout particulièrement depuis 2016 (fonction : "Autres" et usage "traitement des parties aériennes – stade hivernant des ravageurs"³¹).

En définitive, il faut prendre avec précaution les valeurs des produits autorisés en AB, en particulier ceux de la liste biocontrôle comme les produits à base de soufre ou l'huile de vaseline, car ces derniers ne sont pas soumis à la RPD et leurs volumes transmis par les distributeurs sont donc soumis à moins de contrôle de la part de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (cf. **Partie 1 Section 1.2.4**). Il faut également rappeler que les substances efficaces à plus faible doses par rapport au soufre, au cuivre ou à l'huile de vaseline, comme les insecticides à base de BT (*Bacillus Thuringensis*), n'apparaissent pas dans ces bilans QSA. Nos conclusions ne peuvent donc être étendues à ces dernières sans faire d'analyses plus approfondies (au cas par cas, ou via le calcul d'une Dose Utile pour ces substances). Enfin, les substances autorisées en AB peuvent être utilisées également en agriculture conventionnelle, ce qui porte à potentiellement surestimer les quantités de substances utilisées réellement sur la SAU BIO.

³⁰ sur le site <https://ephy.anses.fr/>, usage autorisé en 2020 : soufre AMM 9000222 usage fongicides sur betterave ou blé, cuivre AMM 2200589 usage sur vigne fongicide ou bactériose (provisoire)

³¹ Fiche chambre d'agriculture de l'Occitanie "Huiles et adjuvants : comment s'y retrouver", p1/2, 30/10/2014. https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Productions_techniques/Sud_Arbo15_Huiles_Adjuvants_CRAO_0218.pdf

2.4. Effet de l'assolement et des bioagresseurs

2.4.1. Introduction

Les ventes de produits phytosanitaires à usages agricoles (Segment agricole - UA) enregistrées dans la BNV-d sont liées à l'utilisation de ces produits sur des cultures, à des fins de contrôle et de réduction des dégâts causés par les bioagresseurs des cultures. Les données de la BNV-d ne donnant pas d'informations sur leur utilisation réelle et les décalages existant entre les ventes et l'utilisation (cf. **Partie 1 section 1.3**, et **Partie 2 section 2.1 et 2.2**), on peut se demander dans quelle mesure la mise en parallèle des ventes de produits phytosanitaires avec des données quantifiant leur utilisation potentielle (surfaces des différentes cultures, pressions exercées par les différents bioagresseurs) peut permettre d'identifier les utilisations des ventes enregistrées et d'expliquer leurs évolutions dans le temps. Cette section présente une analyse préliminaire visant (i) à comprendre comment les ventes de produits phytosanitaires et leurs variations sont expliquées par les surfaces de cultures et la pression exercée par les bioagresseurs et (ii) à explorer la possibilité d'attribuer ces ventes à des cultures spécifiques, en particulier pour la construction d'un NODU par filière.

Plusieurs questions et sous-questions sont ainsi successivement posées :

- (1) Peut-on expliquer les ventes par les occupations du sol et les pressions de bioagresseurs ?
 - (1.1) Quelles caractéristiques des ventes (quantités d'AMM, quantités de substances actives, indicateurs totaux - NODU et QSA -, indicateurs NODU déclinés en fonctions - NODU par fonction -) les occupations du sol et les pressions de bioagresseurs permettent-elles d'expliquer ?
 - (1.2) Quelle part des ventes est expliquée par chaque occupation du sol et par les pressions de bioagresseurs prises en compte?
 - (1.3) Les occupations du sol et les pressions de bioagresseurs expliquent-elles les variations interannuelles des ventes ?

- (2) Les résultats issus de la modélisation peuvent-ils être interprétés comme des utilisations d'après les connaissances expertes sollicitées, notamment au sein du comité de suivi du projet AVI-NODU?
 - (2.1) Les résultats des modèles sur le NODU sont-ils en accord avec les valeurs d'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) calculées pour certaines cultures?
 - (2.2) Les variations prédites par les occupations du sol et les bioagresseurs traduisent-elles des utilisations, notamment pour les grandes catégories d'usages prévus pour les substances (fonction) ?
- (3) Dans quelle mesure cette approche de modélisation peut-elle être utilisée pour le suivi des utilisations de produits phytosanitaires?
 - (3.1) Les répartitions des ventes proposées par les modèles peuvent-elles permettre la construction d'indicateurs au niveau des filières (NODU Filière) ?
 - (3.2) Les modèles fournissent-ils d'autres sorties d'intérêt ?

2.4.2. Matériels et méthodes

L'analyse a été réalisée entre 2014 et 2017 à l'échelle des Petites Régions Agricoles (PRA) de France métropolitaine (hors Paris, la Corse et le département 92). Les PRA ont été définies à partir de 1946 pour caractériser des zones relativement homogènes en termes de conditions pédoclimatiques et de systèmes de production agricole.

Démarche générale de compréhension de l'évolution des ventes

Unités d'agrégation de la BNV-d

Les produits phytosanitaires utilisés en agriculture sont très nombreux et incluent une large gamme de substances actives, éventuellement associées en différentes quantités constituant les produits (AMM), chacun ayant des usages autorisés plus ou moins spécifiques en termes de cultures et de cibles (bioagresseurs). Les possibilités d'utilisation de ces produits varient dans le temps : au cours de la période étudiée, certains produits ou substances actives sont autorisés ou interdits (**section 2.1**) ou voient leur taxation évoluer (**section 2.2**), ce qui peut conduire éventuellement à des substitutions d'usages par d'autres produits (**section 2.1.5**). Afin d'approcher la complexité de l'évolution des ventes de ces produits, nous avons cherché à expliquer séparément les différents compartiments qui représentent différentes unités d'agrégation de ces ventes :

- les quantités vendues par AMM (Q_{AMM}),
- les quantités vendues par substance active (Q_{SA}), calculées comme la somme des quantités d'une substance dans l'ensemble des AMM (chaque SA est le plus souvent présente dans plusieurs AMM)
- les indicateurs NODU déclinés par fonction, appelés NODU par fonction ou NODUf,
- les indicateurs totaux NODU et QSA à différentes échelles spatiales.

La déclinaison du NODU en fonctions (herbicide, fongicide, insecticide, voir paragraphe suivant), permet une première approche de la diversité des utilisations de produits phytosanitaires, plus fine que le NODU ou la QSA totale et prenant en compte des éventuels phénomènes de substitutions mentionnés précédemment.

Bien que les AMM soient parfois composées de plusieurs substances actives, elles sont beaucoup plus nombreuses que les substances actives. On considère donc que les AMM représentent la plus petite unité d'agrégation de la BNV-d, suivi des substances actives, des NODU par fonction et des indicateurs totaux.

Approche globale et Mobilisation d'exemples

L'analyse des résultats sur les AMM et les substances actives (performance du modèle et effet des variables) a été réalisée de manière globale, en donnant plus d'importance aux AMM et substances les plus contributives du NODU.

Dans un but pédagogique et de vérification de nos résultats, nous avons regardé dans le détail les résultats d'une sélection de substances actives, choisies pour leur importance en termes de NODU et leurs différences d'utilisations (fonction, usages) (**Tableau 2.4.1**). Le détail des usages autorisés (source : *ephy.anses.fr*³²) pour chaque substance est mentionné au début du paragraphe présentant les résultats pour la substance (**section 2.4.3 "Exemples de substances actives"**).

Tableau 2.4.1 : Caractéristiques des substances actives sélectionnées comme exemple.

Substance active	Fonction	Type d'usages	% de NODU	% de QSA	% de NODU par fonction	% de QSA par fonction
Chlorothalonil	Fongicides	spécifique	1.97	3.6	5.64	9.61
Cyperméthrine	Insecticides	générique	3.64	0.23	37.66	18.58
Glyphosate	Herbicides	générique	3.29	15.84	7.53	30.87
Soufre	Fongicides	spécifique	0.02	0.35	0.05	0.94

** Les % de NODU et de QSA sont calculés par rapport au NODU ou à la QSA totaux ou par fonction entre 2014 et 2017 sur le segment agricole - UA (hors AMM stockage)*

Ventes de produits phytosanitaires

Les données de ventes de produits phytosanitaires mobilisées sont issues du segment "agricole - UA" (usages strictement agricoles) de la BNV-d Registre, auxquels on a retiré l'ensemble des AMM qui ont au moins un usage prévu pour le stockage des récoltes (cf. **Partie 1 section 1.1.3**). Notons que la suppression de ces insecticides de stockage a fait une différence majeure pour expliquer les ventes

³² consulté en novembre 2020

d'insecticides tels que nous les décrivons ci-après. On dispose ainsi des quantités de 2001³³ produits (AMM) dans leur unité de conditionnement (kg ou L) et des quantités de 314 substances actives³⁴ associées (converties en kg) entre les années 2014 et 2017. Ces quantités fournies au niveau des codes postaux ont été agglomérées au niveau des PRA au moyen d'une méthode décrite en **Annexe D**. Les données habituellement mobilisées par l'équipe et immédiatement disponibles étaient centrées sur la France métropolitaine. Nous nous sommes concentrés dans cette étude exploratoire sur les départements métropolitains (Bnvd Registre incomplète pour les DOM/TOM ; cf. **Partie 1 section 1.2.4**) à l'exclusion de la Corse mais aussi de Paris et du département des Hauts-de-Seine (92) qui ne sont pas agricoles. Les quantités vendues dans ces entités administratives ont donc été écartées.

Comme dans les sections précédentes, les ventes ont été considérées comme nulles dans les PRAs ne présentant pas dans la BNV-d de ventes d'un produit (AMM) ou d'une substance (SA). Afin d'éviter les différents biais associés à la période d'autorisation des AMM et des substances actives (cf. **section 2.1.3**), nous avons retiré, pour chaque AMM ou substance active, 1) les années où les AMM ou les substances actives ne sont pas autorisées (inférieure à l'année d'autorisation, supérieure à l'année d'interdiction) et 2) une année supplémentaire à proximité directe de ces années de transition (année suivant l'autorisation et année précédant l'interdiction). Cette dernière opération vise à limiter l'effet des dynamiques de marché croissantes et décroissantes identifiées, respectivement, pour l'année suivant une autorisation et l'année précédant une interdiction (cf. **section 2.1.3**). Un certain nombre d'AMM et de substances sont ainsi retirées des analyses ou voient réduire leur nombre d'années prises en compte dans l'analyse (**Tableau 2.4.2**). On note qu'une plus grande proportion d'AMM est affectée (non sélectionnées ou sélectionnées avec un nombre réduit d'années) par rapport aux substances actives (**Tableau 2.4.2**).

Tableau 2.4.2 : Nombre et proportion (en %) d'AMM ou de substances actives sélectionnées pour les analyses et selon le nombre d'années.

Unités	Total (1)	Fonctions choisies (2)	Modélisées (3)	Avec 1 années	Avec 2 années	Avec 3 années	Avec 4 années
--------	-----------	------------------------	----------------	---------------	---------------	---------------	---------------

³³ 2026 AMM dont 25 ne présentent que des valeurs nulles sur la période étudiée

³⁴ Dans cette section, nous n'avons pas mobilisé les n° CAS, seulement le nom des substances enregistrées dans la BNV-d.

AMM	2001	-	1367 (68.32%)	142 (7.1%)	218 (10.89%)	131 (6.55%)	876 (43.78%)
SA	372	294	272 (86.62%)	5 (1.59%)	7 (2.23%)	2 (0.64%)	258 (82.17%)

(1) Total des unités présentes dans la BNV-d Registre agricole - UA (non stockage) pour la période 2014-2017

(2) Substances appartenant aux herbicides, fongicides, insecticides (non stockage) et substances de croissance

(3) Sélectionnée pour la modélisation (autorisées au moins une année pendant la période 2015-2016 : élimine l'année avant interdiction et après autorisation)

Au contraire des calculs par substance ou par AMM, le calcul des indicateurs NODU et QSA (totaux ou par fonction) a été fait sur les 706 PRA sélectionnées et pour l'ensemble des substances actives (segment agricole - UA, hors AMM de stockage) sans prendre en compte leur période d'autorisation. En effet, ces indicateurs, en particulier le NODU, sont des mesure de la tendance globale d'utilisation, indépendamment des interdictions ou autorisations d'AMM ou de substances.

Fonction des substances

Les fonctions des substances ont été déterminées à partir d'une table fournie par le MTE (**Annexe B.4**).

Un certain nombre de substances ont des usages homologués pour plusieurs fonctions. Dans cette étude chaque substance avec plusieurs fonctions a été attribuée à une fonction principale, établie par des personnes ressources (**Annexe B.4**).

Dans la **Fig. 2.4.1** on peut constater la part prise par chacune des fonctions en termes de NODU ou de QSA, ainsi que l'évolution de cette part dans le temps. La majeure partie du NODU et de la QSA est issue de substances qui sont des herbicides ou des fongicides. La part des insecticides est nettement plus importante en NODU qu'en QSA. Au contraire, la part des substances de croissance est plus importante en QSA qu'en NODU.

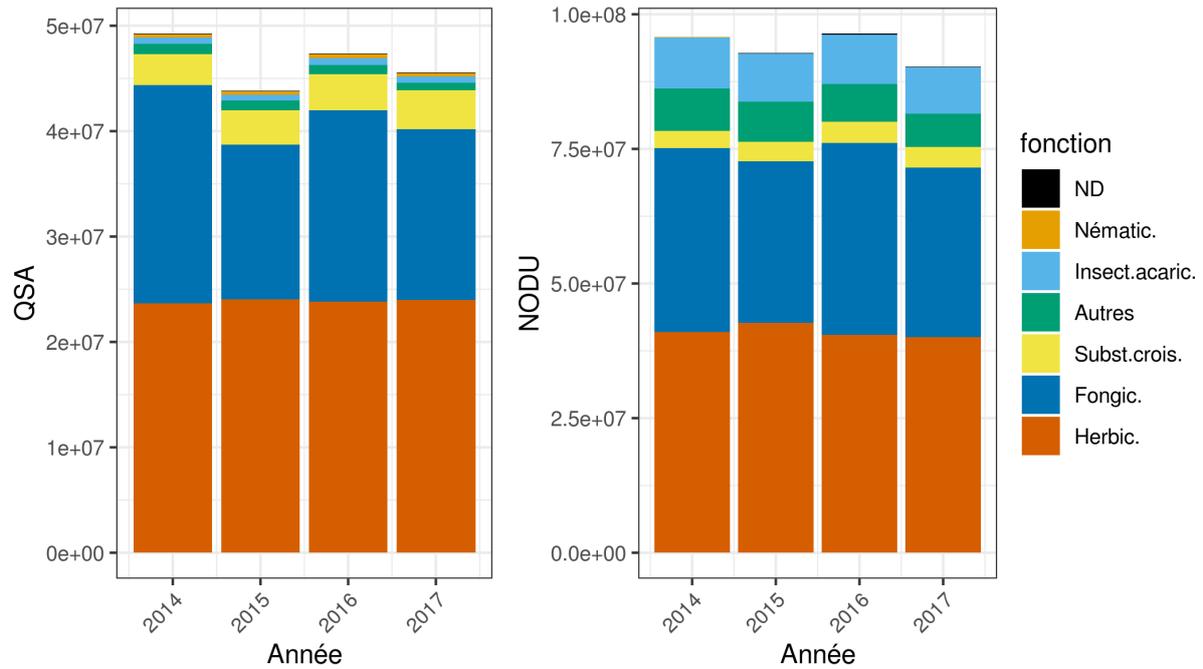


Figure 2.4.1 : Évolution des indicateurs du segment agricole - UA (non stockage) (QSA et NODU) selon les années et les fonctions attribuées aux substances qui les composent. La fonction "Autres" regroupe les molluscicides, les rodenticides et les activateurs végétaux. L'ensemble des substances n'ayant pas de fonctions attribuées dans la base de données portent la mention non déterminé (ND).

Pour cette analyse, nous avons choisi de nous concentrer sur les fonctions les plus importantes, herbicides, fongicides, insecticides et substances de croissance. Pour ces fonctions, le comité de pilotage a vérifié que les 15 substances les plus importantes en termes de NODU semblaient cohérentes (**Fig. 2.4.2**). Les regroupements sans fonctions (ND) et classées "Autres" étaient composées de substances ayant des usages trop hétéroclites, alors que les nématicides étaient constitués d'un très petit nombre de substances (3) représentant très peu de QSA ou de NODU (0.007 %).

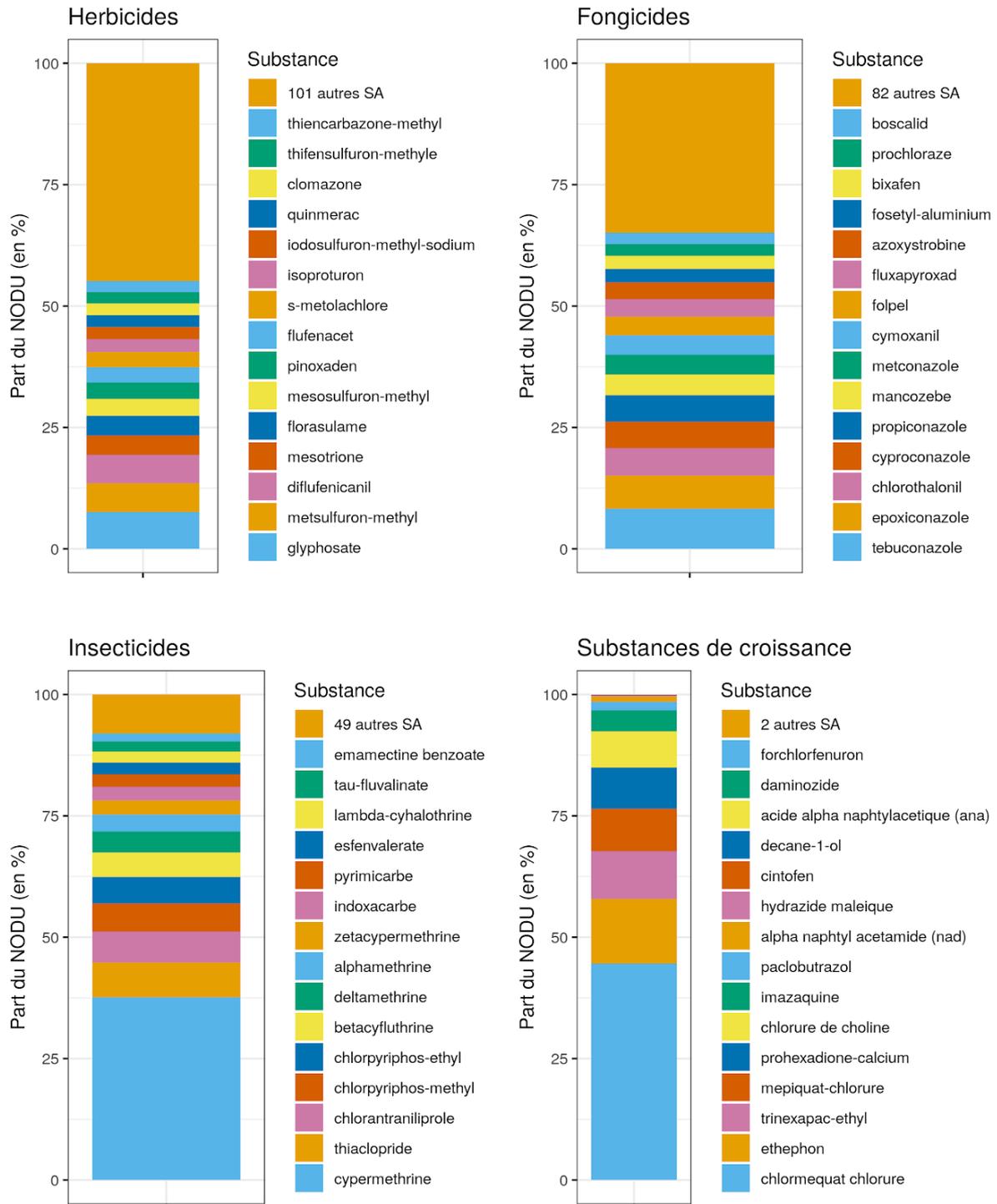


Figure 2.4.2 : Composition des NODU par fonction (agricole - UA, non stockage) : parts des NODU par fonction prises par les 15 substances actives les plus contributives.

Occupations des sols

Les occupations du sol, agricoles et non agricoles (zna - surfaces non agricoles, mais en lien avec l'usage de produits phytos) des PRA, c'est-à-dire les surfaces (en hectares) de chaque occupation attribuées à chaque PRA en France métropolitaine entre 2014 et 2017, ont été déterminées par la reconstruction d'une carte des occupations du sol à partir du Registre Parcellaire Graphique et d'une cartographie de 2014 plus complète réalisé par l'US-ODR (ODR 2014). Chaque occupation du sol possède une source de données distincte (**Tableau 2.4.3**).

Tableau 2.4.3 : Source de données pour chaque occupation du sol mobilisée dans l'analyse.

Occupations du sol	Source
arboriculture	ODR 2014
autres légumes fleurs	ODR 2014
estives et landes	ODR 2014
vignes	ODR 2014
snf	ODR 2014
zna non pro *	ODR 2014
zna pro *	ODR 2014
autres céréales	RPG
autres oléagineux	RPG
betteraves sucrières	RPG
blé tendre	RPG
canne sucre	RPG
colza	RPG
semences	RPG
divers	RPG
fouillage	RPG
gel	RPG
légumineuse grains	RPG
maïs grain et ensilage	RPG
orge	RPG
plante à fibre	RPG
pommes de terres de plein champs	RPG
prairies temporaires	RPG
protéagineux	RPG
riz	RPG
tournesol	RPG

* “pro” pour professionnel.

Les surfaces des occupations du sol issues du RPG varient d’une année à l’autre alors que celles de l’ODR 2014 sont identiques pour toutes les années (voir méthodologie détaillée **Annexe B.9**). Un certain nombre d’approximations ont été effectuées pour certaines occupations du sol comme la pomme de terre de plein champs ou la betterave sucrière. Leurs surfaces ont été globalement assimilées respectivement aux groupes cultures “légumes et fleurs” (25) et “autres cultures industrielles” (24), (voir discussions **Annexe B.9**).

Pressions de bioagresseurs

Nous avons estimé la pression exercée par les bioagresseurs à partir d’observations pluriannuelles de la pression de divers bioagresseurs sur plusieurs grandes cultures dans toute la France. Ces observations sous contrat, sont centralisées depuis 2008 par les services épidémiologiques agricoles de l’État français, permettant l’élaboration du Bulletin de Santé du Végétal. Tous les ans, différentes parcelles de chaque culture sont sélectionnées, géoréférencées puis visitées chaque semaine afin d’estimer l’abondance en bioagresseurs. Un suivi de plusieurs bioagresseurs est ainsi réalisé sur l’ensemble du territoire par plusieurs instituts en suivant des protocoles décrits au niveau national. Nous avons mobilisé plus spécifiquement les données de 2014 à 2017 produites par le système Vigicultures[®], développé par l’organisme français ARVALIS - Institut du végétal et qui centralise la majeure partie de ces observations³⁵. Depuis 2015, les données de l’ensemble des instituts de suivi sont centralisées dans une unique base de données par le Système d’information de l’épidémiosurveillance (Epiphyt). Cette base inclut le suivi d’un plus grand nombre de départements et de bioagresseurs que les données Vigicultures[®]. Cependant, nous n’avons pas pu la mobiliser, d’une part parce que l’année 2014 n’y est pas bien prise en compte et d’autre part, parce que nous avons été confrontés à de nombreuses difficultés techniques pour faire correspondre les mesures Vigicultures aux mesures dans Epiphyt. Ces difficultés ne sont pas insurmontables mais demanderaient 2 mois de travail à temps plein pour harmoniser les bases. Avec les données de Vigicultures[®], nous avons pu suivre l’abondance de 25 espèces de

³⁵ Données obtenues sur le site http://www.vigicultures.fr/w_fix_liste.php

bioagresseurs différents (maladies ou ravageurs) qui sont les bioagresseurs les plus importants en grandes cultures : 12 espèces sur blé tendre d'hiver, 9 espèces sur colza, deux sur orge d'hiver, une sur pomme de terre et une sur maïs (**Tableau 2.4.4**).

Tableau 2.4.4 : Liste des bioagresseurs et des métriques issues de Vigicultures® et mobilisés dans l'analyse

Culture (occupation du sol correspondante)	Bioagresseurs (contraction)	Nom Latin	Période d'observation	Métriques mobilisées
Blé tendre d'hiver (blé tendre)	Septoriose	<i>Septoria tritici</i>	mars - juin	% de feuilles F3 affectées
	Rouille brune	<i>Puccinia triticina</i>	mars - juin	% de feuilles F3 affectées
	Rouille jaune	<i>Puccinia striiformis</i>	mars - juin	% de feuilles F3 affectées
	Fusariose	<i>Fusarium graminearum</i>	mars - juin	% de la base de la tige affectées
	Helminthosporiose	<i>Helminthosporium</i>	mars - juin	% de feuilles F3 affectées
	Oïdium	<i>Blumeria graminis</i>	février - juin	% de feuilles F3 affectées
	Piétin échaudage	<i>Gaeumannomyces graminis</i>	mars - juin	% de pieds affectées
	Piétin verse	<i>Oculimacula spp</i>	mars - juin	% de pieds affectées
	Cécidomyie orange (cécidomyie)	<i>Sitodiplosis mosellana</i>	mars -juin	Nombre capturé par cuvette jaune
	Limaces	<i>Deroceras/Arion/Limax</i>	octobre - mars	% de plantules attaquées
	Puceron d'automne	<i>Rhopalosiphum padi</i>	octobre - mars	% de feuilles affectées
	Puceron épis	<i>Sitobion avenae</i>	mai - juin	% de feuilles affectées
	Colza	Phoma	<i>Leptosphaeria maculans</i>	février - juin
Sclérotinia		<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	mars - mai	% de fleurs polluées
Grosse altise (altise_g)		<i>Psylliodes chrysocephala</i>	septembre - novembre	Nombre capturé par piège enterré
Petite altise (altise_p)		<i>Phyllotreta nemorum</i>	septembre - novembre	Nombre capturé par cuvette jaune
Puceron cendré		<i>Brevicoryne brassicae</i>	février - juin	Nombre de colonies par m ² en parcelle
Charançons tige du colza (charanconTige)		<i>Ceutorhynchus napi</i>	février - avril	Nombre capturé par cuvette jaune
Charançon du bourgeon terminal (charanconBT)		<i>Ceutorhynchus pictarsis</i>	septembre - novembre	Nombre capturé par cuvette jaune
Charançon des siliques (charanconSil)		<i>Ceutorhynchus assimilis</i>	mars - juin	Nombre moyen par plante (en parcelle)
Méligèthe	<i>Meligethes aeneus</i>	février - mai	% de plantes (en parcelle) avec présence	

Orge d'hiver (orge)	Helminthosporiose	<i>Helminthosporium</i>	février - juin	% de feuilles F3 affectées
	Rhynchosporiose	<i>Rhynchosporium secalis</i>	mars - juin	% de feuilles F3 affectées
Pomme de terres (pommes de terres de plein champs)	Mildiou	<i>Phytophthora infestans</i>	mai - septembre	Gradient d'attaque de la parcelle de 1 à 10
Maïs (maïs grains et ensilage)	Pyrale du maïs (pyrale)	<i>Ostrinia nubilalis</i>	mai - septembre	Nombre capturé par piège à phéromone

La pression en bioagresseurs par année et par Petite Région Agricole (PRA) a été estimée à partir des données d'observations ponctuelles d'abondance de bioagresseurs dans plusieurs parcelles réparties en France métropolitaine en suivant la procédure décrite pour la septoriose sur blé dans la **Fig. 2.4.3**.

Plusieurs protocoles de mesures d'abondance en bioagresseurs ayant été réalisés, chacun reposant sur une métrique spécifique, c'est la métrique la plus fréquemment utilisée pour chaque bioagresseur d'une culture donnée qui a été sélectionnée (**Tableau 2.4.4, Fig. 2.4.3**). Pour chaque bioagresseur d'une culture et chaque année (janvier à décembre), nous avons estimé l'intensité de l'attaque sur chaque parcelle (*N_{di}* ; **Fig. 2.4.3**) en calculant le nombre d'observations excédant un seuil d'abondance médian (*Seuil médian* ; **Fig. 2.4.3**), défini pour chaque métrique comme étant la médiane des valeurs obtenues sur l'ensemble de la France et de la période d'observation pour le Bulletin de Santé du Végétal (2008 à 2017).

Les observations n'étant pas assez nombreuses pour faire des estimations directement au niveau des PRA, nous avons estimé la pression annuelle de chaque bioagresseur au niveau départemental par la proportion d'observations dans ce département et sur une année dépassant le seuil d'abondance médian (*P_{dept}* ; Etape 1 **Fig. 2.4.3**). La pression départementale estimée de chaque bioagresseur a été ensuite utilisée pour chaque PRA du département (voir Étape 2 ; **Fig. 2.4.3**), en multipliant la proportion *P_{dept}* par la surface d'occupation du sol de la PRA (voir paragraphe précédent) correspondant à la culture attaquée par le bioagresseur concerné (voir libellé entre parenthèse **Tableau 2.4.4**). Les pressions estimées pour chaque bioagresseur sur chaque PRA sont donc homogènes à des hectares et peuvent être interprétées comme des surfaces attaquées par les bioagresseurs. Il convient néanmoins de rappeler que ces surfaces sont des estimations des pressions en bioagresseurs en termes à la fois de **surfaces attaquées** dans les PRA et de **persistance de l'attaque** dans ces surfaces sur la période de suivi.

Pour certains départements et certaines années de la période étudiée, aucune observation n'était réalisée pour certains bioagresseurs, principalement parce que ce n'est pas le système Vigicultures[®] qui enregistrait le suivi dans ces régions (Alsace, Bretagne, Limousin et Pays de la Loire). Quand la pression départementale *Pdept* manquait pour un bioagresseur, nous avons sélectionné la valeur de pression départementale du département le plus proche³⁶ pour la même année. Cette approximation permet, à défaut d'une précision spatiale plus importante, de prendre en compte des variations interannuelles de pressions en bioagresseurs.

³⁶ distance entre les centroïdes des polygones représentant chaque département.

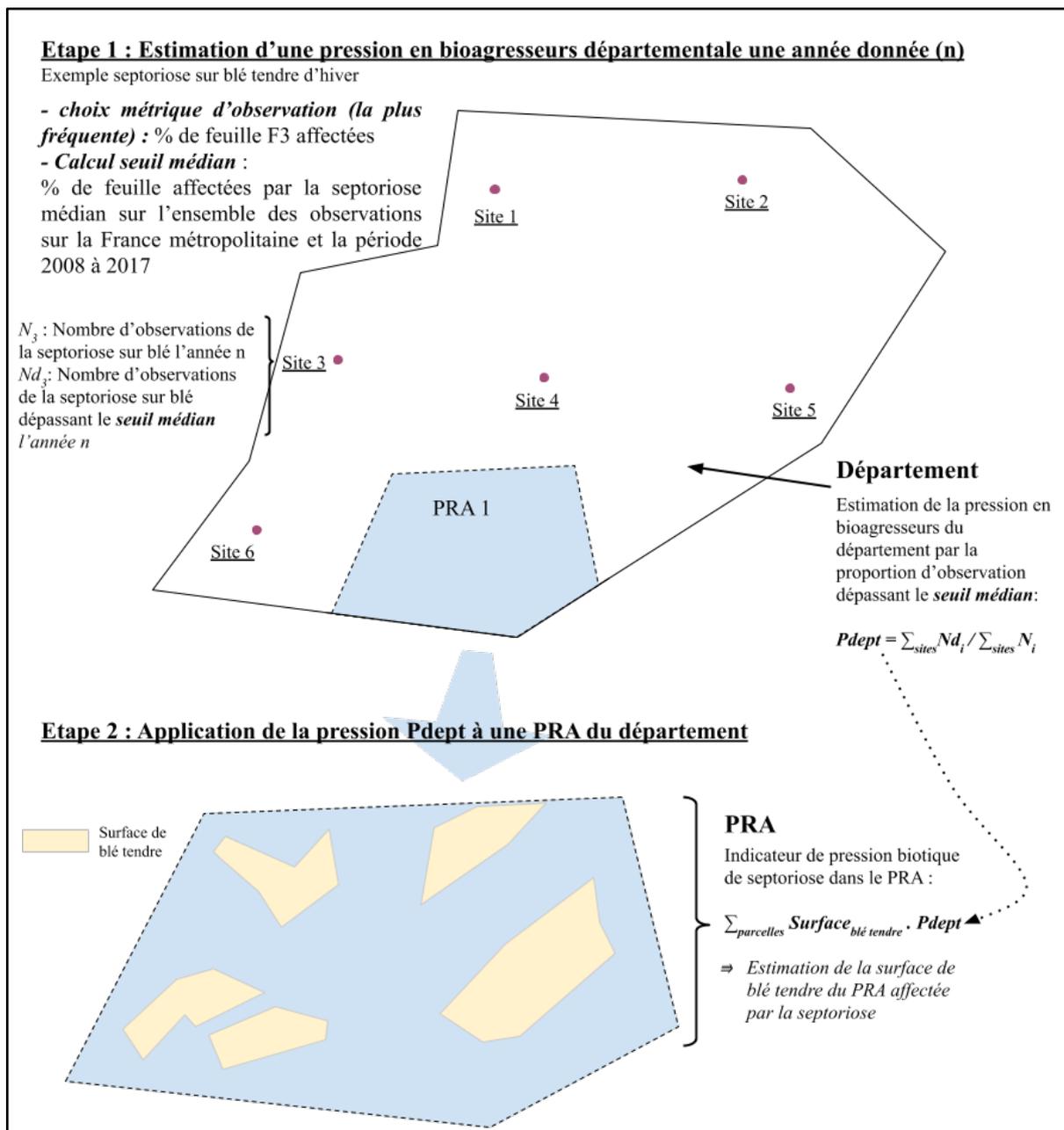


Fig. 2.4.3 : Schéma explicatif de l'estimation d'une pression de bioagresseurs au niveau de chaque PRA à partir des observations ponctuelles rapportées dans Vigicultures®

*Analyses statistiques*Modèles de régression linéaire pénalisés de type LASSO

Nous avons utilisé des modèles de régression linéaire pénalisée de type LASSO pour déterminer et quantifier dans quelle mesure les ventes pouvaient être expliquées par les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs. La technique du LASSO³⁷ est une méthode de contraction (*shrinkage*) des coefficients de la régression proposée par Robert Tibshirani (1996) qui a reçu un intérêt grandissant ces dernières années (Tibshirani, 2011). Cette méthode repose sur l'ajout d'un terme de pénalisation (pondéré par un paramètre λ) à un modèle linéaire multivarié classique, qui minimise la valeur absolue des coefficients des variables explicatives. En procédant simultanément à cette pénalisation et à une minimisation des erreurs d'estimation (mesure classique des moindres carrés) par validation croisée (on estime le modèle sur une partie du jeu de données puis on teste l'erreur sur l'autre partie), le modèle LASSO identifie le terme de pénalisation λ pertinent. Ainsi, il sélectionne les variables suffisamment importantes pour améliorer la prédiction et retourne le modèle correspondant. On obtient ainsi un coefficient par variable explicative initialement mise dans le modèle, qui prend la valeur zéro quand la variable n'est pas sélectionnée et une valeur non nulle sinon. Cette propriété permet à ces modèles de gérer un grand nombre de variables explicatives en faisant ressortir les corrélations les plus importantes.

Pour chaque modèle testé dans cette analyse, nous avons réalisé la procédure de validation croisée pour 10 échantillonnages des données afin d'automatiser le choix du niveau de sélection des variables ou, autrement dit, le niveau de pénalisation réalisée (choix du paramètre λ). Comme cela est fait classiquement pour les modèles LASSO, nous avons utilisé la règle "d'une erreur standard"³⁸ pour sélectionner le meilleur modèle (Friedman et al., 2010). Cette règle prend en compte le fait que les erreurs de prédiction des modèles sont elles-mêmes estimées avec des erreurs et fait un choix de la parcimonie (Hastie et al., 2009). Elle permet ainsi de réduire le surajustement des variables, phénomène qui survient souvent quand on a beaucoup de variables explicatives.

³⁷ Least Absolute Shrinkage and Selection Operator

³⁸ "one-standard-error", dont le λ choisi est nommé "lambda.1se" dans le package *glmnet*. Cette règle admet un modèle plus simple que le modèle avec l'erreur la plus faible, tant que son erreur est inférieure à l'erreur la plus faible plus un écart-type théorique de cette erreur.

Variables à expliquer et variables explicatives testés

Nous avons réalisé un modèle LASSO (avec procédure de validation croisée) pour chaque variable à expliquer et chaque combinaison de variables explicatives.

Les variables à expliquer choisies dans cette analyse pour représenter les ventes sont les différentes unités d'agrégation de la BNV-d (cf. **section Unités d'agrégation de la BNV-d**), c'est-à-dire les différents AMM, substances actives et indicateurs, soit 1645 variables à expliquer (**Tableau 2.4.5**).

Tableau 2.4.5 : Liste des modèles testés dans cette analyse.

Variables à expliquer	Nombre de modèle	Variables explicatives	Ecriture simplifiée	Nombre de colonnes	Nombre de lignes
Qamm	1367 AMM	{S_blé tendre + S_colza + ... + S_vignes}	~ OS	26	706 à 2824
Qsa	272 SA	{S_blé tendre + S_colza + ... + S_vignes} + {S_septoriose + S_oïdium + ... + S_phoma}	~ OS + BA	51	
NODUf	4 fonctions				
QSA (total par PRA)	1	{S_blé tendre + S_colza + ... + S_vignes} + {S_septoriose + S_oïdium + ... + S_phoma} + {PRA1 + PRA2 + ... + PRA706}	~ OS + BA + PRA	757	
NODU (total par PRA)	1				

gras: La combinaison de variables explicatives de références est représentée en gras.
S_xxxx : Surface d'une occupation du sol (ex: S_blé tendre) ou de culture attaquée (ex: S_septoriose : Surface de blé x % d'observation de septoriose au dessus de la médiane nationale inter-année)

Trois différents types de variables explicatives ont été testées (**Tableau 2.4.5**) : deux types de variables quantitatives incluant l'ensemble des surfaces d'occupations du sol (notés OS) et l'ensemble des pressions en bioagresseurs (notés BA) considérées (cf. **section Occupations des sols et Pressions de bioagresseurs**), ainsi qu'une variable qualitative identifiant les différentes PRA (notée PRA). Les variables quantitatives visent à répondre à la question principale (1), à savoir si on peut expliquer les ventes par les OS et les BA. À l'issue de la modélisation LASSO, on obtient pour chaque variable à expliquer, un coefficient par variable explicative quantitative. Ces coefficients représentent l'attribution des ventes (L, kg ou NODU) à des surfaces d'occupations ou des surfaces attaquées par des

bioagresseurs et s'expriment donc en L, kg ou NODU³⁹/ha (et correspondent effectivement à des doses, voir paragraphe suivant “contraintes sur les estimations des modèles LASSO”). La variable qualitative PRA vise à prendre en compte des effets locaux stables dans le temps, liés à des phénomènes qui ne sont pas pris en compte dans le modèle (ex : différences de système de production, de prescriptions des conseillers sur l’usage de produits phytosanitaires, de valorisation des productions agricoles, etc...) et qui peuvent masquer les effets des autres variables OS et BA. Elle se traduit par l’estimation d’un coefficient par PRA en L, kg ou NODU.

Trois combinaisons différentes de ces variables explicatives ont été testées (**Tableau 2.4.5**). Pour chaque AMM, SA ou NODU, les modèles de références expliquent la variable à expliquer par les OS et BA, notée $\sim OS + BA$ (**Tableau 2.4.5**) et permettent de répondre à la question générale (1) ainsi que (1.1) en particulier. Les modèles basés seulement sur les surfaces d’occupations du sol, notés $\sim OS$, permettent de quantifier la capacité explicative des occupations du sol sans les pressions en bioagresseurs. Sa comparaison avec les modèles de référence ($\sim OS + BA$) permet ensuite de quantifier l’effet de l’ajout des pressions de bioagresseurs et donc de répondre à la question (1.2). Enfin, les modèles incluant les PRA, notée $\sim OS + BA + PRA$, visent à déterminer si on améliore la capacité explicative des variations interannuelles des ventes par les variables OS et BA en considérant un effet local, et permet ainsi de répondre à la question (1.3).

Pour simplifier les analyses et du fait de leur moindre performance, seuls les modèles de référence ont été estimés pour expliquer les quantités d’AMM et l’indicateur QSA. Au total, nous avons donc ajusté 2199 modèles LASSO pour cette analyse. On obtient donc une valeur de coefficient distinct pour chaque variable explicative des 2199 modèles réalisés. Si la variable n’est pas sélectionnée, alors le coefficient associé est nul.

³⁹ Nous avons vu dans la partie 1 que le NODU était homogène à des hectares traités par une DU. Il peut, cependant, être également interprété en tant que nombre de doses unités appliquées dans une zone. Le modèle estimant des coefficients par hectare, nous avons choisi dans cette analyse d’exprimer les coefficients en nombre de doses unités par hectare (NODU/ha) plutôt qu’un nombre sans unité qui semble bien moins aisé à interpréter.

Contraintes sur les estimations des modèles LASSO

Certaines contraintes sur les estimations des modèles LASSO ont été ajoutées : l'intercept de l'ensemble de modèles a été forcé à zéro et les coefficients estimés pour les OS et les BA ont été forcés à être positifs ou nuls. Ces deux contraintes forcent les coefficients estimés pour les OS et les BA à correspondre à des doses (non négatives) de ventes par hectare, et non à des variations de ventes autour d'une moyenne. Les coefficients OS correspondent ainsi à des doses par hectare d'une occupation du sol, indépendamment des années et des PRA, les coefficients BA à des doses par hectare de "surfaces attaquées par des bioagresseurs" aussi appelée par la suite "pression de bioagresseurs". Ces coefficients sont donc en L, kg ou NODU (suivant la variable expliquée) par hectare. Seuls les coefficients associés à chaque PRA peuvent être négatifs, permettant de rendre compte, à surfaces d'occupations du sol et pressions en bioagresseurs égales, d'un excès ou d'un déficit de ventes (L, kg ou NODU) systématique dans une PRA. Autoriser les coefficients des PRA à être négatifs s'est révélé important pour estimer l'effet des variations interannuelles d'OS et BA.

Evaluation des modèles

La capacité explicative de chaque modèle LASSO a été mesurée par le $R^2_{\text{ajusté}}$ (éq. 5). Basé sur une mesure classique de R^2 (éq. 4), rapportant les erreurs du modèle aux erreurs faites par la moyenne des observations, le $R^2_{\text{ajusté}}$ est pondéré par un facteur qui prend en compte le nombre d'observations et de variables sélectionnées (éq. 5). Ce facteur permet de favoriser les modèles avec peu de variables explicatives par rapport au nombre d'observations mobilisées. D'autres critères d'évaluation des modèles existent et pourraient être calculés pour affiner l'analyse (AICc, RMSE). Les R^2 et $R^2_{\text{ajusté}}$ ont été privilégiés dans cette analyse car ce sont des critères sans unité, permettant de comparer les modèles expliquant des nombres d'observation variables dans des unités différentes : AMM (kg ou L), des quantités de substances actives (kg), la QSA (kg) et les NODU (NODU).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_n (Obs_i - Pred_i)^2}{\sum_n (Obs_i - \mu_o)^2} \quad (\text{éq. 4}),$$

avec :

i : une observation par PRA et par année

Obs : variables à expliquer observé (ex : Q_{SA} , Q_{AMM} ou NODU)

$Pred$: variables à expliquer prédite (Q_{SA} , Q_{AMM} ou NODU estimé par le modèle)

n : nombre d'observations

μ_o : moyenne sur l'ensemble des observations

$$R^2_{ajusté} = 1 - \frac{n}{n-k} (1 - R^2) \quad (\text{éq. 5}),^{40}$$

avec :

n : nombre d'observations

k : le nombre de variables explicatives sélectionnées par le modèle (coefficient > 0)

Pour chaque modèle LASSO, la capacité explicative de chaque variable explicative est évaluée au moyen de la variation prédite VP (éq. 6). Exprimées dans l'unité de la variables à expliquer (L, kg, NODU), ces variations prédites permettent de comparer les variables explicatives entre elles et de déterminer celles qui ont l'impact le plus fort d'après le modèle. En additionnant l'intégralité des VP des variables explicatives pour une variable à expliquer on obtient l'estimation de la variable à expliquer (éq. 7) ou, autrement dit, la variable à expliquer prédite (correspond à $Pred_i$; éq. 4). Dans le cas du modèle NODU total \sim OS + BA, par exemple, on obtient un NODU estimé par PRA et par année.

$$VP_{v,i} = coef_v \cdot Var_{v,i} \quad (\text{éq. 6}),$$

avec :

i : une observation par PRA et par année

v : une variable explicative (ex : blé tendre)

Var : la valeur prise par v pour i (ex : surface en blé tendre)

$coef$: le coefficient estimé par le modèle pour v

$$Pred_i = \sum_V VP_{v,i} \quad (\text{éq. 7}),$$

avec :

V : l'ensemble des variables explicatives du modèle

Dans cette analyse, nous avons parfois réalisé des regroupements intermédiaires de variables explicatives, en additionnant les VP de toutes les variables explicatives d'un groupe (éq. 8). Nous avons calculé la VP des occupations du sol (VP_{OS}), des pressions en bioagresseurs (VP_{BA}) ou des PRA (VP_{PRA}), afin d'estimer la part prise par chacun de ces groupes de variables (question 1.2 et 1.3). Pour le modèle NODU total \sim OS + BA, par exemple, VP_{OS} représente la part de NODU prédite à partir des occupations du sol et VP_{BA} , la part de NODU prédite à partir des pressions en bioagresseurs spécifiques à chaque année et PRA. Pour estimer la répartition par filière (question 2 et 3), nous avons regroupé pour chaque filière (\sim occupation du sol), la variation prédite pour l'occupation du sol à proprement parler et les

⁴⁰ La définition habituelle du R^2 ajusté inclut des $n-1$ au numérateur et au dénominateur. Ici nous ne les utilisons pas car contrairement aux régressions classiques il n'y a pas d'intercept dans les régressions. En tout état de cause, dans cette analyse les valeurs de n (plusieurs centaines) font que cette modification n'a qu'un effet très limité.

variations prédites pour les pressions en bioagresseurs de cette occupation du sol ($VP_{BA \in Fil}$), par exemple $VP_{\text{filière blé tendre}} = VP_{\text{blé tendre}} + VP_{\text{septoriose}} + VP_{11 \text{ autres bioagresseurs du blé tendre}}$

$$\sum_{v \in \text{Groupe}} VP_{v,i} \quad (\text{éq. 8})$$

Ces différentes VP ou estimations ($Pred_i$) peuvent être également agrégées (sommées) à plusieurs échelles spatiales (par exemple nationale) ou temporelles (par exemple période 2014 - 2017). Nous avons par exemple calculé le NODU national annuel tel qu'expliqué par la somme des NODU des modèles à la PRA, pour le comparer au NODU national observé.

Les surfaces et donc les quantités vendues pouvant être très variables entre les PRA, la présence de valeurs extrêmes rend très difficile à interpréter certaines figures avec les VP par PRA. La taille des PRA pouvant expliquer une partie de cette variabilité, nous avons représenté, dans ces figures, des VP "normalisées" (éq. 9), qui correspondent à des VP divisées par la somme des surfaces des occupations du sol de la PRA (occupations du sol considérées dans le modèle) (cf. section "Occupations des sols").

$$VP_{v,i,normalisé} = \frac{VP_{v,i}}{\sum_{OS \in i} Surface_{os,i}} \quad (\text{éq. 9})$$

avec :

i : une observation par PRA et par année

Synthèse des résultats par modèle

Les résultats détaillés des modèles incluent un $R^2_{\text{ajusté}}$ par modèle, ainsi qu'un coefficient (en kg, L ou NODU / ha) et une VP (en kg, L ou NODU) par variable explicative par modèle, ce qui fait un nombre important de valeurs à observer et à comparer. Pour comparer les différentes unités d'agrégation de la BNV-d, soit les AMM, les substances actives ou les indicateurs, nous avons synthétisé les résultats en calculant, pour les AMM et les substances actives, un $R^2_{\text{ajusté}}$ moyen et un $R^2_{\text{ajusté}}$ moyen pondéré par le NODU (éq. 10), ce dernier permettant de donner plus d'importance aux résultats des substances ou AMM très contributives pour le NODU.

$$R^2_{\text{ajusté pondéré},U} = \frac{\sum_U (R^2_{\text{ajusté},u} \cdot Nodu_u)}{\sum_U Nodu_u} \quad (\text{éq. 10})$$

avec :

U : unité d'agrégation de la BNV-d choisie (AMM ou Substance active)

u : AMM ou substance active particulière

$Nodu_{AMM}$: somme des $Nodu_{SA}$ des substances actives appartenant à cet AMM. Seules les Q_{SA} issus de l'AMM sont comptées pour chaque substance

Nous avons également calculé de trois manières différentes les NODU totaux (agricole - UA, hors AMM stockage) estimés et observés, pour chaque année et chaque PRA, à partir des NODU par fonction estimés et observés (somme ; **éq. 11**), de quantités de substances actives et observées (calcul classique de NODU; **éq. 12**) et de quantités d'AMM estimées et observées (à partir des quantités de substances actives correspondantes ; **éq. 13**).

$$NODU_{reconstitué\ via\ NODUf,i} = \sum_{fonctions} NODUf_i \quad (\text{éq. 11}),$$

avec :

i : une observation pour une PRA et une année

$NODUf$: NODU par fonction⁴¹ (herbicides, fongicides...) observé ou estimé par un modèle. (Pred ; **éq. 7**)

$$NODU_{reconstitué\ via\ SA,i} = \sum_{SAs} \frac{Q_{SA,i}}{DU_{SA}} \quad (\text{éq. 12}),$$

avec :

SAs : ensemble des substances actives

Q_{SA} : quantité de substances actives (kg) observée ou estimée par un modèle (Pred ; **éq. 7**)

DU_{SA} : Dose Unité d'une substance active SA

$$NODU_{reconstitué\ via\ AMM,i} = \sum_{SAs} \frac{\sum_{AMMs} Q_{AMM,i} \cdot \text{quotient}_{SA,AMM}}{DU_{SA}} \quad (\text{éq. 13}),$$

avec :

Q_{AMM} : quantité d'AMM (L ou kg) observée ou estimée par un modèle (Pred ; **éq. 7**)

$AMMs$: ensemble des AMM contenant une substance active SA

$\text{quotient}_{SA, AMM}$: part de la substance active SA contenue dans une unité d'AMM⁴² (en kg/kg ou kg/L)

Ainsi, nous avons pu calculer un $R^2_{ajusté}$ pour chaque méthode de calcul du NODU reconstitué (**éq. 5**), un pour les AMM, un pour les substances actives et un pour les fonctions. Dans ce calcul, nous avons choisi pour la valeur de k le nombre de variables explicatives permettant d'estimer le NODU reconstitué, autrement dit le nombre de variables explicatives sélectionnées (coefficient > 0) au moins une fois parmi l'ensemble des modèles (sans répétition). Ces $R^2_{ajusté}$ de NODU reconstitués nous permettent de comparer plus directement la performance des modèles réalisés sur les différentes unités d'agrégation des AMM, aux substances actives, aux NODU par fonction et au NODU total.

⁴¹ L'ensemble des NODU herbicides, fongicides, insecticides, substances de croissance, nématicides, autres et ND sont pris en compte dans ce calcul.

⁴² Le quotient est calculé à partir des rapport entre les quantités de substances actives et d'AMM issues des BNV-d Registre et Bilan ($Q_{SA} = Q_{AMM} \cdot \text{quotient}$). Quand plusieurs valeurs de quotients pour un même couple {AMM, substance active} existait (imprécision au niveau des décimales), nous avons choisi au hasard un unique quotient parmi ceux issus du registre et de l'année la plus récente.

Logiciel et packages mobilisés

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R (R team Core, 2018 ; v. 3.6.3) et avec le package *glmnet* (Friedman et al., 2010). La manipulation des données et la construction des figures ont été réalisées au moyen des packages R suivants : *dplyr* (Wickham et al., 2020), *data.table* (Dowle et Srinivasan, 2019), *testthat* (Wickham, 2011), *magrittr* (Bache et Wickham 2014), *lubridate* (Grolemund et Wickham, 2011), *fst* (Klik, 2020), *stringr* (Wickham, 2019), *ggplot2* (Wickham, 2016), *cowplot* (Wilke, 2019) et *tmap* (Tennekes, 2018).

Analyse préliminaire des résultats des modèles en terme d'utilisation

Nous avons procédé à une évaluation préliminaire de la capacité des modèles à distribuer les ventes par utilisation de produits phytosanitaires (**Q2**). Nous avons dans un premier temps comparé les coefficients obtenus pour le NODU avec les Indices de Fréquence de Traitement (IFT) calculés à partir des enquêtes pratiques culturales (Joassard et al., 2017) pour répondre à la question 2.1. En effet, les coefficients obtenus pour le NODU s'expriment en nombre de doses unités (NODU) par hectare et sont donc homogènes à des IFT (nombre de traitements par hectare). Nous avons regardé également si certaines sorties des modèles comme la répartition des indicateurs (NODU et NODUf) en différentes filières issues des modèles reflètent les connaissances d'experts, sollicitées notamment au sein du comité de pilotage du projet AVI-NODU (question 2.2). Les "filières" sont définies par les différentes occupations du sol mobilisés dans les modèles : recoupant, pour chaque filière, la surface d'une occupation du sol et les pressions en bioagresseurs qui lui sont associées. La part de NODU estimée sur une filière une année est la somme par année des variations prédites par les surfaces de l'occupation du sol correspondantes (VP_{Fil}) et la somme des variations prédites par les pressions en bioagresseurs associées à cette occupation du sol ($VP_{BA \in Fil}$).

2.4.3. Résultats et discussion

Les résultats et les discussions présentées dans cette section ont pour objectif de répondre aux questions formulées en introduction. Dans la première partie cependant, nous ne cherchons pas à apporter des réponses aux questions posées mais plutôt à illustrer, de manière détaillée pour les quatre substances prises en exemple, les types de résultats présentés dans les parties suivantes. Dans la deuxième partie, nous nous demandons dans quelle mesure les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs permettent d'expliquer les ventes de produits phytosanitaires (Q1). Dans la troisième partie, nous évaluons si la répartition proposée par les modèles peut être interprétée en termes d'utilisation (Q2) et les précautions à prendre, notamment, pour interpréter les coefficients du modèle. Dans la quatrième partie, nous discutons dans quelle mesure la modélisation proposée peut être utilisée pour le suivi des utilisations de produits phytosanitaires (Q3).

Exemples de substances actives

Chlorothalonil

Le chlorothalonil est la substance active de 40 AMM, dont 5 AMM qui représentent environ 80% des quantités vendues entre 2014 et 2017 (**Fig. 2.4.4**). Il est classé comme fongicide (**Annexe B.4**) et ses AMM ont des usages autorisés sur la période d'étude sur des maladies fongiques (septoriose, rouille, oïdium, helminthosporiose, ramulariose, mildiou, anthracnose, etc.) pour des cultures de blé, d'orge, d'avoine, mais aussi des cultures protéagineuses (pois), des pommes de terre et d'autres correspondant plutôt à la catégorie "autres légumes fleurs" (carotte, champignons, choux et tomates). Malgré cette diversité d'usages possibles, considérant la part importante de L'AMM CHEROKEE dans les quantités vendues (usage courant pour la septoriose sur blé), la vente de chlorothalonil devrait logiquement être fortement influencé par la présence de blé ainsi que de son bioagresseur fongique dominant, la septoriose.

chlorothalonil entre 2014 et 2017

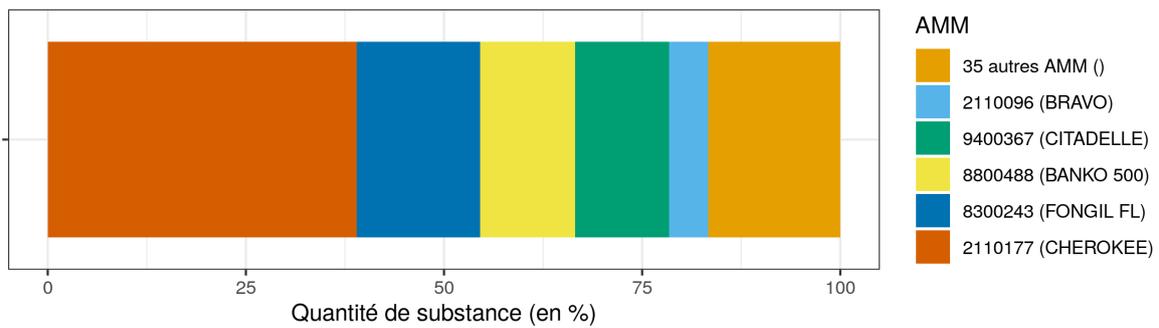


Fig. 2.4.4 : Part (en %) des différentes AMM dans la quantité de chlorothalonil vendue d'après la BNV-d Registre, segment agricole - UA, hors AMM stockage, entre 2014 et 2017. Seules les parts des 5 AMM les plus importantes sont représentées, par ordre croissant de gauche à droite.

La Fig. 2.4.5 représente les statistiques de ventes du chlorothalonil issus de la BNV-d en fonction des années et des PRA. On remarque une grande disparité spatiale des ventes, en partie liée à la taille des PRA : les PRA très foncées sont aussi des PRA plutôt de grande taille.

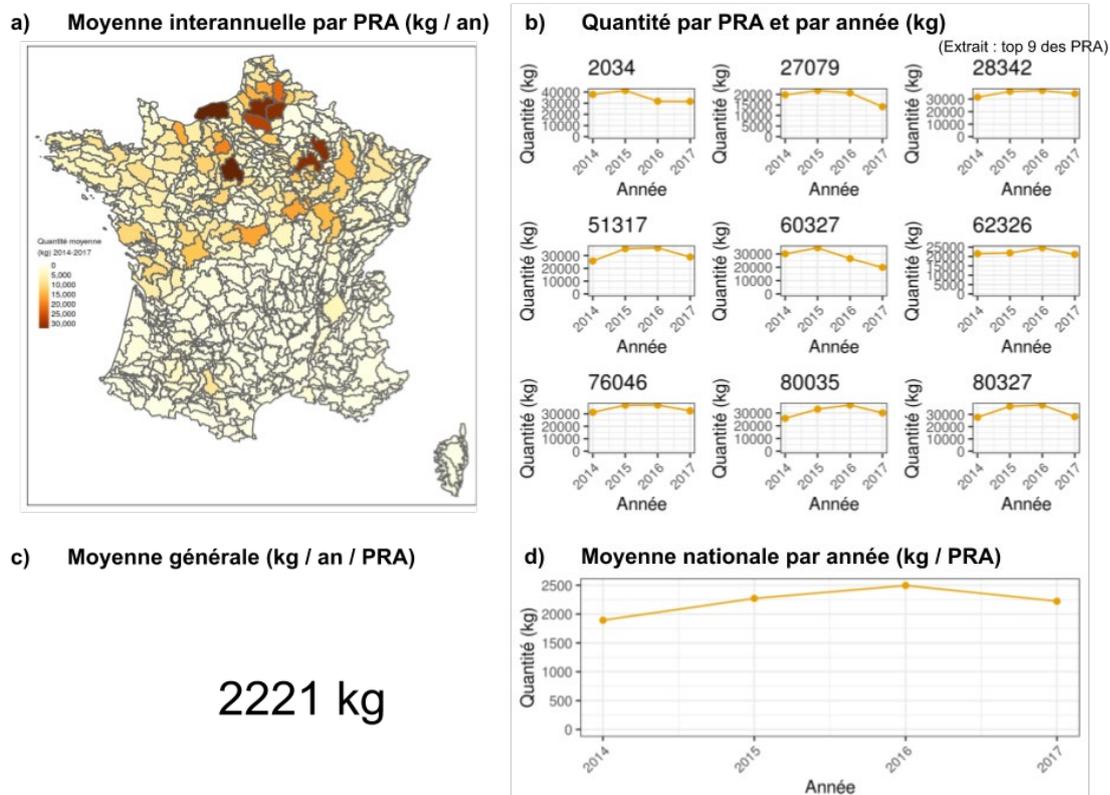


Fig. 2.4.5 : Variabilité temporelle et spatiale des quantités vendues de chlorothalonil dans la BNV-d Registre segment agricole - UA, hors AMM stockage, entre 2014 et 2017 : a) moyenne interannuelle des quantités vendues dans chaque PRA, b) Evolution temporelle des quantités vendues dans les 9 PRA les plus importantes en termes de quantités totales vendues (codes des PRA renseignés dans les titres), c) moyenne des quantités sur la période et l'ensemble des PRA et d) moyenne nationale des quantités vendues chaque année.

Les Fig. 2.4.6 et 2.4.7, nous montrent les corrélations entre les quantités vendues de chlorothalonil (par an et PRA) et quelques variables explicatives sélectionnées par le LASSO. On peut constater

visuellement des corrélations positives avec les variables qui ont a priori un effet : la surface en blé (**Fig. 2.4.7a**) et la surface de blé attaquée par la septoriose (**Fig. 2.4.7b**), et aucune corrélation pour les surfaces de maïs qui n'ont aucun effet *a priori* (**Fig. 2.4.6a**). Les résultats de deux modèles sont présentés ici, le modèle $Q_{SA} \sim OS$ (**Fig. 2.4.6**) et le modèle $Q_{SA} \sim OS + BA$ (**Fig. 2.4.7**) et sont cohérents avec les observations et les attendus. Les surfaces de maïs, qui n'ont pas *a priori* de corrélation avec le chlorothalonil ne sont pas sélectionnées (coefficient = 0) alors que les surfaces de blé et la pression de septoriose de surcroît sont sélectionnées par les modèles LASSO (coefficient > 0 kg/ha). La valeur des coefficients diffère cependant entre les deux modèles. Le modèle attribue 0.184 kg de chlorothalonil par hectare de blé tendre lorsque les bioagresseurs ne sont pas pris en compte (**Fig. 2.4.6a**), alors que lorsque les bioagresseurs sont pris en compte, il en attribue 0.138 kg par hectare de blé tendre (**Fig. 2.4.7a**) auxquels viennent s'ajouter 0.091 kg de chlorothalonil par hectare de blé tendre attaqué par la septoriose (**Fig. 2.4.7b**). Ces résultats signifient que le modèle LASSO avec $Q_{\text{chlorothalonil}} \sim OS + BA$ a estimé qu'une partie des quantités corrélées à la surface en blé tendre était mieux expliquée si on la conditionne à la pression de septoriose. L'ajout des pressions en bioagresseurs semble permettre, pour ce cas, de préciser l'utilisation de la substance.

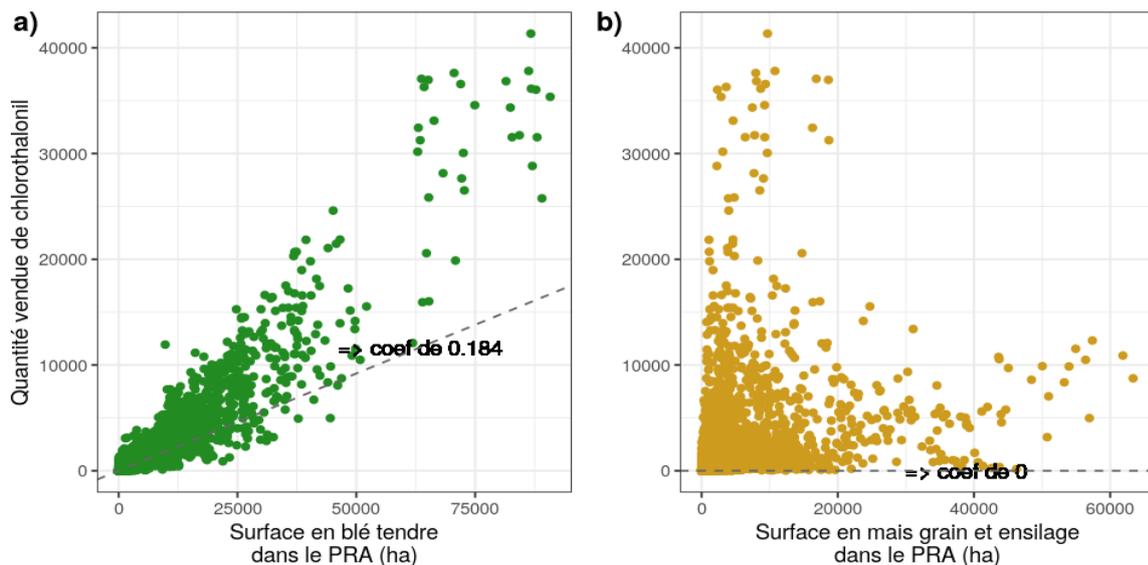


Fig 2.4.6 : Quantités vendues de chlorothalonil (kg) par année et par Petite Région Agricole (PRA) selon a) les surfaces en blé tendre et b) les surfaces en maïs grain et ensilage (hectares). Les coefficients obtenus pour chacune des occupations du sol par le modèle Lasso " $Q_{SA} \sim OS$ ", ainsi que la droite correspondante ($y = \text{coef} \cdot x$), sont indiqués sur les graphiques correspondants.

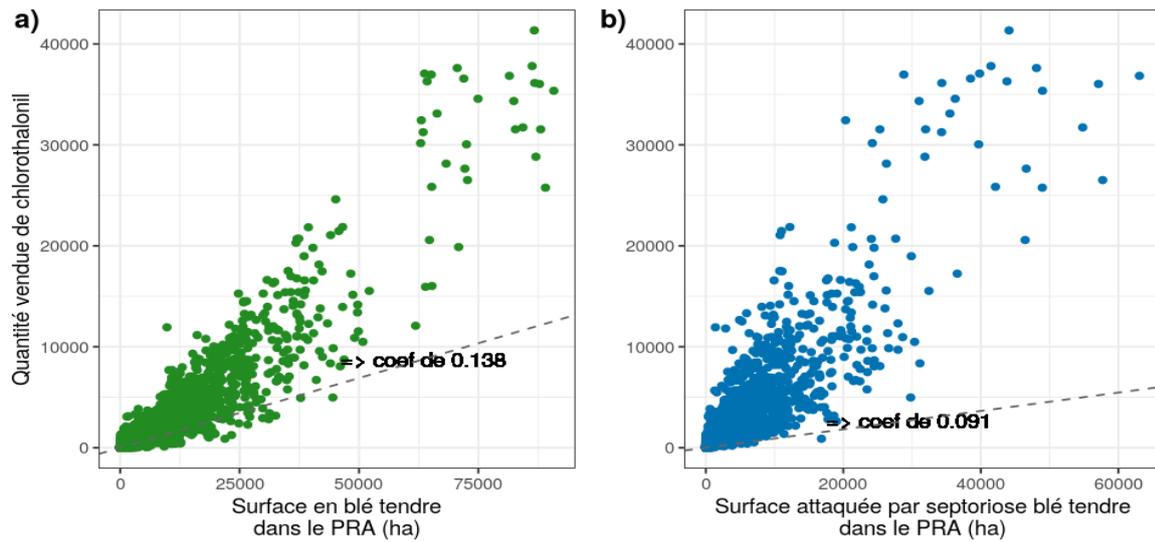


Fig 2.4.7 : Quantités vendues de chlorothalonil (kg) par année et par Petite Région Agricole (PRA) selon a) les surfaces en blé tendre (hectares) et b) les surfaces en blé tendre attaquées par la septoriose. Les coefficients obtenus pour chacune de ces variables dans le modèle Lasso " $Q_{SA} \sim OS + BA$ ", ainsi que la droite correspondante ($y = coef \cdot x$), sont indiqués sur les graphiques correspondants.

Sur le **Tableau 2.4.6** est répertorié l'ensemble des résultats du modèle LASSO de référence pour le chlorothalonil ($Q_{chlorothalonil} \sim OS + BA$) : l'ensemble des coefficients obtenus pour chaque variable du modèle. On constate que peu de variables sont sélectionnées (coefficient > 0) : seulement 6 occupations du sol et 4 pressions de bioagresseurs.

Tableau 2.4.6 : Ensemble des coefficients obtenus pour le modèle LASSO $Q_{chlorothalonil} \sim OS + BA$, par ordre décroissant

Occupations du sol (OS)		Pressions en bioagresseurs (BA)	
Variable	coefficient (en kg/ha)	Variable	coefficient (en kg/ha)
protéagineux	0.797	charanconSil_colza	0.141
plante_a_fibre	0.56	altise_g_colza	0.095
pommes_de_terre_de_plein_champs	0.271	septoriose_blé_tendre	0.091
betteraves_sucrière	0.194	mildiou_pommes_de_terre_de_plein_champs	0.074
blé_tendre	0.138	puceronEpis_blé_tendre	0
colza	0.05	altise_p_colza	0
arboriculture	0	cecidomyie_blé_tendre	0
autres_céréales	0	charanconBT_colza	0
autres_légumes_fleurs	0	charanconTige_colza	0
autres_oléagineux	0	fusariose_blé_tendre	0
canne_sucré	0	helminthosporioseBTH_blé_tendre	0
divers	0	helminthosporioseOrgeH_orge	0
estives_landes	0	limaces_blé_tendre	0
fourrage	0	meligethe_colza	0
gel	0	oidiumBTH_blé_tendre	0
legumineuse_grains	0	phoma_colza	0
mais_grain_et_ensilage	0	pietinEchaudage_blé_tendre	0
orge	0	pietinVerse_blé_tendre	0
prairies_temporaires	0	puceronAutomne_blé_tendre	0
riz	0	puceronCendre_colza	0
semences	0	pyrale_mais_grain_et_ensilage	0
sncf	0	rhynchosporiose_orge	0
tournesol	0	rouilleBrune_blé_tendre	0
vignes	0	rouilleJaune_blé_tendre	0
znaon_pro	0	sclerotinia_colza	0
zna_pro	0		

La **Fig. 2.4.8** présente les résultats des modèles avec OS et OS + BA du Chlorothalonil en multipliant les coefficients obtenus par les surfaces dans l'ensemble des PRA ce qui donne la distribution des valeurs prédites (VP) associées à chaque paramètre pour l'ensemble des PRA.

Substance active : chlorothalonil, R^2 OS : 0.919 et OS + BA : 0.925

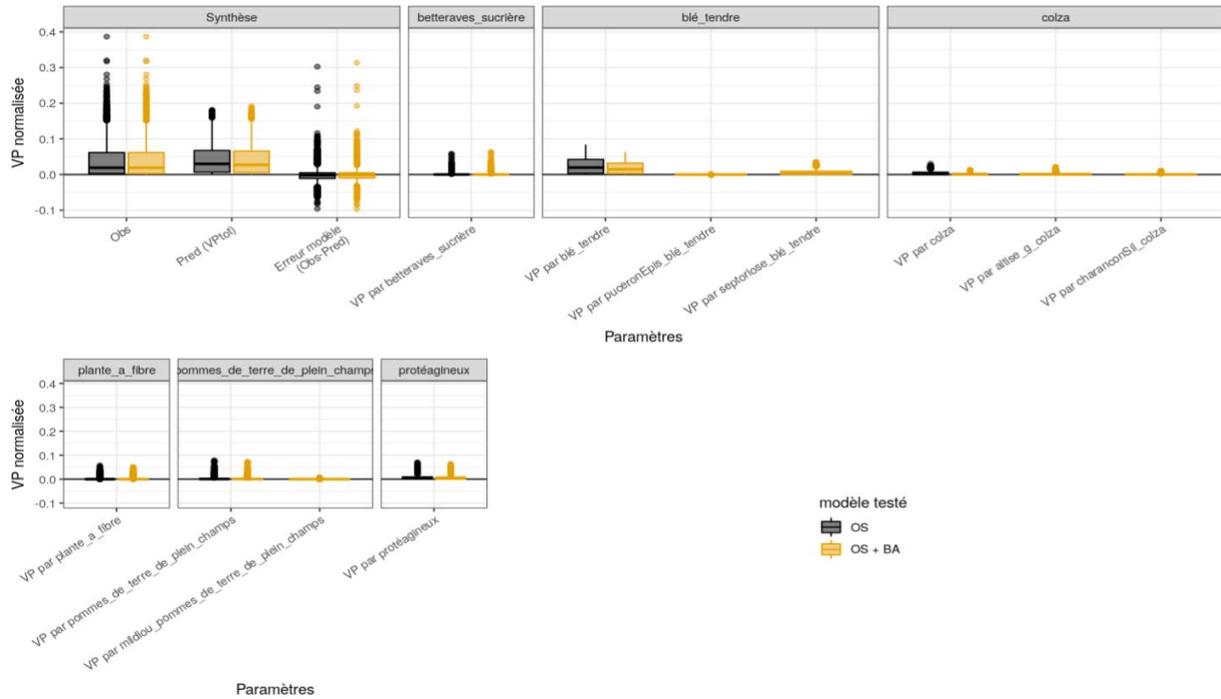


Fig 2.4.8 : Variations Prédites normalisées (VP/ surface totale modélisée PRA) de chlorothalonil pour chaque année et chaque PRA par les occupation du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnés, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul, selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA). Les valeurs de $R^2_{ajusté}$ des différents modèles sont présentées dans le titre.

Ces distributions de valeurs prédites sont comparées à la distribution des valeurs observées (Obs). On peut ainsi voir que les valeurs prédites par l'ensemble du modèle (Pred) couvrent une distribution similaire à la distribution observée (Obs). L'erreur résiduelle (Erreur modèle) représentant en moyenne un faible écart de dose par rapport à la distribution observée. Les betteraves sucrières, pommes de terre et protéagineux présentent quelques points fortement impactés mais également une moyenne faible ce qui correspond d'une part aux traitements importants qu'ils reçoivent et d'autre part au faible nombre de PRA dans lesquels ils sont très représentés. Le blé tendre (VP par blé_tendre) en revanche représente une large fraction en moyenne de la variabilité observée (Obs) répartie ou non entre surfaces totales et surfaces attaquées par la septoriose (VP par septoriose_blé_tendre). Par rapport aux VP de ces cultures, les VP sur colza sont très faibles, malgré les surfaces très importantes de colza par rapport aux surfaces de betteraves, de protéagineux ou de pomme de terre, ce qui est logique étant donné l'absence de relation causale plausible *a priori* entre utilisation de chlorothalonil et surfaces de colza (et surtout surfaces de colza attaquées par des ravageurs).

Il est important d'avoir à l'esprit que de tels modèles permettent de mettre en évidence des corrélations et non des causalités. Un bon nombre des variables sélectionnées correspondent aux usages attendus pour cette substance, alors que d'autres, comme la surface en colza (totale ou la surface attaquée par des charançons ou des altises) sont inattendues. Ces résultats signifient que les PRA avec beaucoup de surface en colza, des pressions en altises sur colza ou des pressions en charançons sur colza semblent associés à des quantités vendues plus importantes de chlorothalonil. L'on pourrait par exemple avancer que les agriculteurs qui font du blé tendre en association avec beaucoup de colza utilisent plus de chlorothalonil que les autres, ou que les conditions climatiques favorables aux altises ou aux charançons sur colza sont également favorables à la septoriose ou à d'autres maladies foliaires sur blé. Pour pouvoir identifier les relations de causalité, il faut confronter ces corrélations à d'autres informations.

Glyphosate

Le glyphosate est une substance active vendue présente dans un grand nombre d'AMM (128 AMM ; **Fig. 2.4.9**). Les 5 AMM les plus importants en termes de quantité vendue représentent 50 % des quantités vendues entre 2014 et 2017. Herbicide systémique (**Annexe B.4**), il est autorisé sur la période d'étude pour des usages en traitement généraux de désherbage. À l'inverse du chlorothalonil, le glyphosate est une substance mobilisée sur des situations et des cultures très diverses (destruction de vivaces, destructions de couverts végétaux, gestion des adventices en intercultures...).

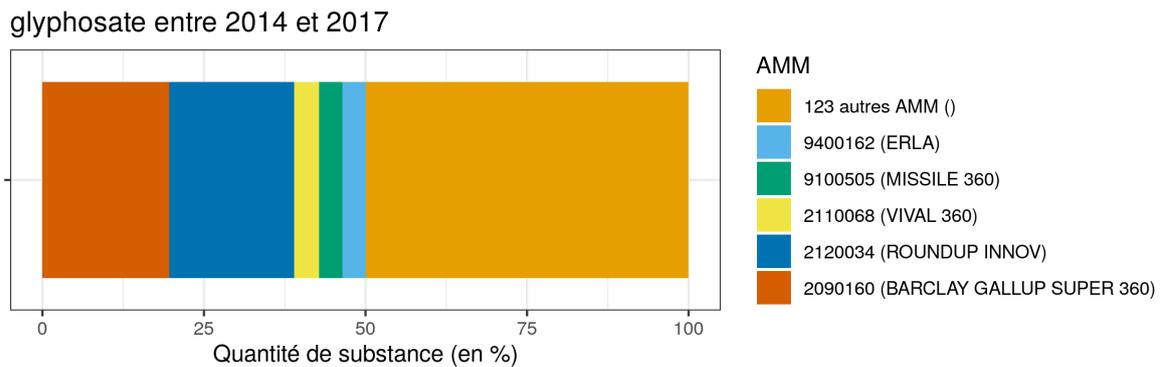


Fig. 2.4.9 : Part (en %) par AMM de la quantité de glyphosate vendue dans la BNV-d Registre segment agricole - UA, hors AMM stockage, entre 2014 et 2017. Seules les parts des 5 AMM les plus importants sont représentées, par ordre croissant de gauche à droite.

La **Fig. 2.4.10** représente les statistiques de ventes de glyphosate issues de la BNV-d Registre en fonction des années et des PRA. On remarque que les ventes de glyphosate sont réparties de façon plus homogène sur la France métropolitaine que les ventes de chlorothalonil, avec une quantité cependant très importante dans le département de la Charente Maritime (PRA 17377, Saintonge Viticole).

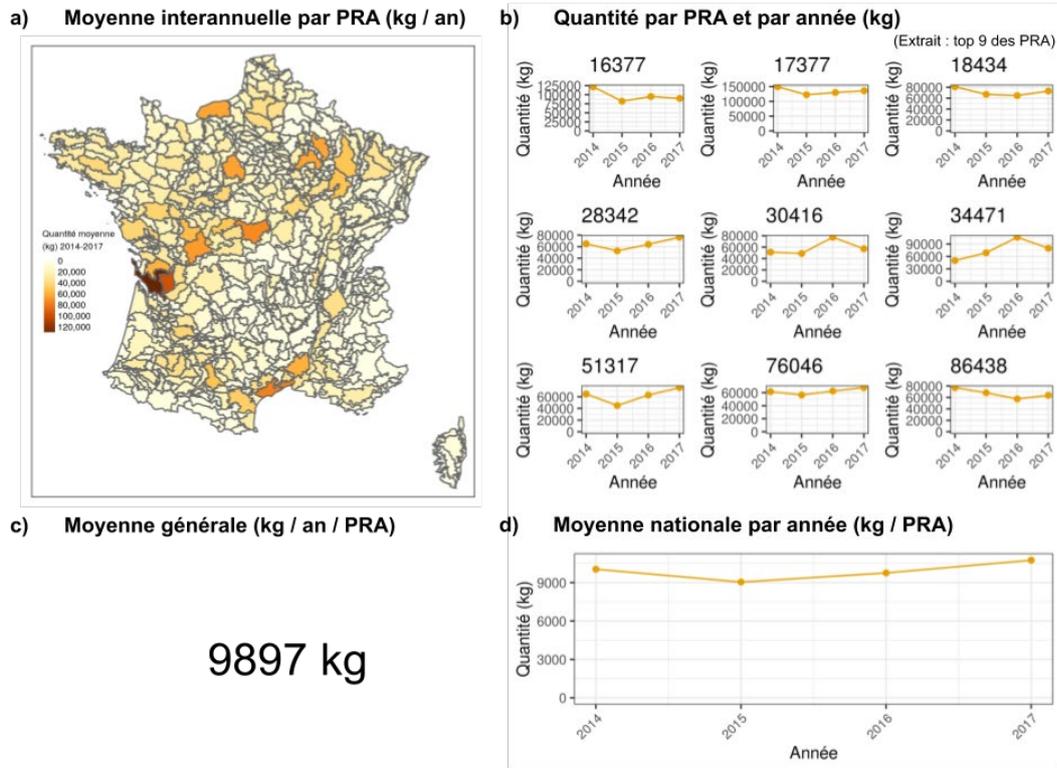


Fig. 2.4.10 : Variabilité temporelle et spatiale des quantités vendues de glyphosate entre 2014 et 2017 : a) moyenne interannuelle des quantités vendues dans chaque PRA, b) Evolution temporelle des quantités vendues dans les 9 PRA les plus importants en terme de quantités totales vendues, c) moyenne des quantités sur la période et l'ensemble des PRA et d) moyenne nationale des quantités pour chaque année.

La **Fig. 2.4.11** nous montre que les quantités de glyphosate apparaissent corrélées aux surfaces en vignes et en blé tendre et que ces variables sont sélectionnées dans le modèle " $Q_{\text{glyphosate}} \sim OS + BA$ " (coefficient > 0 kg/ha). Le modèle attribue 1.219 kg par hectare de vignes et 0.235 kg par hectare de blé tendre.

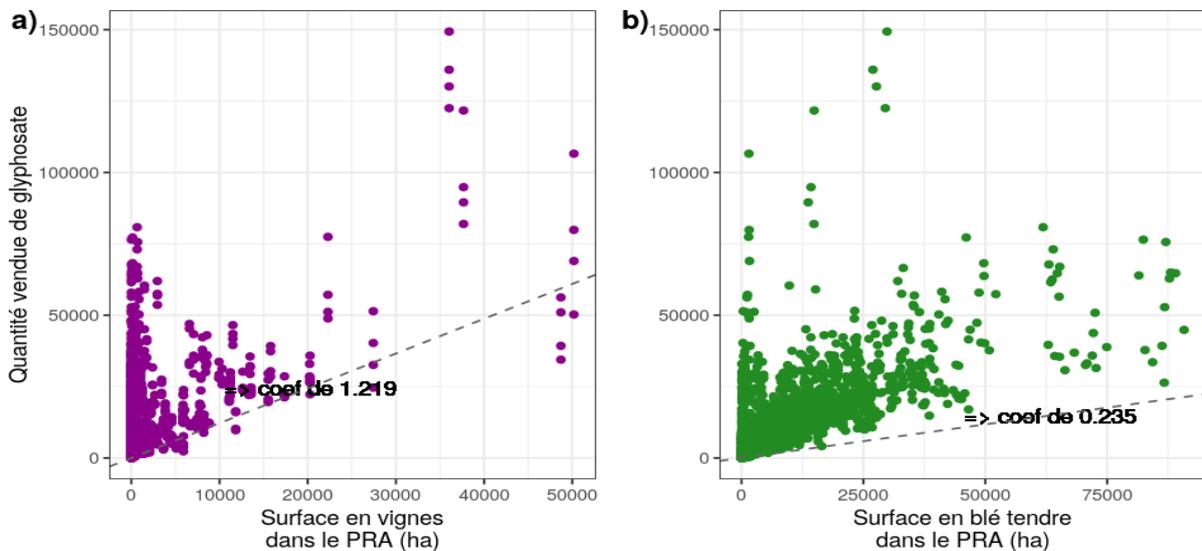


Fig 2.4.11 : Quantités vendues de glyphosate (kg) par année et par Petite Région Agricole (PRA) selon a) les surfaces en vignes et b) les surfaces en blé tendre (hectares). Les coefficients obtenus pour chacune des occupations du sol par le modèle Lasso " $Q_{SA} \sim OS + BA$ ", ainsi que la droite correspondante ($y = \text{coef} \cdot x$), sont indiqués sur les graphiques correspondants.

Les quantités vendues (**Fig 2.4.12**) sont à nouveau bien expliquées par les occupations du sol, avec ou sans prise en compte des bioagresseurs ($R^2_{\text{ajusté}}$ de 0.89 et 0.90), avec un impact notable des vignes, du blé tendre mais aussi de l'arboriculture qui représente pourtant des surfaces assez faibles mais qui peuvent avoir des pratiques intenses de recours au glyphosate en désherbage.

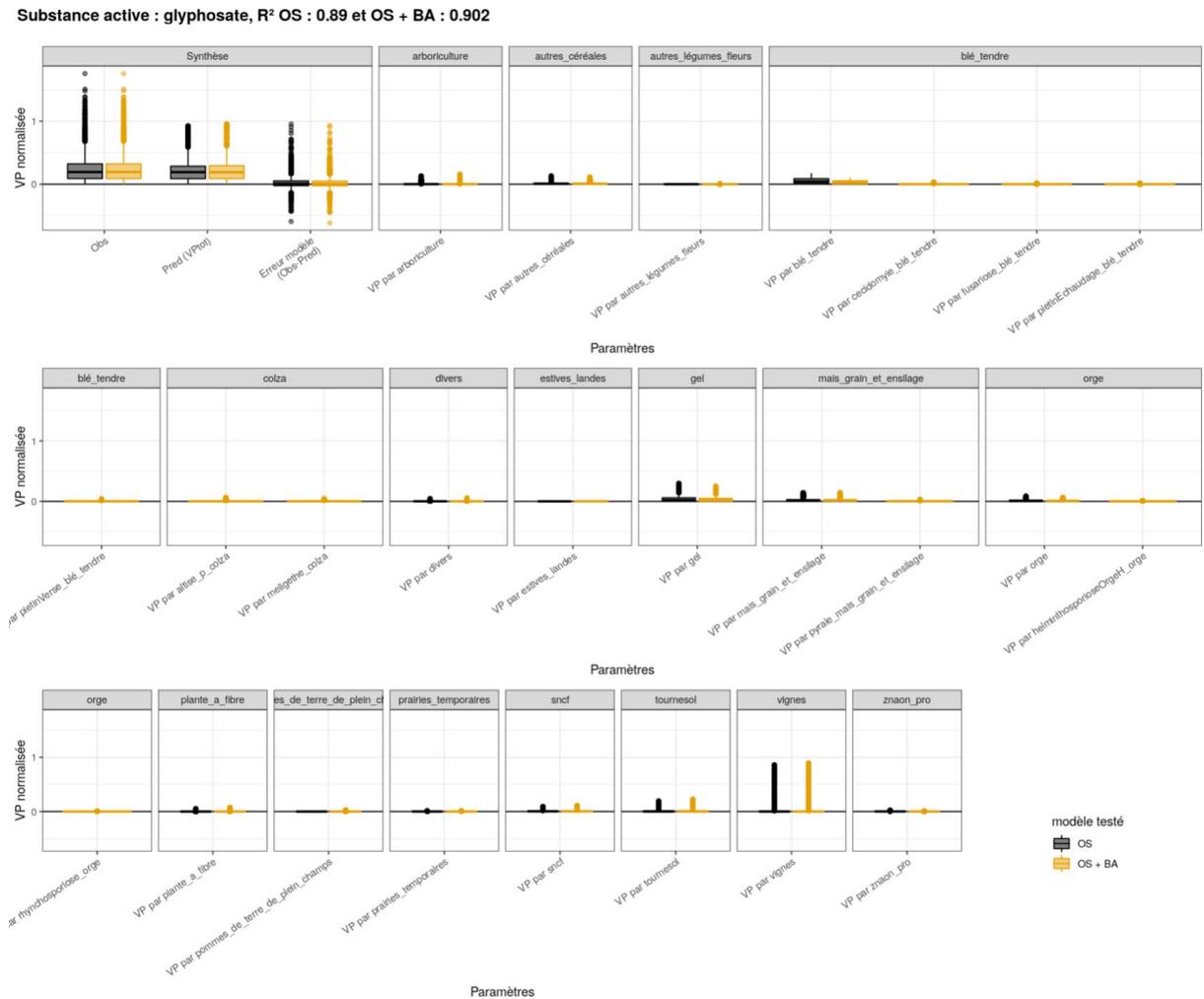


Fig 2.4.12 : Variations Prédites normalisées (VP/surface totale modélisée PRA) en glyphosate pour chaque année et chaque PRA par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnés, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou incluant la pression en bioagresseurs (OS + BA). Les valeurs de $R^2_{\text{ajusté}}$ des différents modèles sont présentées dans le titre.

Soufre

Le soufre est une substance active vendue présente dans 2 AMM de la BNV-d Registre segment agricole - UA (hors AMM stockage) (**Fig. 2.4.13**), le COLPENN, très largement majoritaire, et l'UNICORN DF. Il est classé comme fongicide (**Annexe B.4**) et a des usages autorisés sur des maladies fongiques (oïdium, Erinose et Tavelure) et un usage dominant sur vigne, arboriculture (pêcher, pommier, rosier) et autres légumes fleurs (melon). Le soufre pris en compte dans cette analyse renvoie à des usages *a priori* très spécifiques notamment sur vignes et devrait, en conséquence, être fortement influencé par la présence de vignes.

soufre entre 2014 et 2017

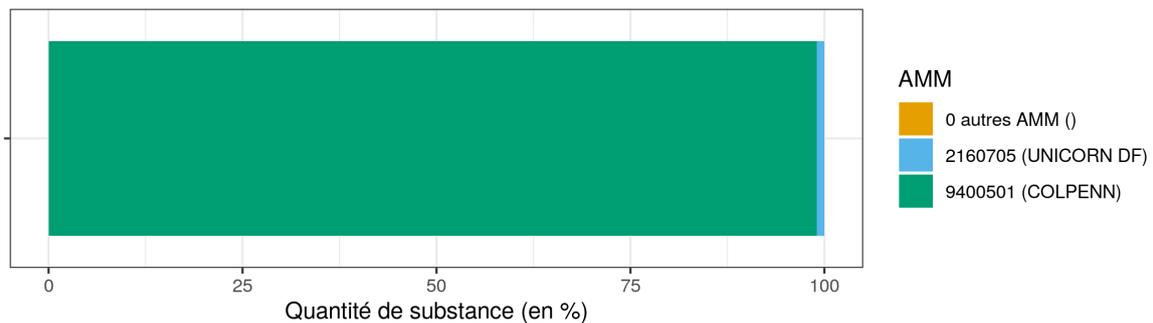


Fig. 2.4.13 : Part (en %) par AMM de la quantité de soufre vendue dans le BNV-d Registre segment agricole - UA, hors AMM stockage, entre 2014 et 2017. Seulement 2 AMM sont concernés et sont représentés par ordre croissant de gauche à droite.

La **Fig. 2.4.14** représente les statistiques de ventes du soufre issues de la BNV-d Registre en fonction des années et des PRA. On remarque que les ventes sont très localisées en France métropolitaine, en Gironde et sur le pourtour méditerranéen, avec une quantité particulièrement importante dans le département de l'Aude (PRA 11470, Région viticole). Il faut signaler que les quantités vendues prises en compte dans l'analyse sont faibles car la majeure partie du soufre utilisé appartient au segment biocontrôle, non modélisé dans cette étude (cf **section 2.3**). On notera aussi une forte baisse des utilisations au niveau national, plus ou moins visible dans les principales PRA présentées ici. De telles tendances ne sont pas analysées dans le modèle si elles ne correspondent pas à des changements d'occupation du sol ou à des variations annuelles de pression des bioagresseurs. Un modèle prenant en compte des tendances en termes de changements d'utilisation pourrait être envisagé avec quelques années de plus afin d'évaluer des tendances à l'intensification ou au contraire, à la baisse d'intensité des

traitements. La baisse ici observée pourrait correspondre à une substitution du soufre non biocontrôle par du soufre biocontrôle, dans le cadre des objectifs de CEPP à atteindre au niveau des distributeurs.

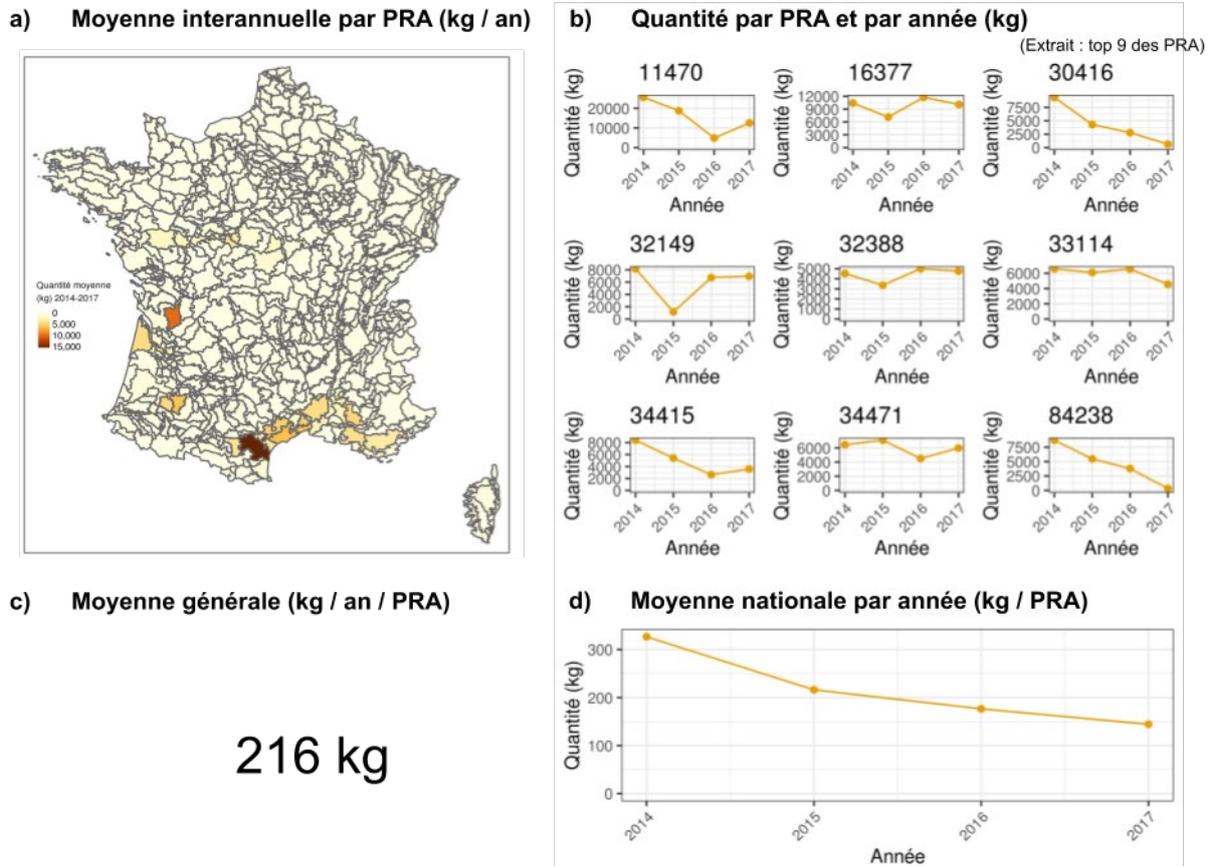


Fig. 2.4.14 : Variabilité temporelle et spatiale des quantités vendues de soufre entre 2014 et 2017 : a) moyenne interannuelle des quantités vendues dans chaque PRA, b) Evolution temporelle des quantités vendues dans les 9 PRA les plus important en termes de quantités totales vendues, c) moyenne des quantités sur la période et l'ensemble des PRA et d) moyenne nationale des quantités pour chaque année.

La **Fig. 2.4.15** nous montre que les quantités de soufre apparaissent corrélées aux surfaces en vignes et non corrélées avec les surfaces en blé tendre, et que la surface en vignes est sélectionnée dans le modèle “ $Q_{Sd} \sim OS + BA$ ” (coefficient > 0 kg/ha). Le modèle attribue 0.111 kg par hectare de vignes. La **Fig. 2.4.16** précise que seules les surfaces de vigne sont corrélées aux ventes de soufre, la distribution des VP du modèle reflète cependant assez mal les ventes : la distribution des valeurs observées est plus proche de la distribution des erreurs que des VP du modèle, ce qui est aussi traduit par le $R^2_{ajusté}$ assez faible autour de 0.4.

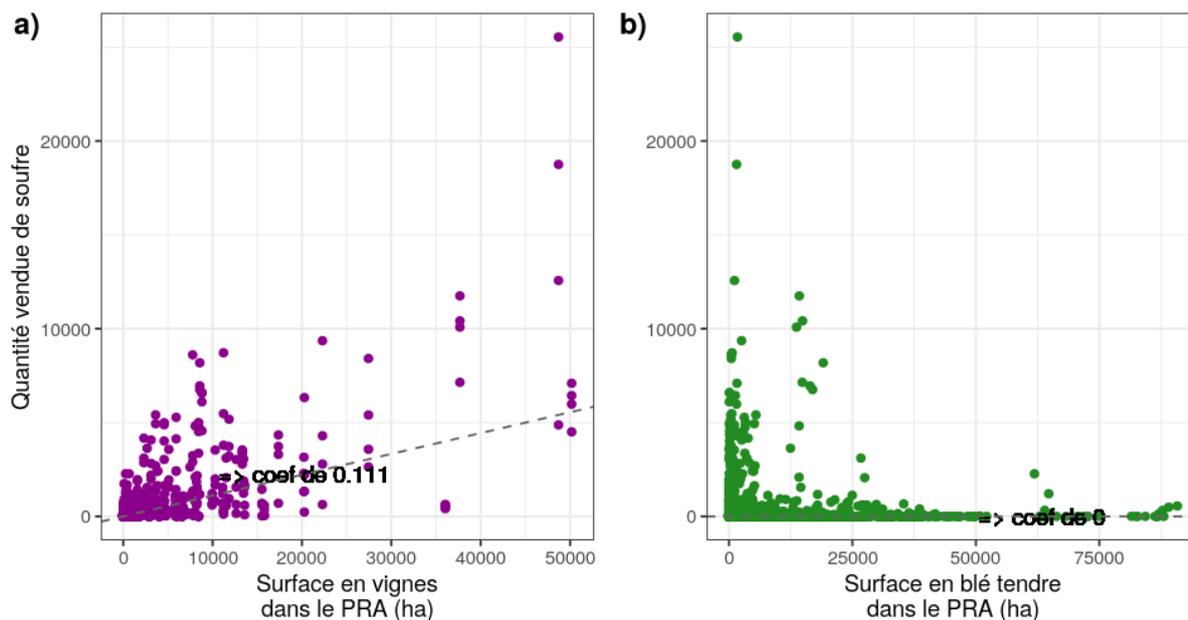


Fig 2.4.15 : Quantités vendues de soufre (kg) par année et par Petite Région Agricole (PRA) selon a) les surfaces en vignes et b) les surfaces en blé tendre (hectares). Les coefficients obtenus pour chacune des occupations du sol par le modèle Lasso " $Q_{SA} \sim OS + BA$ ", ainsi que la droite correspondante ($y = coef \cdot x$), sont indiqués sur les graphiques correspondants.

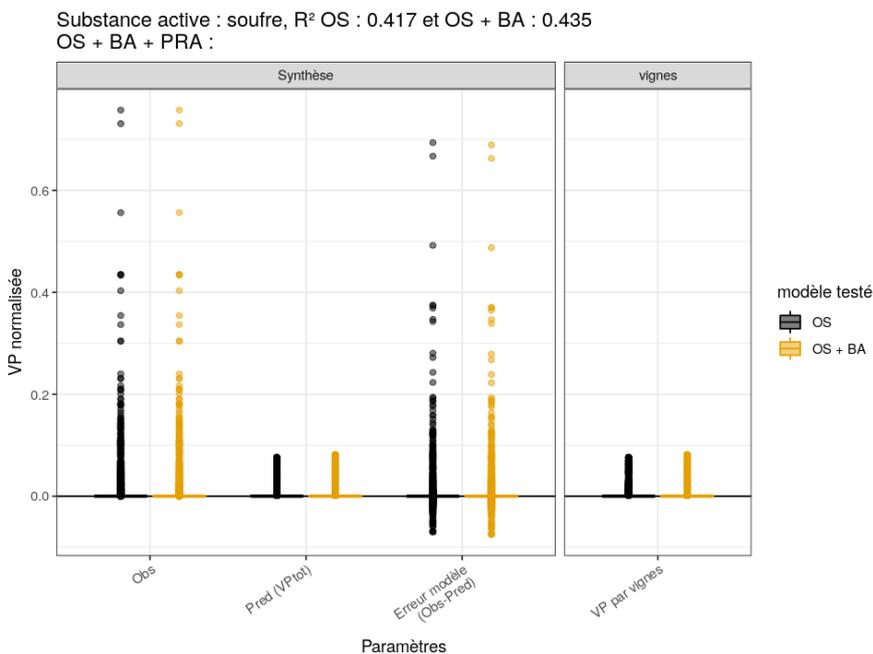


Fig 2.4.16 : Variations Prédites normalisés (VP / surface totale modélisée PRA) en soufre par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnés, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA). Les valeurs de $R^2_{ajusté}$ des différents modèles sont présentées dans le titre.

Cyperméthrine

La cyperméthrine est une substance active vendue par l'intermédiaire de 29 AMM, incluant 2 AMM, BELEM et COPMETHRINE qui représentent environ 70% des quantités vendues entre 2014 et 2017 (**Fig. 2.4.17**). La cyperméthrine est largement utilisée pour la lutte contre les ravageurs des récoltes stockées, mais cet usage spécifique est exclu de cette étude et seul les usages "au champ" sont pris en compte. Elle est classée comme insecticide (**Annexe B.4**) et les 2 AMM principaux ont des usages autorisés sur la période d'étude sur différents ravageurs (ravageurs du sol, chenille, puceron, coléoptère et pyrale) sur des cultures de maïs, sorgho, tournesol, céréales à paille, des cultures protéagineuses, oléagineuses, plantes à fibre (lin) et d'autres légumes fleurs (choux). Comme le glyphosate, la cyperméthrine est une substance à large spectre d'action qui devrait, *a priori*, être associée à des pressions en bioagresseurs.

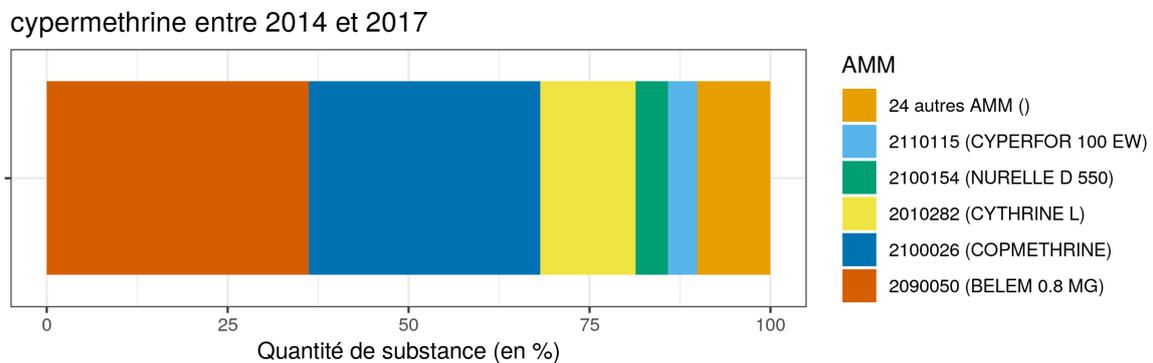


Fig. 2.4.17 : Part (en %) par AMM de la quantité de cyperméthrine vendue dans le BNV-d Registre segment agricole - UA, hors AMM stockage, entre 2014 et 2017. Seules les parts des 5 AMM les plus importantes sont représentées, par ordre croissant de gauche à droite.

La **Fig. 2.4.18** représente les statistiques de ventes de la cyperméthrine issus de la BNV-d Registre en fonction des années et des PRA. On remarque que, comme le glyphosate, les ventes sont relativement réparties sur la France métropolitaine, avec une quantité importante dans le département des Pyrénées Atlantiques (PRA 40382, Chalosse).

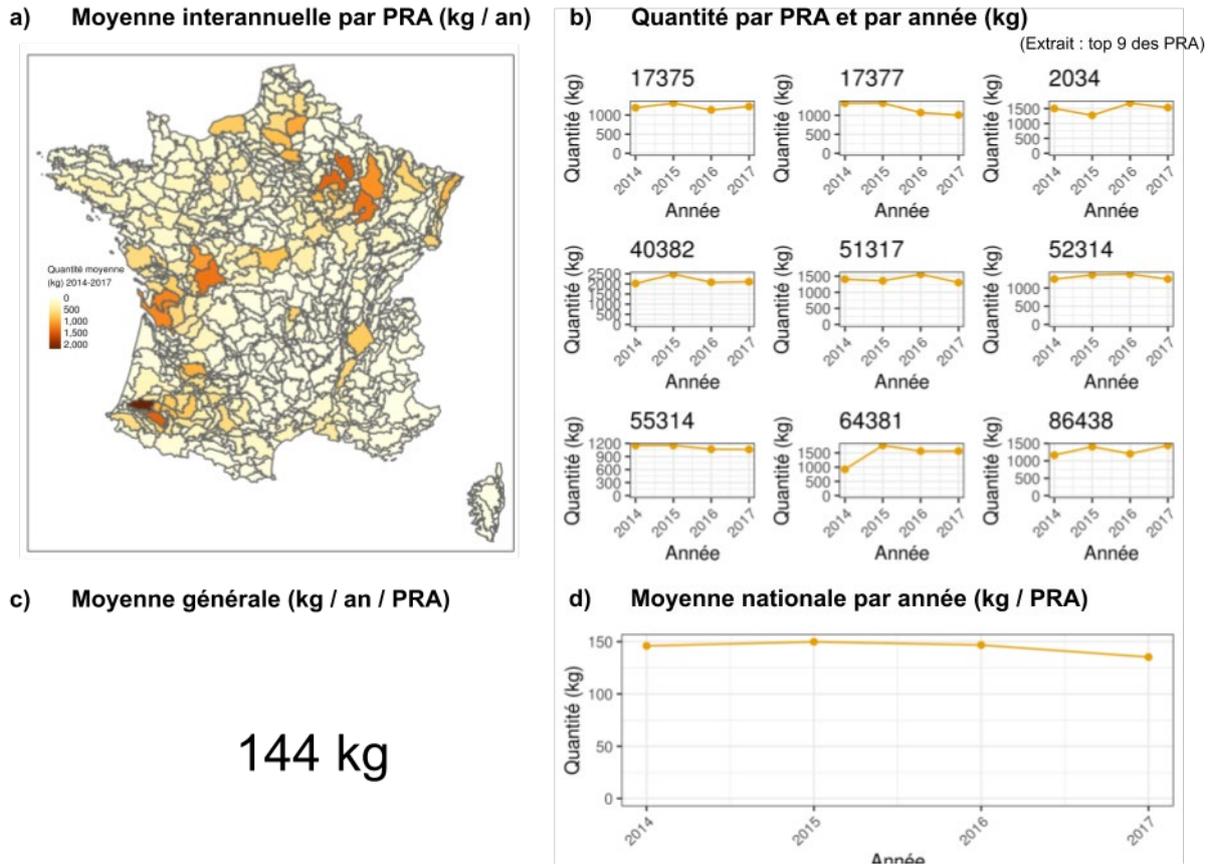


Fig. 2.4.18 : Variabilité temporelle et spatiale des quantités vendues de cyperméthrine entre 2014 et 2017 : a) moyenne interannuelle des quantités vendues dans chaque PRA, b) Evolution temporelle des quantités vendues dans les 9 PRA les plus importantes en terme de quantités totales vendues, c) moyenne des quantités sur la période et l'ensemble des PRA et d) moyenne nationale des quantités pour chaque année.

Les Fig. 2.4.19-21 nous montrent que les quantités de cyperméthrine varient en fonction des surfaces de tournesol et des surfaces de blé tendre attaquées par des pucerons d'automne respectivement pour les modèles " $Q_{SA} \sim OS + BA$ " et " $Q_{SA} \sim OS + BA + PRA$ ". Des corrélations apparaissent très légèrement sur les deux figures et le tournesol est sélectionné dans les deux modèles (coefficient > 0 kg/ha). On remarque que l'ajout d'un effet local (PRA) semble révéler un effet plus grand des surfaces en tournesol, le coefficient passant de 0.004 kg/ha à 0.025 kg/ha, ainsi qu'un effet des pressions en pucerons d'automne sur blé tendre (0.002 kg/ha).

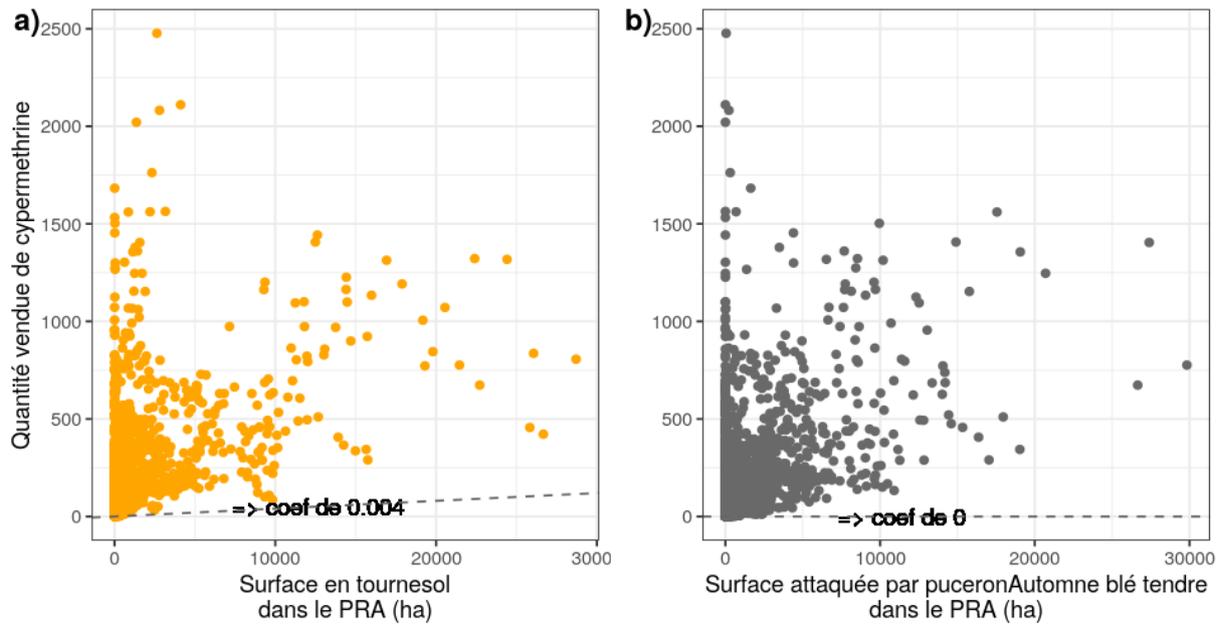


Fig 2.4.19 : Quantités vendues de cyperméthrine (kg) par année et par Petite Région Agricole (PRA) selon a) les surfaces en tournesol et b) les surfaces de blé tendre attaquées par des pucerons d'automne (hectares). Les coefficients obtenus pour chacune des occupations du sol par le modèle Lasso " $Q_{SA} \sim OS + BA$ ", ainsi que la droite correspondante ($y = \text{coef} \cdot x$), sont indiqués sur les graphiques correspondants.

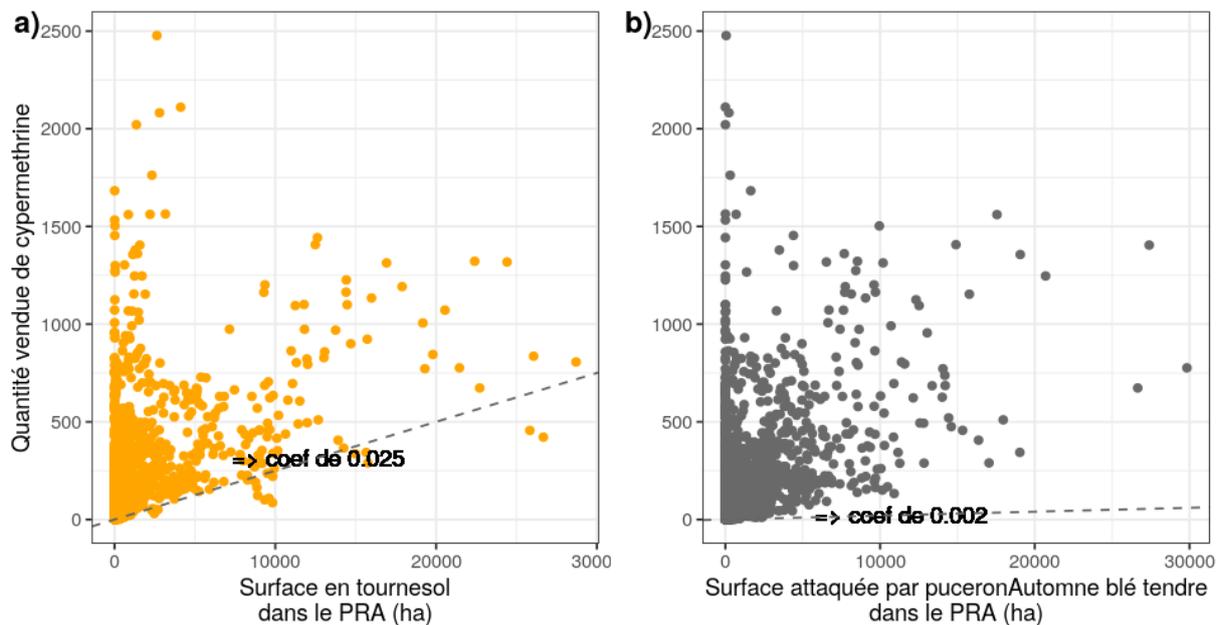


Fig 2.4.20 : Quantités vendues de cyperméthrine (kg) par année et par Petite Région Agricole (PRA) selon a) les surfaces en tournesol et b) les surfaces de blé tendre attaquées par des pucerons d'automne (hectares). Les coefficients obtenus pour chacune des occupations du sol par le modèle Lasso " $Q_{SA} \sim OS + BA + PRA$ ", ainsi que la droite correspondante ($y = \text{coef} \cdot x$), sont indiqués sur les graphiques correspondants.

En tout état de cause, les coefficients bien que faibles sont non nuls pour un grand nombre d'occupations du sol (Fig. 2.4.21). La corrélation surprenante avec les voies SNCF, témoin négatif dans cette expérience car les produits pour les voies SNCF ne sont pas achetés localement, régresse nettement avec la prise en compte d'un effet PRA, au profit d'abord de la variabilité directement expliquée par l'effet

PRA et dans une moindre mesure par le tournesol et les vignes. On peut se demander si la quantité de cyperméthrine est si difficile à modéliser à partir des occupations du sol parce que les substances insecticides utilisées sont hautement variables d'une PRA à une autre.

Substance active : cyperméthrine, R^2 OS : 0.623 et OS + BA : 0.623
OS + BA + PRA : 0.958

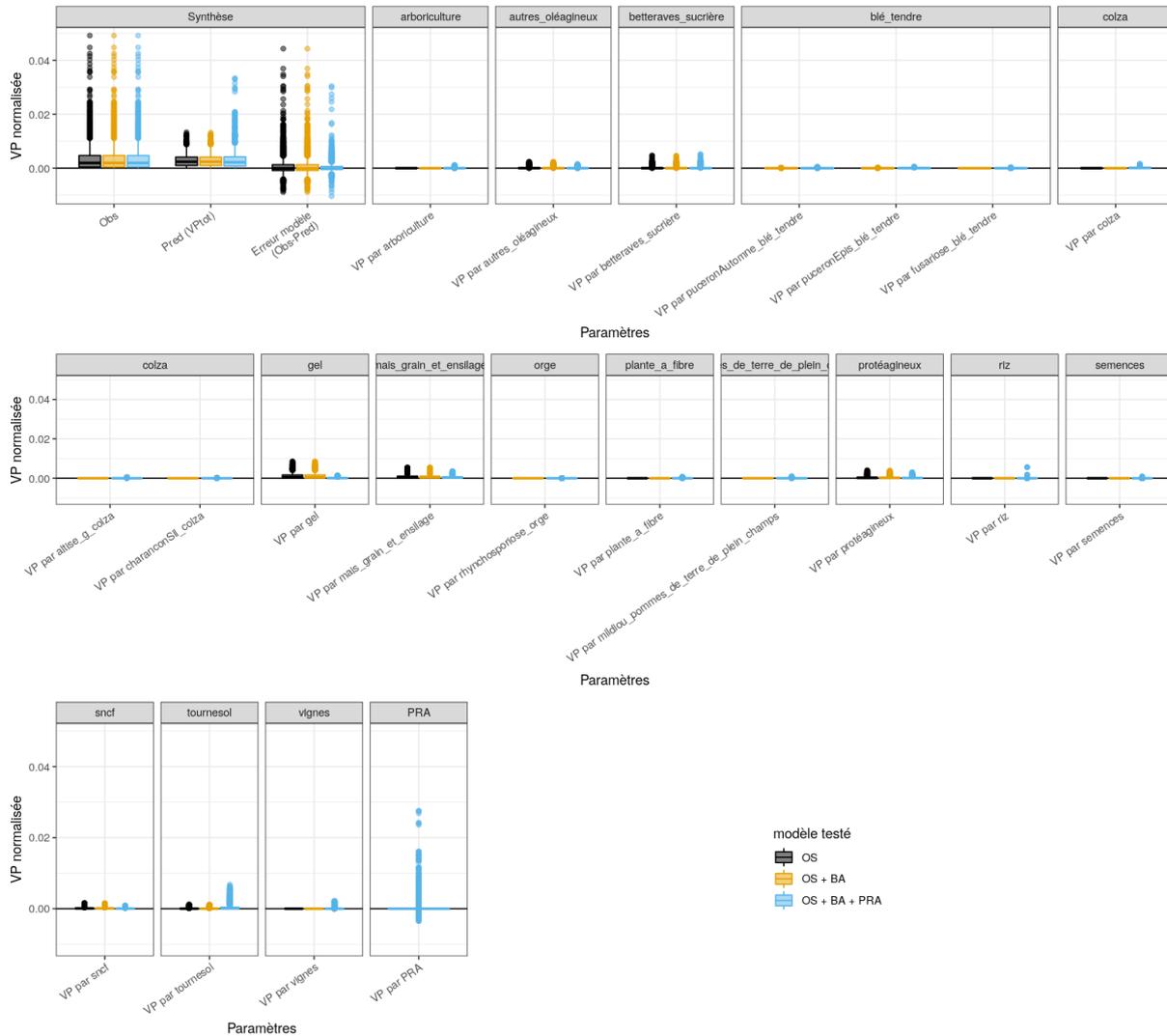


Fig 2.4.21 : Variations Prédites normalisées (VP / surface totale modélisée PRA) en cyperméthrine pour chaque année et chaque PRA par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnés, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA). Les valeurs de $R^2_{ajusté}$ des différents modèles sont présentées dans le titre.

Expliquer les variations des ventes par les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs

Dans cette partie, nous allons analyser la capacité des modèles réalisés à expliquer les variations des ventes de l'ensemble des produits phytosanitaires. Encore une fois, ces modèles étant corrélatifs, les résultats présentés dans cette section n'impliquent pas nécessairement une causalité, c'est-à-dire que les ventes expliquées par les surfaces d'occupations du sol et des pressions de bioagresseurs ont été véritablement utilisées sur ces surfaces ou pour répondre à ces pressions de bioagresseurs. Le détail des résultats obtenus, leur cohérence et leur signification, notamment en termes d'utilisation réelle des produits, sont surtout commentés dans les sections suivantes.

Effet de l'occupation du sol et de la pression de bioagresseurs selon les unités d'agrégation de la BNVD

Cette section vise à déterminer quelles unités d'agrégation de la BNVD les occupations du sol et les bioagresseurs permettent d'expliquer (**Q1.1**).

Observations générales sur les différents niveaux d'agrégation

Dans cette sous-partie nous présentons d'abord brièvement le tableau et la figure qui résument nos observations puis nous présentons l'interprétation que nous en faisons. Avant de nous focaliser, dans la sous-partie suivante, sur les résultats obtenus au niveau des fonctions.

Le **Tableau 2.4.7** présente une synthèse des résultats des modèles de référence ($\sim OS + BA$) pour les différentes unités d'agrégation de la BNVD (Q_{AMM} , Q_{SA} ou NODU). Comme la modélisation ne peut pas toujours être menée à bien pour toutes les substances ou AMM, nous indiquons ici la part des substances ou AMM qui n'ont pas pu franchir chaque étape. Nous présentons ensuite la capacité des modèles ajustés résultants pour expliquer les ventes de substances ou d'AMM individuelles ($R^2_{ajusté}$ moyen, pondéré ou non par le NODU). Enfin nous présentons la capacité de ces modèles à décrire la variabilité du NODU général UA, sur l'ensemble des PRA et des années ($R^2_{ajusté}$ sur NODU reconstitué).

La **Fig. 2.4.22** illustre plus précisément la capacité explicative des modèles ($Q \sim OS + BA$) par substance ou AMM sous la forme d'une densité de probabilité⁴³ des $R^2_{ajustés}$. Sont aussi représentées les valeurs

⁴³ Les densités de probabilité des $R^2_{ajusté}$ sont une représentation de la distribution des $R^2_{ajusté}$. L'ordonnée de la courbe est proportionnelle au nombre d'AMM ou de SA correspondant au $R^2_{ajusté}$ en abscisse, avec la contrainte que l'aire sous la courbe de la densité soit égale à 1. Cette version continue des histogrammes a l'avantage de permettre de représenter plusieurs distributions conjointement sur une figure ce qui est difficile pour des histogrammes.

ponctuelles de $R^2_{\text{ajusté}}$ obtenues d'une part pour NODU toutes substances et d'autre part pour la QSA toutes substances.

Tableau 2.4.7 : Synthèse de notre capacité à modéliser les ventes de produits phytosanitaires en fonction de l'effet de l'occupation du sol et des bioagresseurs dans les PRA ($\sim OS + BA$), selon l'unité d'agrégation (AMM, substances actives, NODU par fonction ou indicateurs totaux).

Unité d'agrégation de la BNVD	Devenir des unités dans le processus de modélisation	Part des unités (nombre)	% de NODU	% de QSA	R^2 ajusté*+ moyen	R^2 ajusté* moyen pondéré par le NODU	R^2 ajusté* sur NODU reconstitués
AMM	non modélisé	31.68% (634)	4.35	3.73	0.164	0.487	0.827
	modèle non convergent	1.9% (38)	0.01	0			
	effet de certaines variables	32.58% (652)	89.55	85.48			
	aucun effet des variables	33.83% (677)	6.09	10.79			
Substances actives	non modélisée	13.38% (42)	0.28	0.06	0.487	0.726	0.922
	modèle non convergent	0% (0)	0	0			
	effet de certaines variables	68.79% (216)	98.36	94.88			
	aucun effet des variables	17.83% (56)	1.36	5.07			
NODU par fonction	non modélisées	0% (0)	0	-	0.722	0.926	0.954
	modèle non convergent	0% (0)	0	-			
	effet de certaines variables	85.7% (6)	99.92	-			
	aucun effet des variables	14.3% (1)	0.7	-			
QSA agricole - UA	-	100% (2)		100	R^2 ajusté*** : 0.865		
NODU agricole - UA	-	100% (2)	100		R^2 ajusté*** : 0.954		

* Les AMM ou les substances actives non modélisées ne sont pas prises en compte dans ces calculs de $R^2_{\text{ajusté}}$. Celles qui n'ont pas d'effet des OS et BA ou dont le modèle ne converge pas ont un R^2 fixé à 0. ** La QSA totale et le NODU total sont modélisés sans difficulté, chacun avec un seul modèle pour lequel on obtient bien des effets des occupations du sol.

+ NODU par fonction : le détail des $R^2_{\text{ajustés}}$ pour les fonctions principales est disponible dans le **Tableau 2.4.8**. Le NODU nématicides (3 substances) est le seul NODU à n'avoir aucun effet des variables OS et BA.

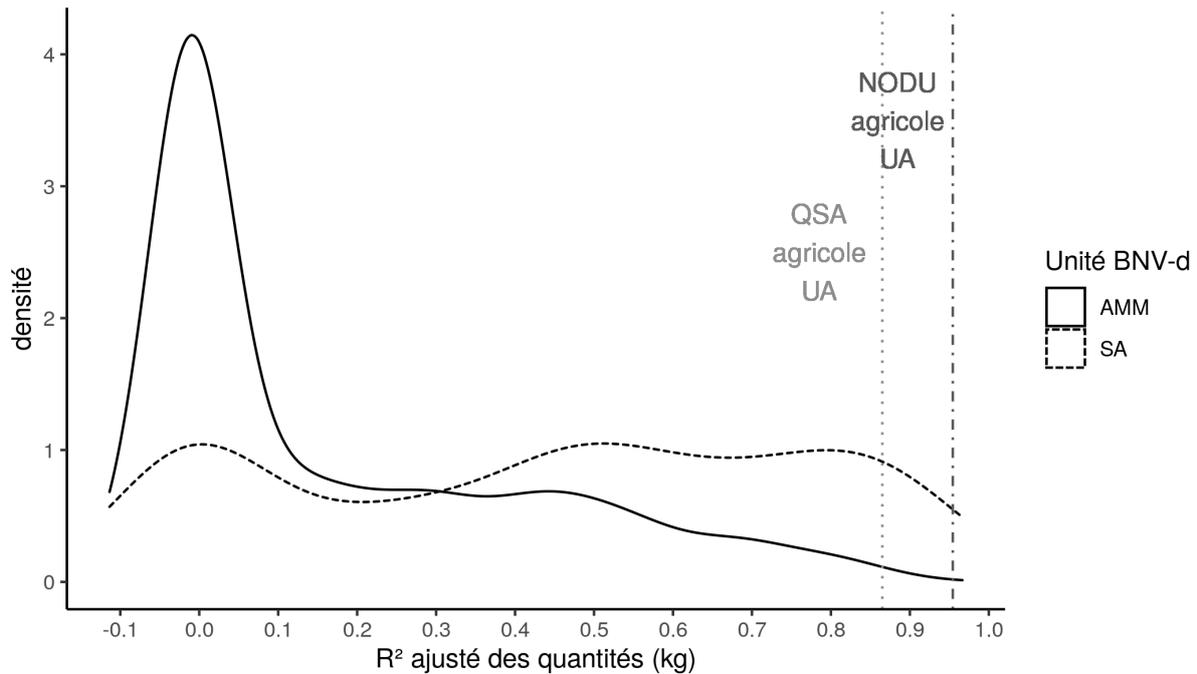


Fig 2.4.22. Densité³⁸ des $R^2_{ajusté}$ des modèles $\sim OS + BA$ sur les quantités des produits (AMM, ligne noire pleine) et des substances actives (SA, ligne noire pointillée) modélisées (y compris non convergents pour lesquels les $R^2_{ajusté}$ sont marqués à 0). Les R^2 des modèles sur le NODU et la QSA agricole - UA sont représentés par des barres verticales avec deux niveaux de gris.

On peut déduire du **Tableau 2.4.7**, que les quantités d'AMM et de substances actives qui contribuent le plus au NODU sont les mieux expliquées par les occupations du sol et les bioagresseurs. En effet, les moyennes pondérées par le NODU des $R^2_{ajusté}$ des AMM (0.49) et des substances actives (0.73) sont très supérieures aux moyennes arithmétiques des $R^2_{ajusté}$. Bien qu'on ne trouve pas d'effets des occupations du sol ou des bioagresseurs pour une part non négligeable des AMM (36 %) ou des substances actives (18 %), les AMM ou substances actives qui sont expliquées par des variables représentent la majeure partie du NODU, respectivement 89 et 96 %. Enfin, les modélisations individuelles par AMM ou substance active semblent bien modéliser ensemble le NODU total reconstitué⁴⁴ ($R^2_{ajusté} > 0.8$). Le NODU dans son ensemble s'explique donc bien par la somme des modèles par AMM mais surtout par la somme des modèles par substance.

⁴⁴ Vu le calcul de $R^2_{ajusté}$ effectué, le NODU total que les AMM et les substances parviennent à reproduire est tronqué c'est seulement la part qui est effectivement inclus dans les modèles d'AMM ou de substances actives. Autrement dit, les quantités d'AMM et de substances qui ont été retirées car trop proches d'une année d'interdiction ne sont pas incluses dans le NODU reconstitué observé. La capacité des modèles de SA et d'AMM à expliquer le NODU total est donc légèrement inférieure à celle présenté par ce $R^2_{ajusté}$

On note le niveau exceptionnellement haut de la capacité explicative de la variance ($R^2_{\text{ajusté}} = 0.954$) pour la modélisation du NODU total ou reconstitué par fonction, le R^2 maximum étant de 1 et le $R^2_{\text{ajusté}}$ étant nécessairement un peu inférieur à 1. Les modèles avec les indicateurs sont les mieux expliqués par les occupations du sol et les pressions de bioagresseurs, bien que certaines AMM et substances actives, prises individuellement, soient aussi bien voire légèrement mieux expliquées que le NODU ou la QSA totaux (**Fig. 2.4.22**).

Dans l'ensemble, les substances actives sont mieux expliquées par les occupations du sol et les bioagresseurs que les AMM. Pourtant, une sélection plus drastique des AMM ("non modélisé" ; **Tableau 2.4.7**) et de leurs années modélisées (cf. **section 2.4.2**) a été réalisée pour limiter les biais associés aux dates d'autorisation et d'interdiction. Malgré cela, pour une plus grande partie des AMM, les modèles soit n'ont pas convergé, soit n'ont estimé aucun effet des occupations du sol ou des bioagresseurs ("model non convergent" et "aucun effet des variables" ; **Tableau 2.4.7**) d'où un pic beaucoup plus important autour de 0 pour les AMM que pour les substances actives (**Fig. 2.4.22**). Cette meilleure modélisation des substances actives que des AMM se traduit enfin par des moyennes des $R^2_{\text{ajusté}}$ (arithmétique, pondérée ou du NODU reconstitué) toujours inférieures pour les AMM par rapport aux substances actives (**Tableau 2.4.7**).

En résumé, plus l'unité d'agrégation de la BNV-d à expliquer est grande (AMM < SA < fonctions < NODU total), plus la capacité explicative par les occupations du sol et les bioagresseurs ($R^2_{\text{ajusté}}$) semble importante. Comment expliquer les meilleurs résultats obtenus pour des variables expliquées plus agrégées ? On sait que les AMM sont associées à un nombre plus limité d'usages que les substances actives, et donc que les cultures (~ occupations du sol) sur lesquelles elles sont utilisées sont moins nombreuses. De même, les indicateurs QSA ou NODU recouvrent l'ensemble des usages et sont donc beaucoup moins spécifiques que les substances actives ou les AMM. En conséquence de leur spécificité d'usage, on aurait pu s'attendre à ce qu'elles donnent de meilleurs résultats dans la modélisation que les plus grandes unités d'agrégation (SA, NODU). Cependant, les meilleures capacités explicatives pour les unités d'agrégation les plus grandes ($R^2_{\text{ajusté}} \text{ NODU} > R^2_{\text{ajusté}} \text{ SA} > R^2_{\text{ajusté}} \text{ AMM}$) semblent indiquer le contraire. Premièrement, l'agrégation permet de masquer d'éventuelles unités (AMM, SA) qui ne sont

pas liées à l'occupation du sol ou aux bioagresseurs mais qui représentent un très faible volume en comparaison des autres unités. Ce phénomène est visible dans les meilleures performances des statistiques de $R^2_{\text{ajusté}}$ prenant en compte l'importance sur le NODU ($R^2_{\text{ajusté}} \text{ NODU reconstitué} > R^2_{\text{ajusté}} \text{ pondéré} > R^2_{\text{ajusté}} \text{ moyen}$). Il est aussi possible que certaines petites unités d'agrégation n'aient pas assez de données sur la période pour que le modèle converge ou trouve des effets des variables (voir liste des AMM et substances avec un faible $R^2_{\text{ajusté}}$ **Annexe G**). Alors que si ces unités sont agglomérées à d'autres unités qui ont des usages similaires (cultures ou bioagresseurs identiques), comme, par exemple, l'ensemble des AMM qui contiennent du chlorothalonil, la modélisation a plus de chances de donner des résultats. Ce phénomène est d'autant plus important que nous avons dû retirer, à certaines AMM ou substances, certaines années d'observation qui était trop proche d'années d'interdiction. La spécificité des AMM ou des substances ne retire rien à leur possible redondance pour une culture et un usage. Leurs utilisations peuvent donc varier entre les différents bassins agricoles et les années de manière indépendante de l'objectif sanitaire. On sait que certaines AMM sont, par exemple, plus conseillées que d'autres sur certains territoires ou zones d'influence commerciale et que les stratégies commerciales promouvant des AMM fluctuent au cours du temps. Les unités d'agrégation les plus grandes peuvent être vues comme un moyen de masquer ces tendances locales et de révéler les objectifs sanitaires en termes de cultures et de bioagresseurs.

On note également que les variations de **NODU sont beaucoup mieux expliquées que celles de la QSA (Fig. 2.4.22 et Tableau 2.4.7)**, un passage de 0.865 à 0.954 du $R^2_{\text{ajusté}}$ correspond en effet à une division par 3 de la somme des erreurs. Ces résultats confirment que le NODU traduit mieux que la QSA les variations d'utilisation de produits phytosanitaires. Ils sont aussi très cohérents avec l'amélioration de la capacité explicative des variations avec l'agrégation déjà décrite : l'agrégation des ventes évite d'être induit en erreur par des substitutions entre produits et substances dans le temps et dans l'espace mais à condition de la faire correctement, c'est à dire en prenant en compte les différences de poids reflétés par les DU.

D'après ces analyses, il semble que certaines unités d'agrégation de la BNV-d permettent de mieux expliquer les ventes par les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs. En conséquence, nous

avons privilégié, dans la suite du rapport, l'analyse des substances actives à celle des AMM, et l'analyse des indicateurs NODU (total ou par fonction) à l'indicateur QSA.

Focus sur les agrégations par fonction

Sur la **Fig. 2.4.23**, nous représentons les distributions des $R^2_{\text{ajusté}}$ des résultats de modèles de substances actives par fonction ainsi que le $R^2_{\text{ajusté}}$ du modèle ajusté sur chaque NODU par fonction. Ces derniers sont précisés dans le **Tableau 2.4.8**. On constate que les fonctions herbicides, fongicides, substances de croissance et insecticides sont bien expliquées. Les $R^2_{\text{ajusté}}$ obtenus par les NODU par fonction associés sont élevés ($R^2_{\text{ajusté}} > 0.85$; **Tableau 2.4.8**) et ceux des substances actives correspondantes, à part les insecticides, forment un pic entre 0.4 et 0.9 (**Fig. 2.4.23**). Les herbicides, que l'on considère le NODU ou les substances, ont des $R^2_{\text{ajusté}}$ nettement supérieurs à ceux des autres fonctions, suivi par les fongicides, les substances de croissance et les insecticides.

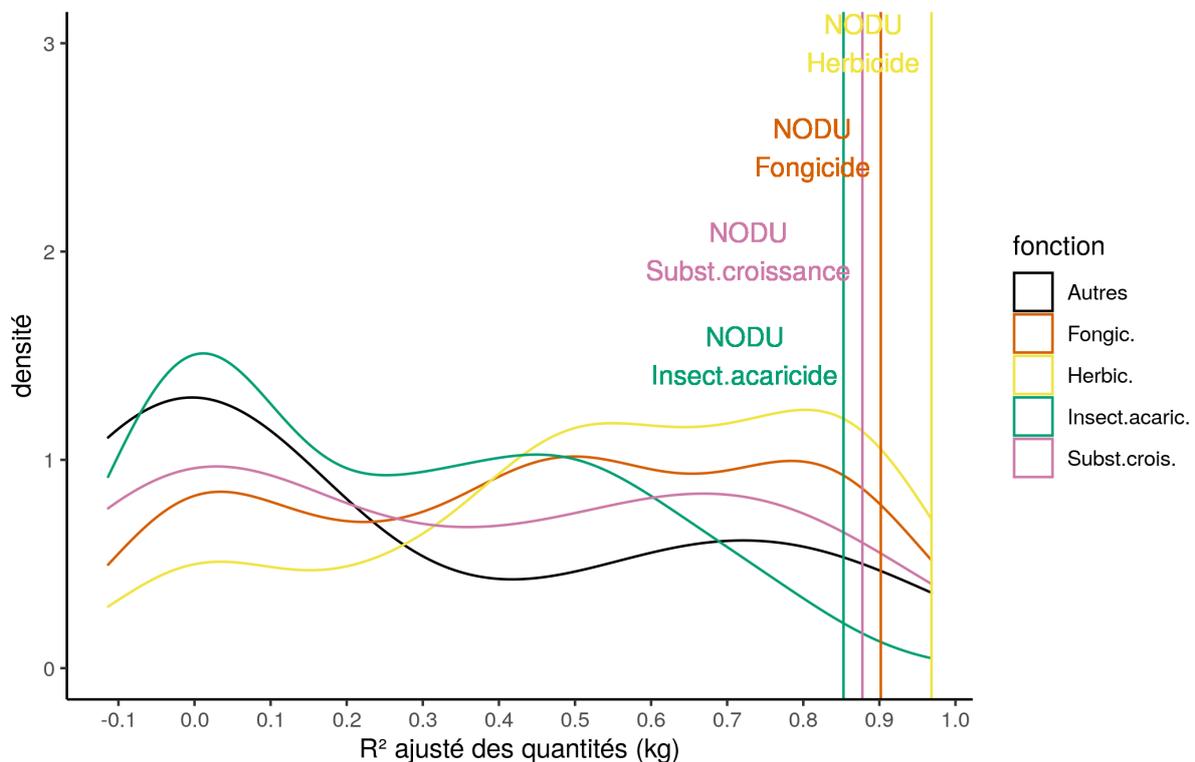


Fig. 2.4.23 : Distribution des $R^2_{\text{ajusté}}$ des modèles $Q_{S4} \sim OS + BA$ sur les quantités des substances actives selon leur fonction (couleur). Les $R^2_{\text{ajusté}}$ des modèles sur les NODU par fonction sont représentés par des barres verticales en couleur. Les NODU nématicides, ND et Autres ne sont pas ajustés en tant que tel, mais la courbe "Autres" représente la distribution des $R^2_{\text{ajusté}}$ des substances des fonctions correspondantes, qui elles sont ajustées individuellement.

Tableau 2.4.8 : Comparaison des $R^2_{\text{ajustés}}$ par fonction selon s'ils sont issus de la modélisation des NODU par fonction ($R^2_{\text{ajusté}}$ du NODU par fonction) ou s'ils sont la moyenne des $R^2_{\text{ajusté}}$ des substances de chaque fonction, pondérée par la part de NODU par fonction correspondant ($R^2_{\text{ajusté}}$ moyen des substances actives pondérées par le NODU par fonction).

Fonction	R² ajusté du NODU par fonction	R² ajusté moyen des substances actives pondérées par le NODU par fonction	% de NODU correspondant
Herbicides	0.968	0.729	42.4
Fongicides	0.902	0.744	33.2
Substances de croissance	0.878	0.763	3.52
Insecticides (dont acaricides)	0.853	0.562	13.7

Comme observé précédemment, on constate que globalement les unités plus agrégées, ici les indicateurs déclinés en fonction, semblent mieux expliqués que les substances regroupées par fonction ($R^2_{\text{ajusté}}$ pondéré des substances vs $R^2_{\text{ajusté}}$ des NODU par fonction; **Tableau 2.4.8**). Cependant, la séparation des ventes en différentes fonctions, contrairement à celles en AMM ou en substances actives, ne semble pas altérer la capacité explicative du modèle \sim OS + BA. En effet, le $R^2_{\text{ajusté}}$ du NODU agricole UA ($R^2_{\text{ajusté}} = 0.95$; **Tableau 2.4.7**) est équivalent aux $R^2_{\text{ajusté}}$ du NODU reconstitué par les NODU par fonction ($R^2_{\text{ajusté}} = 0.95$; **Tableau 2.4.7**). On remarque également que la séparation par fonction améliore encore la capacité à décrire la variabilité des ventes d'herbicides : le NODU *herbicides* ($R^2_{\text{ajusté}} = 0.97$; **Tableau 2.4.8**) est encore mieux expliqué par les occupations du sol et les bioagresseurs que le NODU agricole - UA totale.

Parts de variations expliquées respectivement par l'occupation du sol et par les bioagresseurs

Cette section vise à déterminer si les ventes sont expliquées plutôt par les occupations du sol ou plutôt par les pressions de bioagresseurs (**Q1.2**). Elle présente puis interprète les résultats pour les modèles \sim OS + BA et \sim OS. Le modèle plus complet et plus prédictif incluant un effet PRA est présenté dans la section suivante.

Présentation des résultats

La **Fig. 2.4.24** présente les $R^2_{\text{ajusté}}$ obtenus pour les substances actives et le NODU pour un modèle avec les occupations du sol seules (\sim OS) ou avec les occupations du sol et les bioagresseurs (\sim OS + BA). On constate que l'ajout des bioagresseurs améliore légèrement la capacité explicative des ventes de substances actives, du NODU et de ses déclinaisons. La forme de la distribution des $R^2_{\text{ajusté}}$ (**Fig. 2.4.24a**) et les $R^2_{\text{ajusté}}$ des indicateurs NODU (**Fig. 2.4.24b**) sont similaires entre les deux modèles. On remarque cependant que certaines substances sont bien améliorées par l'ajout des bioagresseurs (diminution du pic sur 0 et augmentation du pic sur 0.85; **Fig. 2.4.24a**) et que le $R^2_{\text{ajusté}}$ du NODU est un peu supérieur. D'après les bioagresseurs pris en compte (ravageurs et maladies fongiques), on pouvait attendre un effet des pressions en bioagresseurs sur les ventes de produits fongicides et insecticides et aucun effet sur les herbicides et les substances de croissance. Seules les substances fongicides et le NODU *fongicides* semblent nettement améliorés par l'ajout des pressions en bioagresseurs (**Fig. 2.4.24b à f**) : le $R^2_{\text{ajusté}}$ du

NODU *fongicides* augmente avec l'ajout des bioagresseurs (**Fig. 2.4.24b**) et le changement de distribution des $R^2_{ajustés}$ des substances fongicides est similaire à celui de l'ensemble des substances.

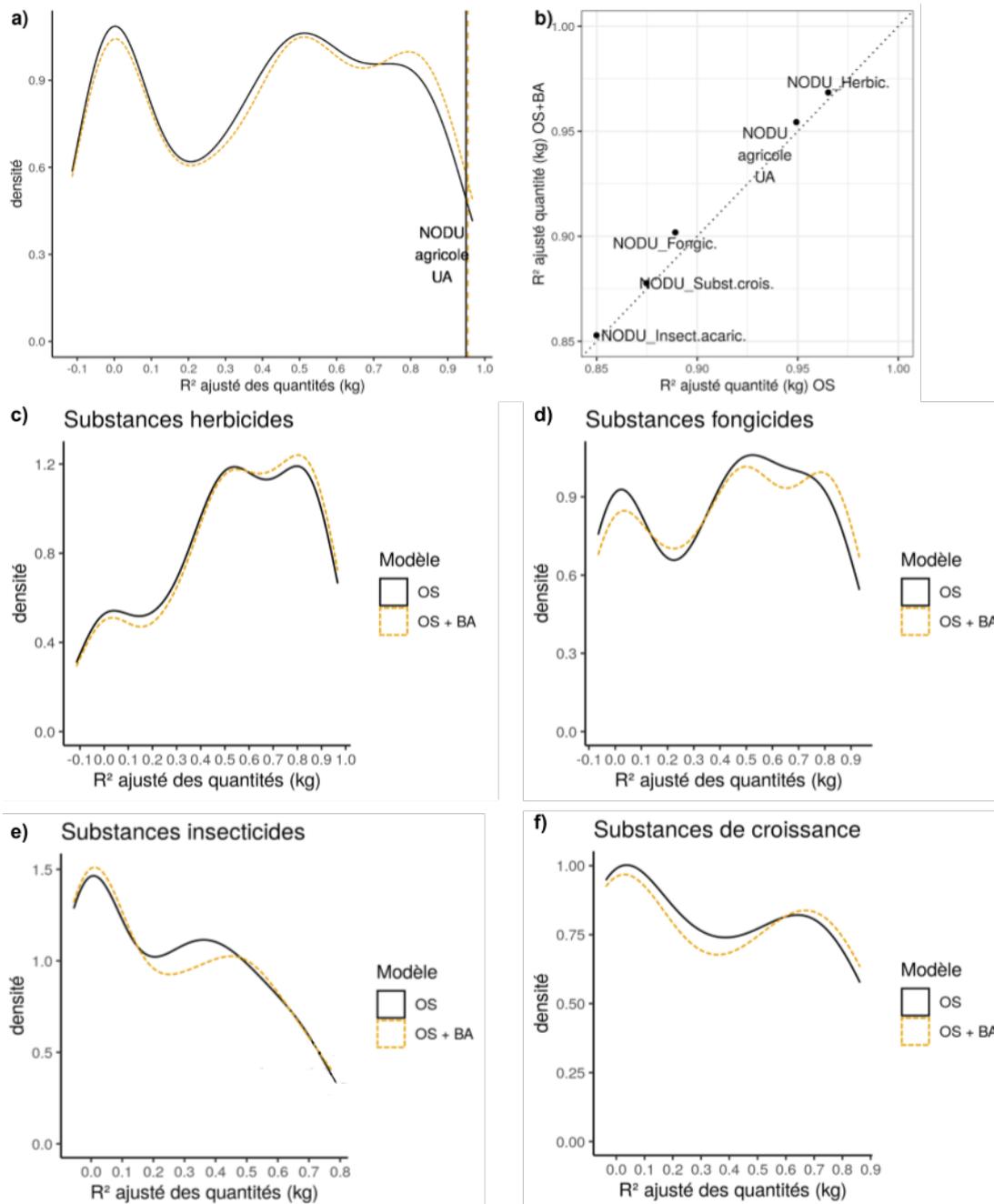


Fig 2.4.24. Distribution des $R^2_{ajustés}$ des modèles $Q_{SA} \sim OS$ (ligne noire pleine) et $Q_{SA} \sim OS + BA$ (ligne orange pointillée) sur les quantités des substances actives (SA) : a) totales, c) herbicides, d) fongicides, e) insecticides et f) substances de croissance. Les $R^2_{ajustés}$ des modèles sur le NODU agricole - UA pour les deux modèles ($\sim OS$ et $\sim OS + BA$) sont représentés par des barres verticales sur la figure a) avec le même code couleur décrit précédemment. b) $R^2_{ajusté}$ des NODU agricoles - UA et ses déclinaisons aux fonctions selon le modèle testé $\sim OS$ ou $\sim OS + BA$.

Si l'amélioration de la capacité explicative est modeste, elle ne préjuge pas ou peu de la part des ventes attribuées par les modèles à l'impact des bioagresseurs. En effet, des variations peu importantes des niveaux de bioagresseurs, mal expliquées par les variations d'occupation du sol, peuvent révéler qu'une

part plus importante des ventes est déterminée par une présence habituelle des bioagresseurs. Des ventes bien expliquées par les occupations du sol dans le modèle $\sim OS$ peuvent l'être encore mieux par le modèle $\sim OS + BA$.

C'est l'objectif de la **Fig. 2.4.25** de représenter la répartition du NODU et des NODUf entre les occupations du sol (VP_{OS}) et les pressions en bioagresseurs (VP_{BA}) dans le modèle $\sim OS + BA$. Dans l'ensemble, la part expliquée par les bioagresseurs est inférieure à celle expliquée par les occupations du sol (modèle $\sim OS + BA$; **Fig. 2.4.25**), ce qui est cohérent avec la faible augmentation de la capacité explicative des modèles lorsqu'on ajoute les bioagresseurs (**Fig. 2.4.24**). En revanche, si les surfaces d'occupation du sol expliquent une bonne part des indicateurs NODU et NODUf (VP_{OS}), elles expliquent peu les variations interannuelles, qui semblent majoritairement causées par des variations de pressions en bioagresseurs (VP_{BA}). Ces résultats sont cohérents avec le fait que les surfaces agricoles, même celles qui sont variables (grandes cultures), varient peu entre les années au niveau des PRA.

La part assez importante expliquée par les pressions en bioagresseurs (VP_{BA}) pour le NODU *fongicides* corrobore le $R^2_{\text{ajusté}}$ supérieur constaté pour le NODU *fongicides* pour le modèle $\sim OS + BA$ par rapport au modèle $\sim OS$ (**Fig 2.4.25b**). En particulier, l'augmentation importante des ventes de fongicides en 2016 est en bonne partie expliquée par les fluctuations liées à la pression de bioagresseurs. La fluctuation des ventes de fongicides aurait sans doute été encore mieux expliquée par la pression si nous avions pris en compte les bioagresseurs sur betterave ou sur vigne, cultures aussi très attaquées par les maladies en 2016.

Les pressions de bioagresseurs expliquent une plus large fraction des ventes d'insecticides et de fongicides que les autres fonctions, mais la fraction qu'elles expliquent pour ces autres fonctions, en particulier celle des substances de croissance, sont surprenantes (voir interprétation des résultats ci-après). (**Fig. 2.4.25c, d et e**).

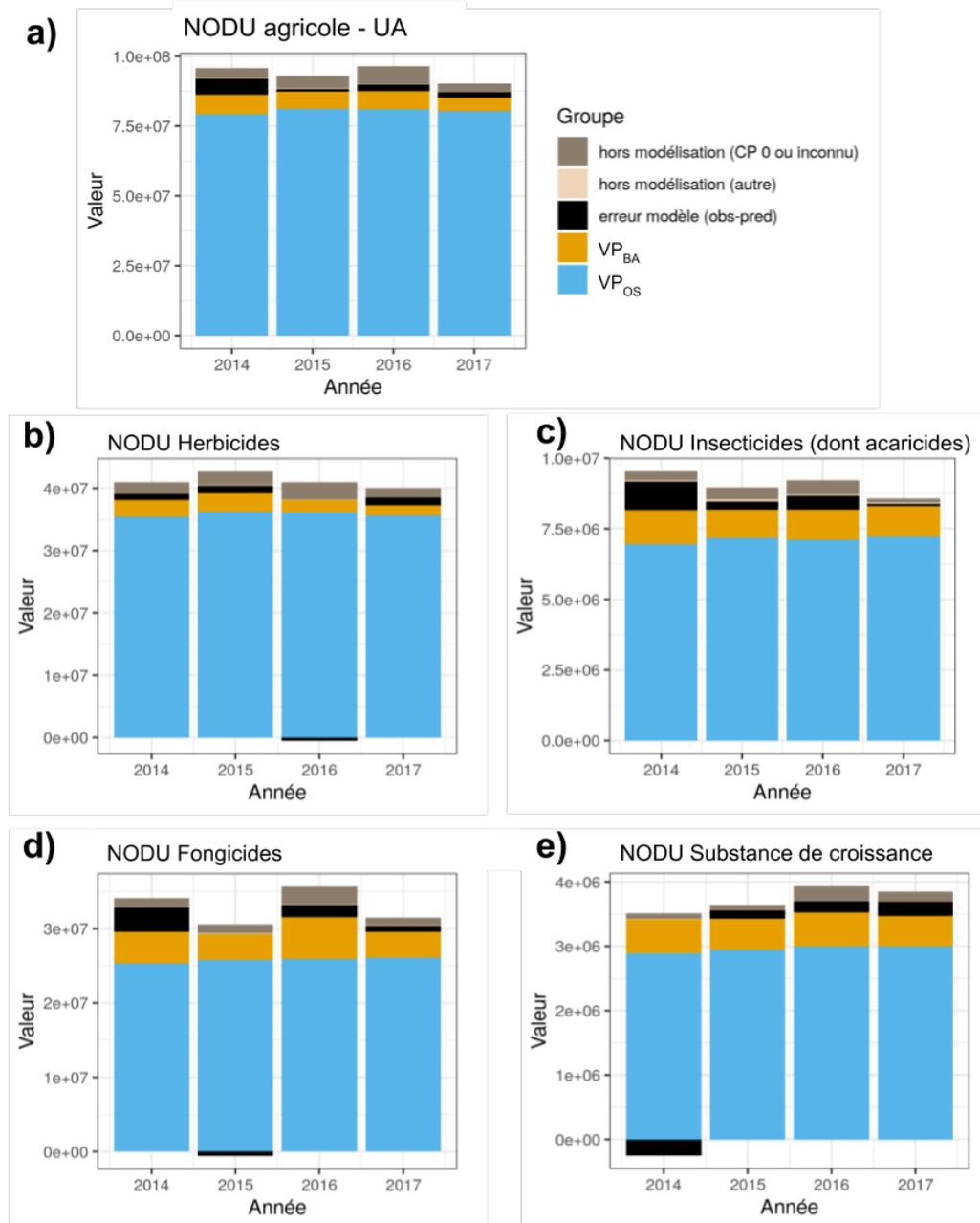


Figure 2.4.25 : Part de variation du NODU expliquée par les occupations du sol (VP_{OS}) et les bioagresseurs (VP_{BA}) (modèle $\sim OS + BA$): a) total et selon les différentes fonctions : b) herbicides, c) insecticides (dont acaricides), d) fongicides et e) Substance de croissance. La part de ces NODU qui n'ont pas été pris en compte dans la modélisation ("hors modélisation") est représenté en beige foncé (liés à un CP à 0 ou inconnu) ou beige clair (autres causes⁴⁵). La part de NODU modélisée mais non expliquée par l'occupation du sol et les pressions en bioagresseurs est représentée en noir (erreur). Si cette erreur est négative, elle est représentée en dessous de 0 (ex: NODU herbicides en 2016).

⁴⁵ vendus sur des PRA de France métropolitaine non prises en compte dans l'analyse

Le **Tableau 2.4.9** précise et complète la **Fig. 2.4.5** en présentant la part de NODU total (en %) expliquée par les pressions en bioagresseurs (VP_{BA}) selon la variable expliquée lors de l'ajustement : NODU total, NODU par fonction mais aussi quantités de substances actives. On confirme que la part de VP_{BA} est toujours plus faible que la part expliquée par les occupations du sol (VP_{OS} / NODU toujours ≥ 60 %), mais qu'elle est plus grande pour les NODU reconstitués, en particulier à partir des substances actives (15.45 % ; **Tableau 2.4.9**). Bien que les modèles sur les substances actives soient globalement moins performants ($R^2_{ajusté}$ du NODU reconstitué inférieur et % d'erreur supérieur), l'effet des bioagresseurs semble plus important lorsqu'on considère les substances séparément les unes des autres. Les modèles de NODU par fonction estiment une part attribuée aux bioagresseurs intermédiaires (9,58%; **Tableau 2.4.9**) mais avec des performances équivalentes au modèle sur le NODU total ($R^2_{ajusté}$ reconstitué équivalent). Ces résultats suggèrent que les données moins agrégées, au sein d'indicateurs par fonction ou de quantités de substances actives, conservent une spécificité permettant de mieux identifier l'effet des pressions en bioagresseurs sur l'utilisation des produits. On note que toutes les variables de pression en bioagresseurs (BA) ont été sélectionnées par l'un ou l'autre des modèles des quantités de substances actives. Ces résultats préliminaires doivent être cependant mis en perspective par une analyse de la cohérence des résultats de ces modèles moins agrégés, travail que nous n'avons pu conduire que de manière préliminaire dans ce rapport (voir section "Analyse préliminaire de la cohérence des résultats des modèles").

Tableau 2.4.9 : Part de NODU expliquée entre 2014 et 2017 (en %) par les pressions en bioagresseurs (BA), dans les modèles $\sim OS + BA$, selon la méthode de calcul du NODU total (directe ou reconstituée). Le pourcentage représenté par l'erreur du calcul du NODU⁴⁶ est précisé. Les $R^2_{ajusté}$ correspondants sont rappelés.

Méthode de calcul du NODU	Modèle	Nombre de variables BA sélectionnées	% de NODU* estimé, expliqué par les BA (VP_{BA})	% d'erreur du NODU modélisé*	R^2 ajusté** du NODU reconstitué
directe	OS + BA	10	6.51	2.93	0.954
reconstituée via les NODU par fonction	OS + BA	16	9.58	3.26	0.954
reconstituée via les substances actives	OS + BA	25	15.45	13.79	0.922

*NODU pris en comparaison ici est le NODU total agricole - UA, hors AMM stockage (inclut les valeurs modélisées et hors modélisation) entre 2014 et 2017. Il est donc identique entre les différentes méthodes de calcul du NODU.

** NODU observé pris en comparaison est le NODU modélisé (sans valeurs hors modélisation) qui diffère légèrement entre les méthodes.

Interprétation des résultats

Cette analyse nous indique que les ventes de substances et les NODU déclinés ou non par fonction sont majoritairement expliquées par les occupations du sol et que l'effet des bioagresseurs semble globalement plus faible. **On ne peut cependant en conclure que l'effet des bioagresseurs est faible ou que les agriculteurs adaptent peu les quantités de produits phytosanitaires qu'ils emploient à la pression exercée par les bioagresseurs, d'une année à l'autre.** Tout d'abord, les pressions de bioagresseurs observées dans cette étude ne représentent pas l'intégralité des pressions existantes. Les pressions de bioagresseurs n'ont pas pu être prises en compte sur plusieurs cultures importantes telles que la vigne, l'arboriculture, le maraîchage ou même la betterave pour les grandes cultures. De plus, y compris sur les cultures pour lesquelles nous avons pris en compte les bioagresseurs, ce sont seulement les bioagresseurs principaux qui sont étudiés. Enfin, l'impact des adventices sur les ventes d'herbicides ne peut être évalué faute de données sur la présence d'adventices.

La vente de certaines substances, herbicides et surtout, substances de croissance est corrélée avec la présence de certains bioagresseurs. Bien que les substances herbicides et de croissance étudiées dans le rapport incluent des usages mixtes qui recourent peut-être quelques usages sur bioagresseurs, ils ne peuvent expliquer la part de NODU associée à des pressions en bioagresseurs. Ces dernières ne sont pas, en toute probabilité, la cause directe de leur utilisation. L'existence d'autres déterminants externes non

⁴⁶ $\frac{\sum(NODU_{obs} - NODU_{pred})}{\sum NODU_{obs}} \cdot 100$

pris en compte dans le modèle, causant à la fois l'utilisation de ces substances et des pressions importantes de bioagresseurs, pourrait expliquer cette corrélation. Pour les ventes d'herbicides, par exemple, cette corrélation 1) pourrait s'expliquer par les conditions météorologiques communes à la présence de ravageurs ou maladies et d'adventices (type hiver doux et pluvieux), les bioagresseurs jouant dans le modèle le rôle d'une approximation de la météo et 2) suggère que la prise en compte des conditions météorologiques pourraient améliorer la prédictibilité des ventes d'herbicides. Les conditions météorologiques sont un déterminant de la pression de bioagresseurs et peuvent influencer de manière directe l'usage de produits phytosanitaires. À titre d'illustration, les conditions automnales de 2019 ont conduit à des semis de céréales tardifs, moins favorables aux levées de graminées automnales et en conséquence, peuvent expliquer une réduction, voire un report des traitements herbicides (dire d'expert).

Les corrélations observées pourraient aussi être dans une certaines mesures des artefacts de la méthode LASSO. Contrairement à d'autres méthodes de régression, cette méthode a l'avantage, déterminant pour cette étude, de pouvoir sélectionner parmi un très grand nombre de variables explicatives celles qui sont les plus pertinentes pour la prédiction. Cependant, cette sélection est soumise à une part d'aléatoire, notamment pour la pression de bioagresseurs qui est techniquement un terme d'interaction entre pression potentielle et surface de cultures sensibles : il peut y avoir une confusion partielle entre surface de la culture et variable de pression de bioagresseurs. C'est particulièrement probable pour les herbicides pour lesquels la part des ventes expliquée par les bioagresseurs est inférieure à 10%.

Par ailleurs, la quantification de la pression de bioagresseurs dans la PRA est issue de données moyennes au niveau départemental, voire au-delà, quand les données n'existaient pas. Il est donc possible que ces approximations tendent à gommer des adaptations locales de quantités utilisées par des agriculteurs, ou des variabilités fortes de la pression de bioagresseurs au sein d'une PRA.

Variabilité interannuelle expliquée

Cette section vise à déterminer si les occupations du sol et les pressions de bioagresseurs permettent d'expliquer les variations interannuelles des ventes (**Q1.3**). Dans une première sous partie nous avons évalué et discuté la capacité du modèle de référence ($\sim OS + BA$) à expliquer les variations interannuelles. Nous avons, ensuite, considéré l'ajout des PRA au modèle de référence ($\sim OS + BA + PRA$) qui améliore nettement l'explication de ces variations. Les deux sous-parties suivantes évaluent comment l'ajout de l'effet des PRA se traduit en terme de variations du NODU total : d'une part, en montrant les différences de NODU obtenues entre PRA et en proposant des interprétations possibles et d'autre part, en évaluant comment l'ajout de l'effet des PRA impacte la prise en compte des pressions de bioagresseurs.

Explication des variations interannuelles par le modèle de référence

Sur la **Fig. 2.4.25**, les variations interannuelles semblent globalement peu expliquées par les variations de surfaces d'occupations du sol ou de pressions en bioagresseurs, ce qui se traduit par la part variable de l'erreur du modèle au niveau national (obs-pred, en noir). Structurellement, les contraintes exercées sur les modèles $\sim OS$ et $\sim OS + BA$ (sans intercept et coefficient OS et BA positifs) font que les quantités sont globalement sous-estimées (erreur Obs - Pred positive), mais elles ne peuvent pas expliquer les variations des erreurs entre les années. On note que les variations interannuelles de certains NODU par fonction, surtout les herbicides et les fongicides, sont légèrement mieux reproduits. De plus, nous avons fait des estimations de la capacité des modèles à expliquer les variations temporelles au niveau des PRA qui montre que les modèles $\sim OS$ et $\sim OS + BA$ expliquent très bien les variations spatiales et très mal les variations temporelles des quantités de substances actives.

Les résultats sur les modèles $\sim OS$ et $\sim OS + BA$ ne signifient pas nécessairement que les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs prises en compte dans cette analyse ne permettent pas d'expliquer les variations interannuelles.

D'une part, on dispose d'un petit nombre d'années (4), surtout en comparaison des observations spatiales (706 PRA), ce qui limite de fait notre capacité à trouver les déterminants des variations temporelles. Les parts de variations temporelles expliquées par les OS et les BA sont également limitées par la part des

NODU que nous n'avons pas prises en compte dans la modélisation ("hors modélisation"), principalement due à des ventes non localisées (CP à 0 ; Fig. 2.4.25). La capacité explicative des modèles est limitée en particulier pour l'année 2016 qui présente une part plus importante de NODU exclue de la modélisation. Ce phénomène est particulièrement visible pour le NODU *fongicides*.

D'autre part, on peut constater que les ventes varient beaucoup plus spatialement que dans le temps (voir variations chlorothalonil, glyphosate, soufre et cyperméthrine, **section "Exemples de substances actives"**). Les variations spatiales auront donc plus d'impact sur la variabilité générale que les variations temporelles.

Enfin, il est possible qu'il y ait d'autres déterminants importants des ventes que nous n'ayons pas pris en compte. Les possibilités sont nombreuses (facteurs climatiques, économiques, sociétaux...), mais les relatives faibles variations temporelles des ventes dans les PRA conduisent à l'hypothèse qu'il existe un effet local important, associé à des pratiques agricoles ou de systèmes de production spécifiques. Les PRA sont, en effet, des zones définies pour leur cohérence agronomique (base agro-pédo-climatique).

Amélioration de l'explication des variations interannuelles avec l'effet des PRA

La **Fig. 2.4.26** montre une comparaison des résultats obtenus pour le modèle de référence ($\sim OS + BA$) et le modèle incluant les PRA ($\sim OS + BA + PRA$). On constate qu'une très grande partie des substances (diminution du pic sur 0 et augmentation importante du pic sur 0.9 ; **Fig. 2.4.26a**), ainsi que l'ensemble des NODU et leurs déclinaisons ($R^2_{ajusté} > 0.96$; **Fig. 2.4.26b**) s'expliquent clairement mieux par le modèle incluant l'effet des PRA. De plus, les modèles $\sim OS + BA + PRA$ montrent de bien meilleurs résultats pour expliquer les variations temporelles des quantités d'un nombre non négligeable de substances actives (**Annexe H**).

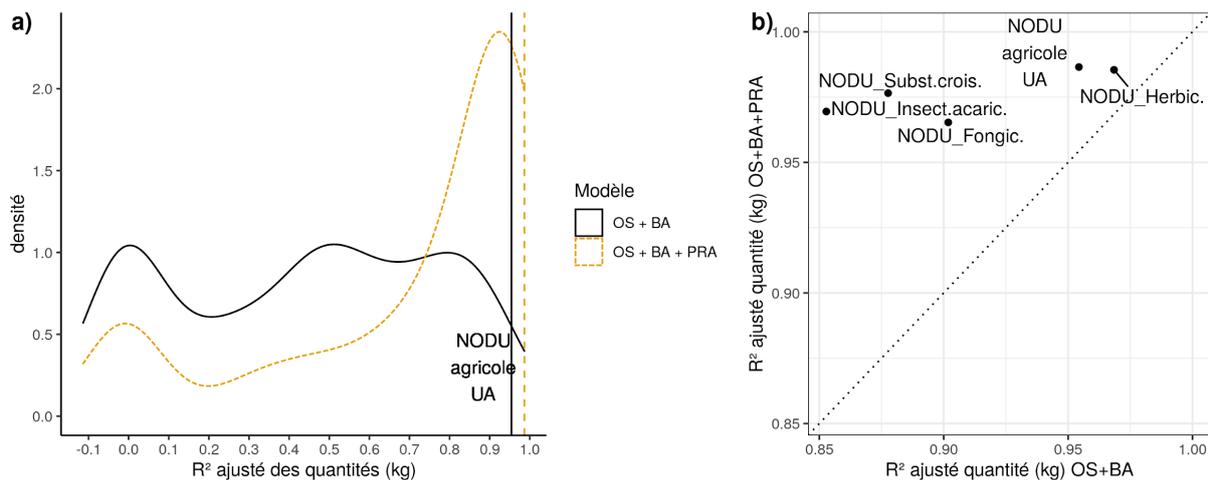


Fig 2.4.26. Distribution des $R^2_{ajusté}$ des modèles $Q_{SA} \sim OS + BA$ (ligne noire pleine) et $Q_{SA} \sim OS + BA + PRA$ (ligne orange pointillée) sur les quantités des substances actives (SA). Les $R^2_{ajusté}$ des modèles sur le NODU agricole - UA pour les deux modèles ($\sim OS + BA$ et $\sim OS + BA + PRA$) sont représentés par des barres verticales selon le même code couleur. b) $R^2_{ajusté}$ des NODU agricoles - UA et ses déclinaisons aux fonctions selon le modèle testé $\sim OS + BA$ ou $\sim OS + BA + PRA$.

Sur la **Fig. 2.4.27**, on peut constater la réduction de l'erreur du NODU total et de ses déclinaisons, ce qui est cohérent avec l'amélioration générale des $R^2_{ajusté}$ des modèles sur ces derniers. En écho à l'augmentation de la capacité explicative des variations temporelles pour les substances actives, les variations temporelles interannuelles nationales des NODU semblent également mieux expliquées avec l'ajout des PRA. Pourtant, le NODU reste principalement expliqué par l'occupation du sol et la présence des bioagresseurs ; la part expliquée par les bioagresseurs (VP_{BA}) augmente même.

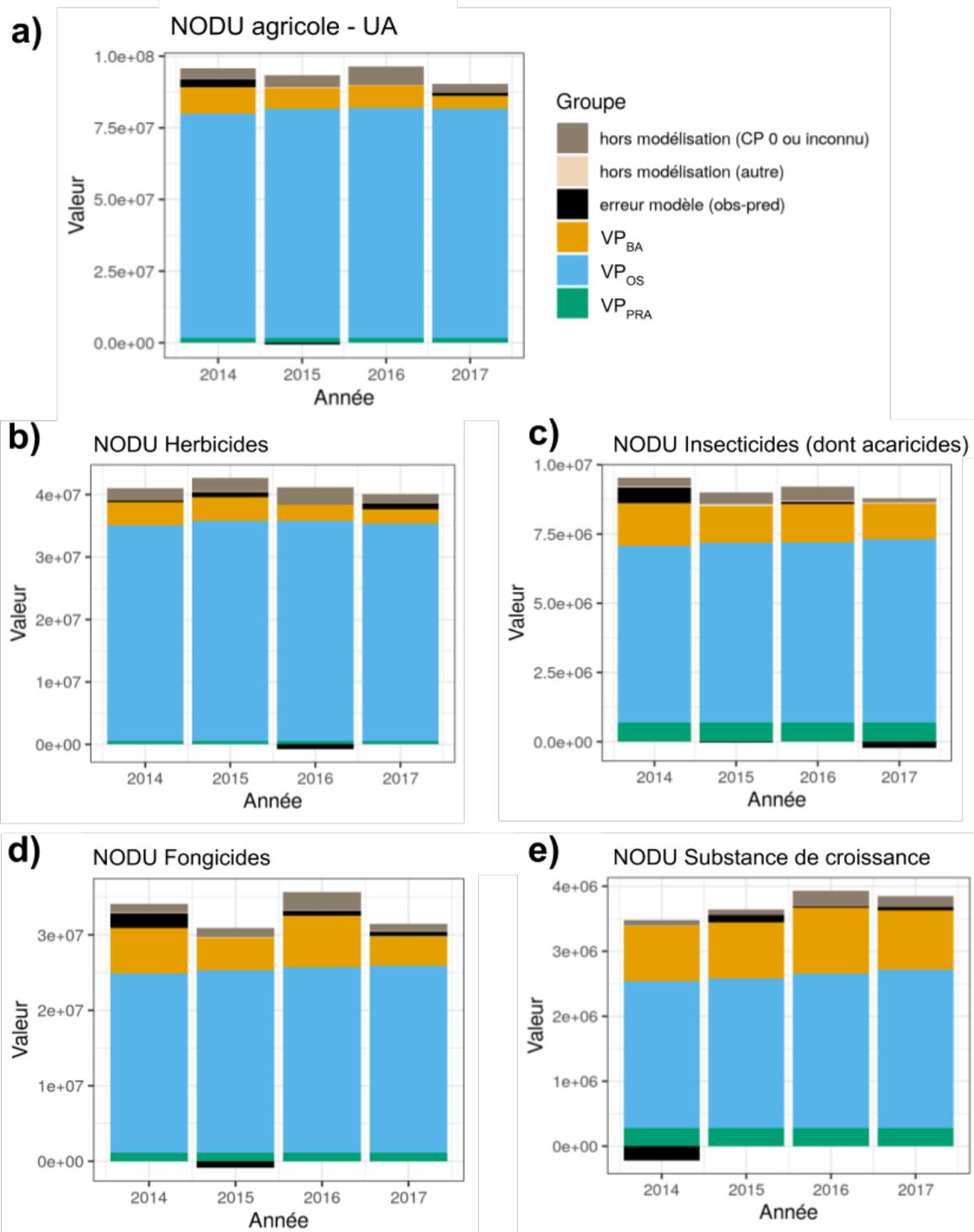


Figure 2.4.27 : Part de variation du NODU expliqué par les occupations du sol (VP_{OS}), les pressions en bioagresseurs (VP_{BA}) et les PRA (VP_{PRA}): a) total et selon les différentes fonctions : b) herbicides, c) insecticides (dont acaricides), d) fongicides et e) Substance de croissance. La part de ces NODU qui n'ont pas été pris en compte dans la modélisation ("hors modélisation") est représenté en beige foncé (liés à un CP à 0 ou inconnu) ou beige clair (autres causes⁴⁷). La part de NODU modélisé mais non expliqué par l'occupation du sol et les pressions en bioagresseurs est représenté en noir (erreur). Si cette erreur est négative, elle est représentée en dessous de 0 (ex: NODU herbicides en 2016), le NODU total observé est alors le haut de la colonne moins cette valeur.

Effet des PRA sur le NODU

⁴⁷ vendus sur des PRA de France métropolitaine non prises en compte dans l'analyse

La **Fig. 2.4.28** est une cartographie des coefficients obtenus pour chaque PRA par le modèle $\sim OS + BA + PRA$. Chaque coefficient représente, pour chaque PRA, l'excès moyen de NODU une fois prises en compte les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs. Pour prendre en compte la taille des PRA, ces coefficients (ici en NODU) ont été rapportés aux Surfaces Agricoles Utiles (SAU, cf. **Annexe B.9**) et s'expriment donc en NODU/ha.

Cette figure permet de constater que l'effet des PRA est très localisé sur certaines PRA, dont un grand nombre présente un coefficient nul ou proche de zéro. Ce résultat est cohérent avec la faible part du NODU expliquée par l'effet PRA montré précédemment. Nous estimons de forts excès en Charente Maritime, en Gironde, dans le Vaucluse et dans la Marne, et un déficit de NODU dans l'Aude, les Pyrénées Orientales et l'Oise. On peut noter que certaines régions viticoles semblent particulièrement concernées par ces effets PRA. Les PRA autour de Reims (champagne) ont les plus forts excès de NODU par hectare de SAU, suivies dans une moindre mesure par des PRA de la région bordelaise, à l'inverse les PRA viticoles du Languedoc-Roussillon affichent un fort déficit de NODU par rapport à leur occupation du sol. Ces différences pourraient être expliquées par des pratiques contrastées dans les vignes de ces deux groupes de territoires d'autant que ces différences sont essentiellement expliquées par les ventes de fongicides, très utilisés sur vigne (**Annexe I**). Ce contraste évoque les différences de prix de vente des vins associés à ces régions, qui sont un facteur important de changement d'utilisation de pesticides d'après la littérature (Rosenheim et al., 2020). D'autres explications sont encore possibles. Pour la région de Reims, il a été notifié par la DRAAF de la région Grand-Est que des maisons de champagne importantes ont leur siège d'exploitation à Reims alors que leur vignoble s'étale sur d'autres PRA. En conséquence, une partie de l'excès constaté sur cette région pourrait être expliqué par un artéfact lié à un décalage spatial entre la zone de vente et celle d'utilisation. Les excès apparents dans les PRA autour de Reims ne peuvent cependant pas être expliqués de cette manière. Par ailleurs, les pressions de bioagresseurs, et notamment de mildiou de la vigne, qui n'ont pas été prises en compte ici faute de temps, pourraient s'avérer très différentes entre ces régions.

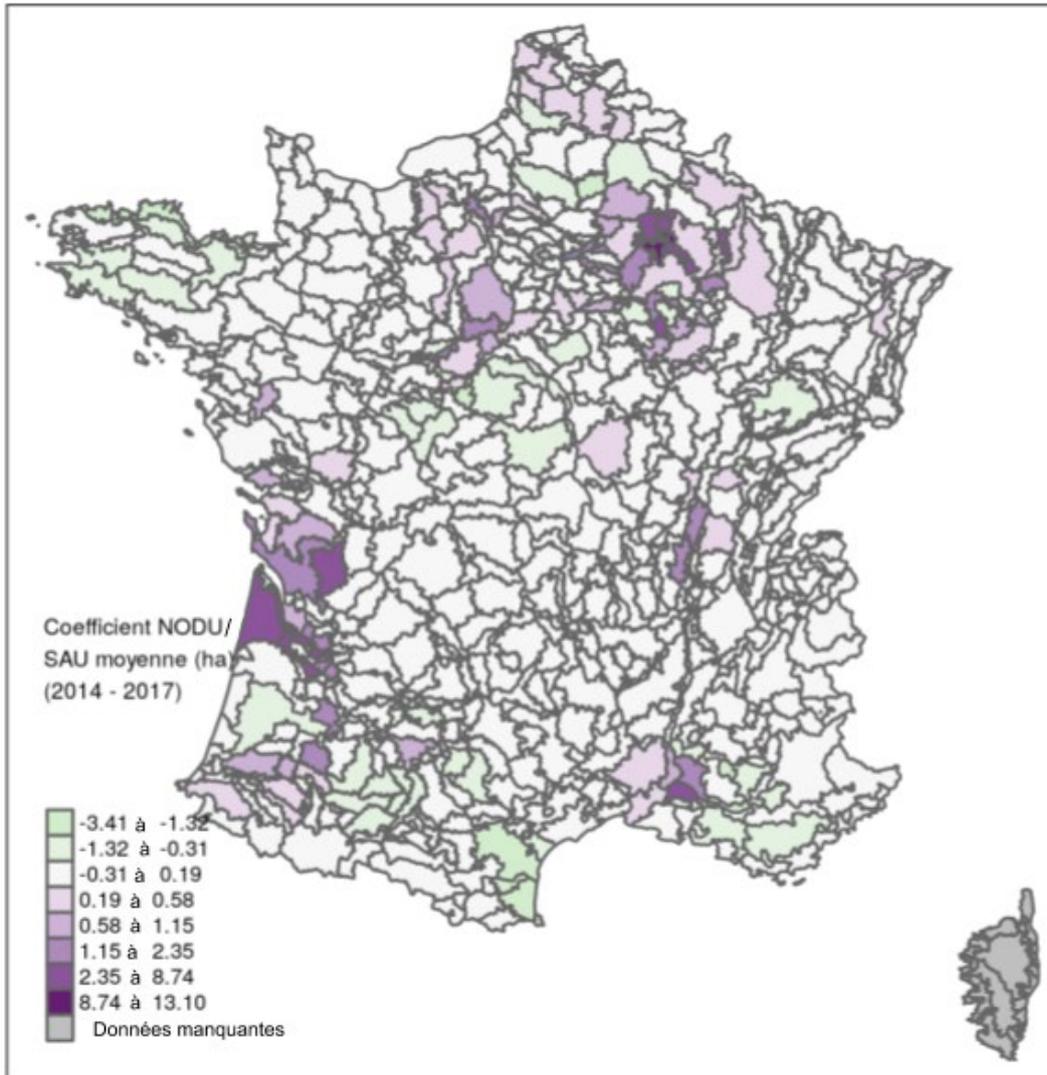


Fig. 2.4.28 : Carte de la valeur des coefficients prise par chacun des PRA dans le modèle $\sim PRA + OS + BA$, rapportée à la SAU dans la PRA.

Effet de l'ajout des PRA sur la prise en compte des bioagresseurs

Le **Tableau 2.4.10** présente la part de NODU total (en %) expliquée par les pressions en bioagresseurs (VP_{BA}) et celles expliquée par les PRA (VP_{PRA}) selon la méthode de calcul du NODU estimé, direct, à partir des NODU par fonction ou à partir les substances actives.

Les résultats sont similaires à ceux obtenus avec le modèle $\sim OS + BA$ (**Tableau 2.4.9**) mais il y a un transfert partiel de l'erreur de NODU modélisé vers la part expliquée par les bioagresseurs (VP_{BA}) qui atteint jusqu'à 25% du NODU expliqué lorsque le NODU est ajusté par substance. Les $R^2_{ajusté}$ ont la même hiérarchie que pour le modèle $\sim OS + BA$ ($R^2_{ajusté} \text{ Substances} < R^2_{ajusté} \text{ NODUf} = R^2 \text{ NODU}$), mais tous sont excellents. Les meilleures performances des substances actives individuellement (visibles sur la **Fig. 2.4.26**) se traduisent bien dans le $R^2_{ajusté}$ du NODU reconstitué à partir de ces dernières.

Tableau 2.4.10 : Part de NODU total (direct ou reconstitué) expliqué entre 2014 et 2017 (en %) par les pressions en bioagresseurs (BA), et les PRA (PRA) dans les modèles ~ OS + BA +PRA et erreur correspondante⁴⁸

Méthode de calcul du NODU	Modèle	Nombre de variables BA sélectionnées	% de NODU* estimé, expliqué par BA (VP _{BA})	% de NODU* estimé, expliqué par la PRA (VP _{PRA})	% d'erreur du NODU modélisé*	R ² ajusté** du NODU reconstitué
direct	OS + BA + PRA	11	7.66	1.73	0.82	0.987
via NODU par fonction	OS + BA + PRA	21	13.66	2.93	1.16	0.983
via substance active	OS + BA + PRA	25	25.16	5.65	4.12	0.976

*NODU pris en comparaison ici est le NODU total agricole - UA, hors AMM stockage (inclut les valeurs modélisées et hors modélisation) entre 2014 et 2017. Il est donc identique entre les différentes méthodes de calcul du NODU.

** NODU observé pris en comparaison est le NODU modélisé (sans valeurs hors modélisation) qui diffère légèrement entre les méthodes.

Ces résultats confirment que certaines PRA ont un excès ou un déficit systématique de ventes par rapport à ce qui serait estimé à partir de leur occupations du sol et leurs pressions en bioagresseurs et que la mesure ces variations permet à la fois de mieux prendre en compte les pressions en bioagresseurs et de mieux expliquer les variations interannuelles des ventes.

Ces effets PRA pourraient correspondre à 1) l'effet de déterminants externes importants qui n'auraient pas été pris en compte et qui auraient un ancrage spatial en lien avec les PRA (ex : pressions de bioagresseurs plus élevées, AOC), ou pour 2) l'effet de déterminants internes tel que des décalages spatiaux entre les PRA du siège d'exploitation et celui de la zone d'utilisation.

Ce dernier point doit amener à la prudence : si le modèle indique des excès ou des déficits des ventes il ne fait que suggérer des utilisations plus importantes ou plus faibles que la moyenne nationale sur les cultures de la PRA, suggestion qui peut servir à engager un dialogue local sur les causes possibles de ces écarts et éventuellement par la suite, à compléter le modèle pour les prendre en compte.

Enfin, l'ajout des PRA montre aussi que les pressions en bioagresseurs pourraient jouer un rôle plus important que ne le laisse penser le modèle ~ OS + BA. Entre les modèles avec et sans variable PRA, la part de NODU que les modèles estiment (directement ou reconstruit) expliquée par les bioagresseurs (VP_{BA}) est relativement variable : entre 6 et 25 %. Pour trancher entre les résultats de ces différents modèles ou manière d'estimer le NODU, il faut investiguer la cohérence des résultats pour ces différents modèles.

⁴⁸ $\sum(NODU_{obs} - NODU_{pred}) \cdot 100 / \sum NODU_{obs}$

Analyse préliminaire des résultats des modèles en terme d'utilisation

Cette section explore tout d'abord une possibilité de validation des résultats du modèle en comparant les IFT par culture estimés (coefficient) à des IFT connus (**Q2.1**). Ensuite, elle examine si la répartition prédite entre les cultures par les modèles sur les indicateurs NODU *total* et par fonction sont en accord avec les connaissances des experts sollicités (**Q2.2**).

Les réponses apportées aux questions (**Q2**) sont à prendre avec précaution, il s'agit d'approximations conçues pour aboutir suffisamment rapidement à des résultats illustratifs. Surtout, **aucun intervalle de confiance n'est associé aux coefficients estimés, ce qui empêche de se représenter l'imprécision**, pouvant être très grande (exemple : valeur estimée apparaissant très supérieure à l'attendu mais dont l'intervalle de confiance inclurait 0). La procédure de LASSO ne permet pas directement d'obtenir des intervalles de confiance, ceux-ci doivent être obtenus par une procédure de bootstrap additionnelle. Notre équipe est familière avec ces calculs et est équipée pour les réaliser (ils représentent des centaines d'heures sur un serveur de calcul) mais il faudrait deux mois pour les mettre en place et les analyser. En règle générale, on peut cependant retenir que **plus les surfaces d'une occupation du sol sont faibles plus les résultats doivent être pris avec précaution**; les résultats associés aux surfaces de blé sont par exemple plus fiables que ceux associés aux voies SNCF ou à l'arboriculture. Encore une fois, ces résultats sont illustratifs de ce qui peut être fait, potentiellement en routine une fois mis en place, pour répondre aux questions ci-dessus mais les résultats doivent a minima être assortis d'intervalles de confiance pour être exploitables.

Relations entre coefficients obtenus pour le NODU total et IFT

Le **Tableau 2.4.11** fournit l'ensemble des coefficients obtenus par les modèles du NODU total : $NODU \sim OS$, $NODU \sim OS + BA$ et $NODU \sim OS + BA + PRA$, ainsi que les IFT de filières correspondantes (Joassard et al., 2017).

Pour interpréter le tableau, il faut aussi noter que les coefficients liés aux bioagresseurs sont liés à des parcelles infestées : ils ne sont pas directement comparables aux IFT qui sont reliés à l'intégralité des parcelles d'une culture donnée. Pour calculer l'IFT par culture estimé par les modèles avec des

bioagresseurs, il faudrait pour chaque culture, additionner les VP_{OS} et le $VP_{BA \in OS}$ concernés (en NODU) et diviser par les hectares de la culture en question (OS) sur l'ensemble des années.

Comme on pouvait s'y attendre, les surfaces en pommes de terre de plein champs, en vignes, en blé tendre, en maïs grain et ensilage, en betteraves sucrières, en protéagineux, en colza, en orge ou en autres céréales, sont sélectionnées dans l'ensemble des modèles. On a également des coefficients (NODU/ha) relativement élevés pour les pommes de terre de plein champs et la vigne, cultures qui se distinguent aussi des autres par de forts IFT.

Certaines occupations du sol plus surprenantes sont, cependant, sélectionnées comme les surfaces de la SNCF ou en gel qui sont associées aux coefficients avec les plus fortes valeurs. Inversement, les surfaces en arboriculture ont un IFT étonnamment faible. Il ne faut pas perdre de vue que les coefficients très élevés associées aux très petites surfaces SNCF pourraient très bien avoir un intervalle de confiance incluant 0. Inversement, les coefficients apparemment très faibles associés à l'arboriculture, pourraient présenter un intervalle de confiance atteignant des valeurs très élevées, mais l'on ne peut pas exclure que ces valeurs reflètent, au moins en partie, des corrélations bien réelles.

Du fait que le NODU soit calculé sur le segment agricole - UA, la part des ventes associée aux surfaces SNCF est à usage strictement agricole et ne peut, en théorie, être utilisée par la SNCF pour traiter ses voiries. L'occupation du sol "gel", qui inclut des usages très variés⁴⁹, peut être traitée (sauf le gel environnemental) par des herbicides mais ces traitements sont limités en termes de substances actives (glyphosate autorisé) et nécessitent la mention de certains usages spécifiques dans les AMM (Benarous et al., 2006). Il est donc également surprenant qu'un si fort taux de NODU/ha soit associé à ces surfaces en gel. Il s'agit donc potentiellement pour ces deux occupations du sol d'un effet indirect : les surfaces SNCF et les surfaces en gel sont corrélées à un ou plusieurs autres déterminants qui impactent le NODU de la PRA. Les surfaces SNCF dans les PRA sont par exemple en partie corrélées à des zones plus

⁴⁹ les gels industriels, les surfaces gelées sans production (jachère noire, de 5 ans ou moins, 6 ans ou plus) et autres gels (gel betterave, gel légumineuse, gel vert, jachère). Les surfaces en gel peuvent être cultivées avec implantation de culture fourragère (ex : gel betterave), ou pour le gel industriel, des cultures à des fins non alimentaires. Les cultures susceptibles d'être assimilées à du gel industriel sont entre autres le colza ou le tournesol servant à fabriquer des huiles industrielles.

densément peuplées ou plus urbanisées comme la vallée du Rhône, la vallée du Rhin, la vallée de la Loire ou le littoral méditerranéen. Des décalages spatiaux entre des sièges d'exploitation dans des PRA (zone d'achat) plus urbanisés que les PRA des zones qu'elles cultivent (zone d'utilisation), pourraient éventuellement expliquer ces attributions de NODU à des surfaces SNCF. De tels effets, même mineurs mais bien réels peuvent faire monter très rapidement les coefficients du fait des très petites surfaces concernées. Une alternative intéressante serait de prendre en compte les surfaces urbaines qui pourraient être une approximation comparable de sur-représentation des sièges d'exploitations agricoles par rapport aux terres agricoles. Pour le gel, le fort NODU associé peut éventuellement s'expliquer par des traitements réalisés en interculture ou sur la culture suivante. En effet, les surfaces en gel déclarées dans le RPG sont en place l'année de déclaration mais peuvent être suivies d'une implantation de culture à l'automne. Comme les surfaces de cette culture ne figurent dans le modèle que l'année suivante, les achats de produits pour cette culture réalisés l'année de l'implantation peuvent se reporter sur les surfaces en gel.

On remarque que les modèles $NODU \sim OS$ et $NODU \sim OS + BA$ ont des coefficients très similaires. On note une diminution des coefficients OS avec l'ajout des bioagresseurs ($\sim OS + BA$) pour le blé tendre, le colza et l'orge qui s'explique par la part de NODU associés aux bioagresseurs sur ces cultures. On note un coefficient fort en particulier pour la pression en mildiou sur pommes de terre et celle en charançons des siliques sur colza. L'ajout des PRA ($\sim OS + BA + PRA$) a des effets plus variés. D'une part, les coefficients pour les surfaces SNCF ou en gel diminuent : une partie de ces variations sont probablement attribuées à des PRA, prenant en compte certains des décalages spatiaux par exemple. D'autres part, certaines variables ont un coefficient qui augmente fortement comme les protéagineux, les plantes à fibre ou des bioagresseurs sur blé tendre et sur colza. Enfin, de nouveaux effets apparaissent, certains attendus comme l'arboriculture, pour laquelle on sait qu'il existe un nombre de traitements réalisés important (IFT entre 8 et 40).

Tableau 2.4.11 : Comparaison des coefficients positifs des différents modèles sur le NODU total avec les IFT. Les coefficients qui sont toujours à 0 pour les 3 modèles ne sont pas représentés.

Variable	coefficient ~ OS (en NODU/ha)	coefficient** ~ OS + BA (en NODU/ha)	coefficient** ~ OS + BA + PRA (en NODU/ha)	IFT entre 2011 et 2013
snf	78.239	77.019	59.893	-
gel	20.136	20.086	16.113	-
pommes_de_terre_de_plein_champs	11.159	11.40	13.844	18.9
mildiou_pommes_de_terre_de_plein_champs	-	5.597	11.808	
protéagineux	1.302	2.722	13.582	4.6 (pois)
vignes	10.208	10.591	9.926	14.7
plante_a_fibre	2.634	4.891	9.108	-
betteraves_sucrière	6.824	7.473	8.345	5.3
blé_tendre	9.067	7.925	6.013	4.9
rouilleJaune_blé_tendre	-	0.354	1.616	
pietinVerse_blé_tendre	-	0	0.508	
pietinEchaudage_blé_tendre	-	0.046	0*	
fusariose_blé_tendre	-	0.136	0.441	
cecidomyie_blé_tendre	-	0.025	0.362	
septoriose_blé_tendre	-	0.159	0.057	
colza	3.645	2.857	5.456	6.5
charanconSil_colza	-	8.977	8.317	
charanconTige_colza	-	0	0.255	
sclerotinia_colza	-	0.445	0.159	
riz	0	0	4.895	-
arboriculture	0	0	2.192	39.2 (Pomme), 19.5 (Pêche), 12.5 (Abricot), 11.1 (Prune) et 8.4 (Cerise)
mais_grain_et_ensilage	0.625	1.066	2.105	2.8
autres_céréales	0.517	1.016	1.454	-
tournesol	0	0.455	1.261	2.8
orge	2.767	1.965	1.136	4.2

PARTIE 2 : DÉTERMINANTS EXTERNES

rhynchosporiose_orge	-	1.839	1.707	
helminthosporioseOrgeH_orge	-	1.154	0	
semences	0	0	0.264	-

* *coefficient* > 0 *mais* *très* *faible* (<10-4)

** Faute d'avoir eu le temps de quantifier les IFT estimé par culture en détail, on peut considérer, en première approximation, que l'IFT estimé par le modèle pour la culture est situé entre le coefficient de l'OS seule d'une part et d'autre part la somme du coefficient de l'OS seule et de la moitié de la somme des coefficients associés aux bioagresseurs de la culture (au maximum la moitié des parcelles sont considérées comme infectées étant donné la définition des seuils d'infection). Pour le blé par exemple, pour le modèle OS + BA + PRA, l'IFT estimé pour l'ensemble de la période 2014-2017 est compris entre 6.013 (le coefficient de l'OS seul) et $6.013 + (1.6116 + 0.508 + 0.441 + 0.362 + 0.057) / 2 = 7.5$.

Globalement les IFT par culture sont du même ordre de grandeur que les coefficients mais avec de nombreuses différences. Les coefficients de la pomme de terre et de la vigne sont proches pour tous les modèles, ce qui signifie que la part de NODU attribuée est proche de la part réellement utilisée sur ces occupations du sol. Certains coefficients sont, à l'inverse, toujours éloignés, comme le coefficient du blé tendre qui est toujours supérieur à l'IFT, alors que celui de l'arboriculture est toujours largement inférieur. Le modèle avec les effets des PRA modifie les valeurs des coefficients, parfois rapprochant ces dernier de l'IFT comme pour le maïs grain et l'arboriculture et parfois les éloignant, comme le colza, les protéagineux (modèle ~ OS + BA plus proche) ou les betteraves et l'orge (modèle ~ OS plus proche). Bien que l'ajout de PRA améliore les prédictions et permettent de faire ressortir de nouveaux effets, il vient perturber les estimations de produits vendus par filière. En effet, les valeurs des coefficients pour chaque PRA (NODU) donnent une valeur de base à chaque PRA, positive ou négative, qui réduit respectivement à la baisse ou à la hausse les quantités attribuées aux surfaces.

En ce qui concerne les coefficients liés aux bioagresseurs, le mildiou sur pomme de terre est correctement identifié comme induisant un grand nombre de traitements mais pour d'autres cultures les comparaisons entre bioagresseurs sont faussées par les différences de proportion de cultures au-dessus du seuil. Si la rouille jaune est certainement un problème très important mais aussi très variable sur blé, la septoriose entraîne à coup sûr beaucoup plus de traitements mais qui sont sans doute plus stables dans le temps et dans l'espace, ce que le modèle ne semble pas détecter, peut-être parcequ'il attribue cette part stable directement à l'OS blé. Les traitements estimés sur le charançon des siliques paraissent déraisonnablement haut, surtout devant l'absence d'effet des altises. Dans l'ensemble, si l'ajout des bioagresseurs semble améliorer la capacité des modèles à prédire correctement le NODU c'est sans

doute en grande partie via des corrélations indirectes. Il faudrait néanmoins étudier ce point pour les modèles par substance ou par fonction, en effet, l'une des limites importantes du LASSO c'est que si plusieurs variables très corrélées expliquent la variable observée il va avoir tendance à n'en sélectionner qu'une, c'est une difficulté particulièrement marquée pour le modèle de NODU général où des covariances sont attendues quasiment avec toutes les variables explicatives.

En définitive, les coefficients des modèles sur le NODU sont partiellement en accord avec les valeurs existantes d'IFT, aucun des modèles testés n'ayant de résultats clairement meilleurs que les autres (Q2.1). Ces résultats montrent également que les corrélations relevées par le modèle LASSO pour le NODU ne traduisent pas systématiquement des utilisations de produits pour des usages spécifiques. Ces corrélations inattendues ou "anomalies" peuvent traduire des effets indirects, c'est-à-dire que les variables explicatives sont corrélées à des déterminants internes (décalage spatial ou temporel) ou externes du NODU, qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Il faut enfin rappeler que les coefficients montrent la force de l'effet de chaque variable, mais qu'ils ne montrent pas l'importance que jouent ces variables dans le NODU total. Ce sont les variations prédites de chaque variable (VP) qui nous informent donc véritablement sur l'importance des variables sur le NODU.

Le NODU et ses déclinaisons répartis par filières

La **Fig. 2.4.9** présente la répartition du NODU *total* national annuel en fonction des filières estimées par les modèles $\text{NODU} \sim \text{OS} + \text{BA}$ et $\text{NODU} \sim \text{OS} + \text{BA} + \text{PRA}$. En accord avec les coefficients, il ressort qu'une part importante de NODU est associée au blé tendre, au colza et aux vignes. Les pommes de terre correspondent à une part non négligeable de NODU mais moins importantes que ne pouvait le laisser penser son fort coefficient car les surfaces en pomme de terre sont notablement moins importantes que celles en vignes et surtout en blé tendre. On note que la part de NODU associée aux surfaces SNCF est très faible malgré le fort coefficient. Par contre, les surfaces en gel représentent une part non négligeable pour les deux modèles. On note que, d'après le modèle avec l'effet des PRA, la tendance à la décroissance du NODU modélisé semble principalement expliquée par la diminution des pressions en bioagresseurs sur colza entre 2014 et 2017 (**Fig. 2.4.9b**).

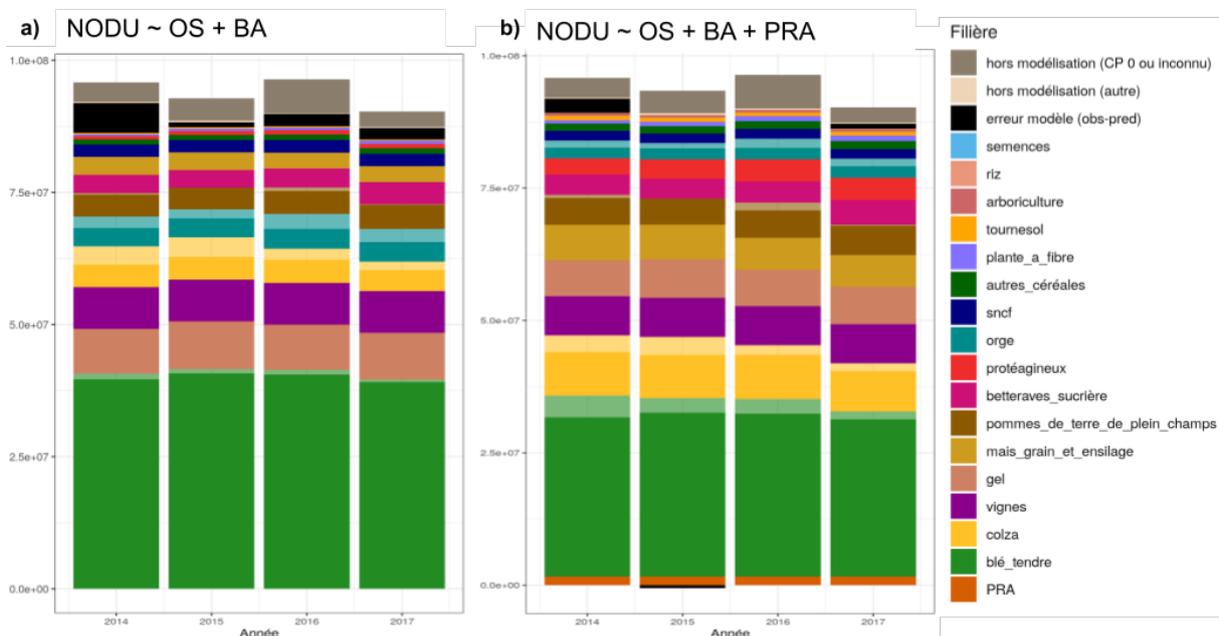


Fig. 2.4.29 : Répartition annuelle du NODU total selon la part estimée par les différentes filières pour le modèle a) $\sim \text{OS} + \text{BA}$ et b) $\sim \text{OS} + \text{BA} + \text{PRA}$, la part d'erreur (Obs - Pred) de chaque modèle, ainsi que la part de NODU qui n'a pas été pris en compte dans la modélisation (CP à 0, inconnu ou autres). La part de NODU estimée, associée à une filière, est représentée par une couleur avec deux niveaux d'intensité : une intensité forte, qui représente la part associée à la surface d'une occupation du sol (VPFil) et une intensité faible, qui représente la part associée aux pressions en bioagresseurs sur cette occupation du sol (VPBA \in Fil).

La **Fig. 2.4.30** présente les répartitions du NODU *herbicides* entre les différentes filières, estimées par les modèles $\text{NODU herbicides} \sim \text{OS} + \text{BA}$ et $\sim \text{OS} + \text{BA} + \text{PRA}$. On constate qu'une grande partie du

NODU *herbicides* est associée à des grandes cultures (blé, maïs, orge et colza), ce qui correspond aux attentes des experts sollicités. Comme nous l'avons déjà constaté précédemment pour les substances herbicides (section “part des variations expliquées par les pressions en bioagresseurs”), une légère part du NODU *herbicides* est associée à des pressions en bioagresseurs (sur blé et sur colza) ce qui peut traduire un effet indirect, par exemple des conditions climatiques favorables à la fois aux bioagresseurs et aux traitements herbicides mais pourrait aussi correspondre en partie à une sélection aléatoire d'éléments de pression en lieu et place de la culture.

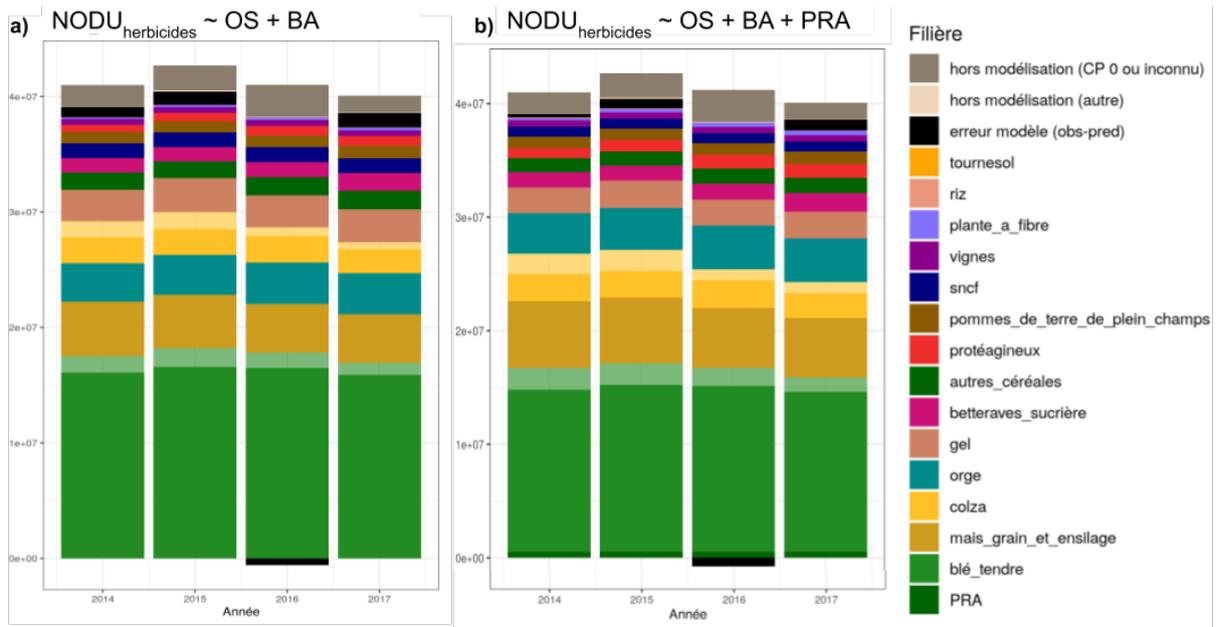


Fig. 2.4.30 : Répartition annuelle du NODU herbicides selon la part estimée par les différentes filières pour le modèle a) ~ OS + BA et b) ~ OS + BA + PRA, la part d'erreur (Obs - Pred) de chaque modèle, ainsi que la part de NODU qui n'a pas été pris en compte dans la modélisation (CP à 0, inconnu ou autres).

La **Fig. 2.4.31** présente la répartition du NODU *fongicides* entre les différentes filières estimées par les modèles $\sim OS + BA$ et $\sim OS + BA + PRA$. Comme attendu et globalement dans les proportions attendues, le blé, la vigne et les pommes de terre représentent l'essentiel des ventes de fongicides. Les bioagresseurs sélectionnés pour expliquer les ventes semblent aussi raisonnables. Les bioagresseurs sur blé (dont septoriose, pietin verse et rouille jaune), orge (helminthosporiose et rhynchosporiose) et pomme de terre (mildiou) sont associés à une part importante du NODU *fongicides*. La part en bioagresseurs du modèle $\sim OS + BA + PRA$ reproduit également relativement les variations interannuelles. On peut signaler, cependant, quelques anomalies : le NODU *fongicides* estimé par les modèles en 2014 est particulièrement sous-estimé et on trouve des ravageurs parmi les bioagresseurs sur blé et colza (puceron des épis, charançon des siliques, petites et grandes altises ; **Annexe J**).

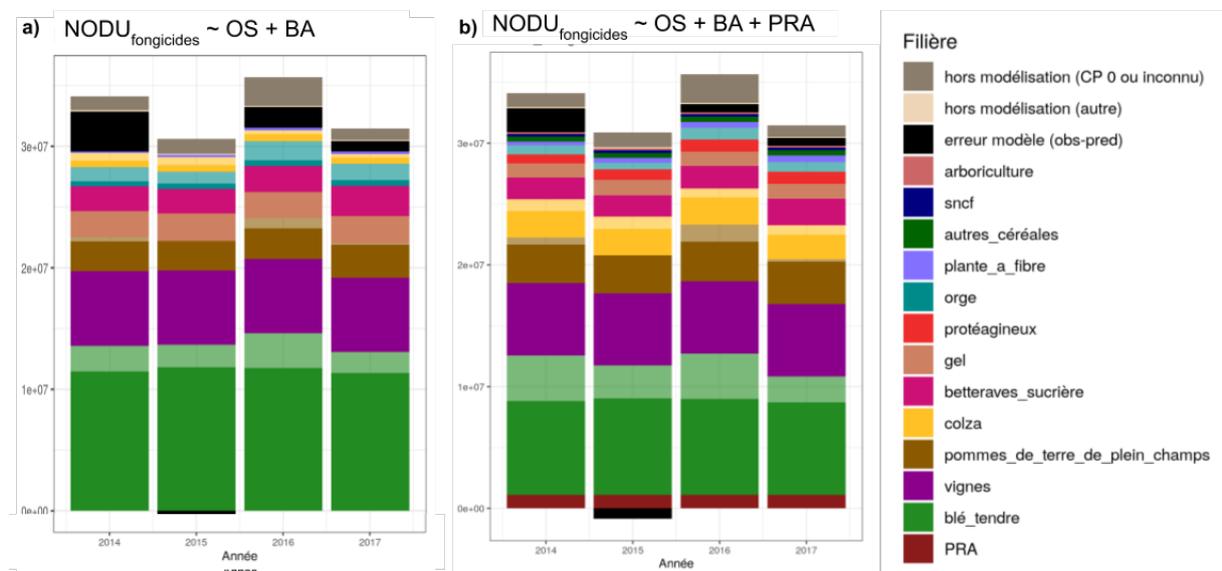


Fig. 2.4.31 : Répartition annuelle du NODU fongicides estimé selon les filières pour le modèle a) $\sim OS + BA$ et b) $\sim OS + BA + PRA$, la part d'erreur (Obs - Pred) de chaque modèle, ainsi que la part de NODU qui n'a pas été pris en compte dans la modélisation (CP à 0, inconnu ou autres).

La **Fig. 2.4.32** présente la répartition du NODU *insecticides* entre les différentes filières estimées par les modèles $\sim OS + BA$ et $\sim OS + BA + PRA$. On fait plusieurs observations qui correspondent aux connaissances expertes sollicitées : les surfaces en colza, en vignes, en protéagineux, en tournesol ainsi que des bioagresseurs sur blé (pucerons des épis ; **Annexe J**) sont associés à une part importante du NODU *insecticides* pour les deux modèles. Une part importante est également associée à des bioagresseurs sur colza (charançons des siliques, des tiges et altise; **Annexe J**), en particulier pour le modèle avec les PRA. La part expliquée par les PRA est légèrement plus élevée pour le NODU *insecticides* que pour les autres NODU par fonction, ce qui signifie qu'il y a des différences plus importantes d'utilisation en insecticides entre les PRA. On note cependant quelques anomalies comme l'importance des surfaces en gel pour les deux modèles, en particulier celui sans effets des PRA. La faible importance du blé tendre, uniquement via les bioagresseurs, diffère des résultats pour les autres NODU par fonction. D'un côté les surfaces en blé tendre sont très importantes mais de l'autre la culture de blé tendre utilise relativement peu d'insecticides (IFT insecticides 2011, blé tendre : 0.6 et colza : 2.4 : Agreste, 2013). Un point qui mériterait d'être exploré plus en détail.

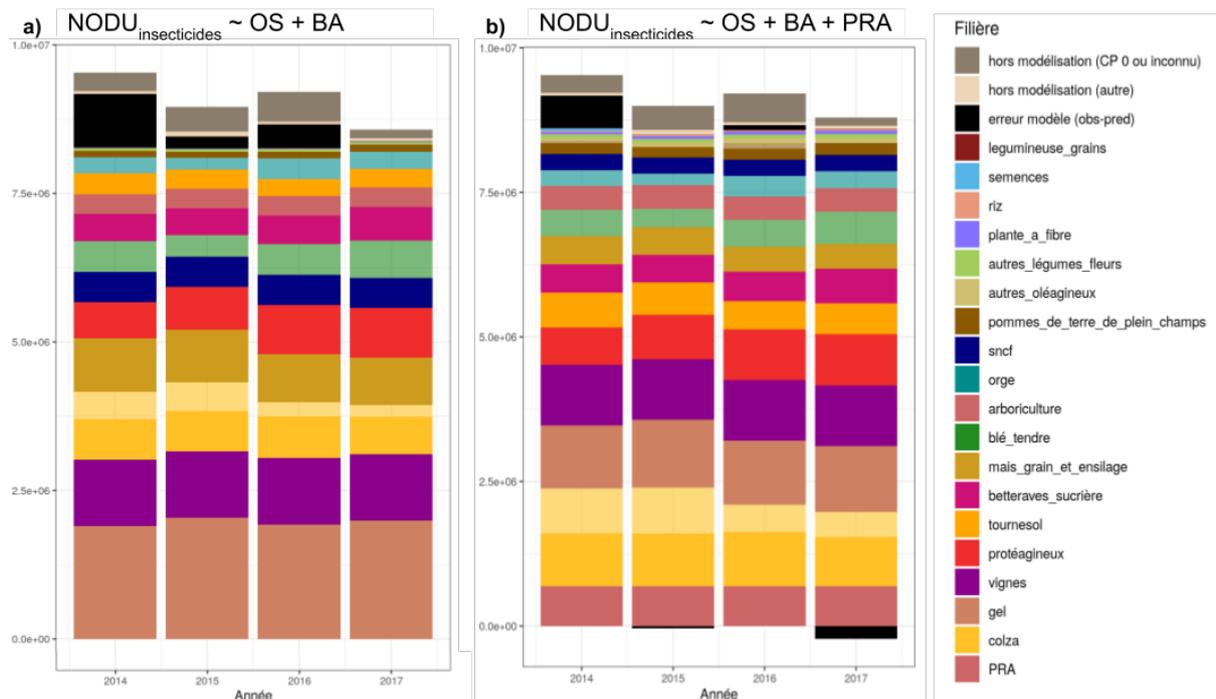


Fig. 2.4.32 : Répartition annuelle du NODU *insecticides* estimé selon les filières pour le modèle a) $\sim OS + BA$ et b) $\sim OS + BA + PRA$, la part d'erreur (Obs - Pred) de chaque modèle, ainsi que la part de NODU qui n'a pas été pris en compte dans la modélisation (CP à 0, inconnu ou autres).

La **Fig. 2.4.33** présente la répartition du NODU *substances de croissance* entre les différentes filières estimées par les modèles $\sim OS + BA$ et $\sim OS + BA + PRA$. On constate que la part des surfaces en blé et en colza est importante, surtout pour le modèle sans PRA, ce qui correspond aux expertises sollicitées. Par contre, un certain nombre d'anomalies sont constatées se traduisant par un effet important des bioagresseurs sur blé (septoriose, cécidomyie et oïdium ; **Annexe J**) ou sur colza (petite altise, charançons des siliques et sclerotina ; **Annexe J**) dans le modèle $OS + BA + PRA$ mais beaucoup plus marginale dans le modèle $OS + BA$. Ce changement brutal de la part des BA dans le modèle $OS + BA + PRA$ suggère que la part des BA pour le blé et le colza est liée à des corrélations abusives apparaissant avec la perte d'information liée à l'ajout des PRA. Cependant, une part de ce NODU *substances de croissance* associée à des maladies fongiques pourrait représenter des utilisations dans la mesure ou certains produits phytosanitaires ont des usages mixtes fongicides et régulateurs de croissance. On note que les surfaces en betterave sont associées à une part importante de NODU *substances de croissance* dans les deux modèles, ce qui ne correspond *a priori* pas à une utilisation d'après les expertises mobilisées. Ces surfaces en betteraves peuvent traduire un effet indirect, comme par exemple être le signe de PRA à haut potentiel, dans lequel les agriculteurs vont utiliser plus de substances de croissance sur blé qu'ailleurs.

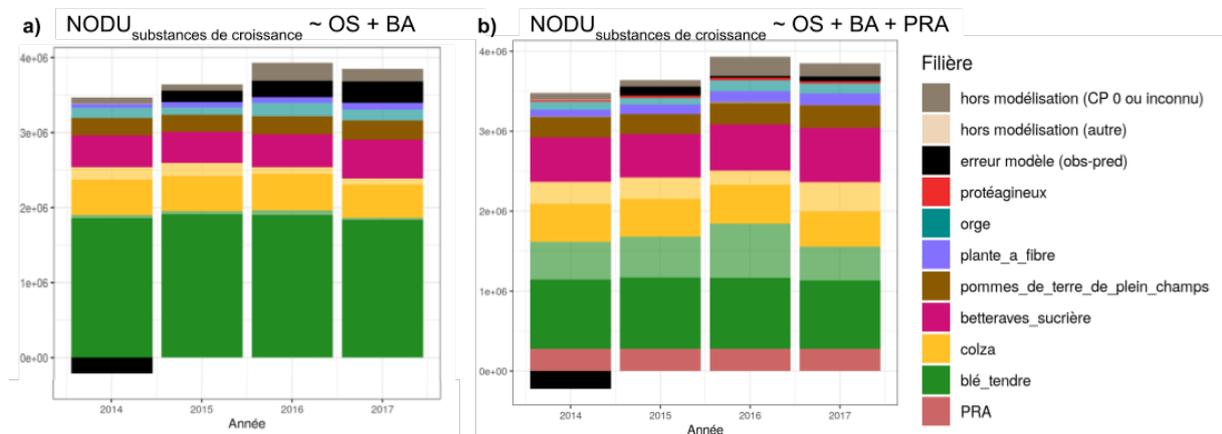


Fig. 2.4.33 : Répartition annuelle du NODU *substances de croissance* estimé selon les filières pour le modèle a) $\sim OS + BA$ et b) $\sim OS + BA + PRA$, la part d'erreur (Obs - Pred) de chaque modèle, ainsi que la part de NODU qui n'a pas été prise en compte dans la modélisation (CP à 0, inconnu ou autres).

Sorties d'intérêt pour le suivi des utilisations de produits phytosanitaires

Les très bonnes capacités explicatives ($R^2_{\text{ajusté}}$) des différents modèles réalisés démontre la bonne capacité des modèles à reproduire les variations de NODU, en particulier avec le modèle prenant en compte l'effet des PRA. De plus, une analyse préliminaire montre leur capacité à faire ressortir certaines utilisations attendues pour le NODU, les NODU par fonction et certaines substances (ex : septoriose pour le chlorothalonil). Ces résultats, bien que préliminaires, sont encourageants sur la possibilité de mobiliser la BNV-d pour étudier les utilisations de pesticides à de fines échelles spatiales (PRA) et temporelles (Année) et avec une exhaustivité sans précédent au niveau du territoire agricole français. En effet, jusqu'à présent, seules les enquêtes pratiques culturales permettent de suivre les utilisations, sur un nombre limité de cultures, à l'échelle des anciennes régions administratives et à des fréquences réduites (tous les 3 ans).

Vers un NODU filière ?

Les résultats de ces modèles proposent notamment une répartition des ventes (AMM, substances actives, NODUf, NODU) au niveau de filières définies par des surfaces d'occupation du sol ou des pressions en bioagresseurs sur ces occupations du sol (voir **Fig. 2.4.29-33**). La répartition des ventes en filière, notamment via le NODU, serait un outil très intéressant dans une perspective de pilotage de la réduction de l'utilisation en pesticides. C'est pourquoi nous discutons, dans le cadre de la question (3.1), de la possibilité d'utiliser les résultats du modèle dans ce sens.

Nos analyses ont montré qu'en l'état, les répartitions réalisées reflétaient seulement en partie les utilisations. Une partie des répartitions suggérées traduit clairement des anomalies, autrement dit des effets qui ne peuvent pas être directement reliés à des utilisations. Ces anomalies pourraient s'expliquer par des effets indirects ou des effets de décalage liés aux limites des bases de données utilisées (décalage spatial entre utilisation et ventes, décalage entre la culture déclarée et les cultures véritablement réalisées sur l'année administrative) mais pourraient aussi en partie être le fait de limites des méthodes employées : l'absence d'intervalles de confiance empêche d'identifier des coefficients dont la l'intervalle de confiance inclurait zéro. Il faut noter aussi que le nombre très restreint d'années étudiées (quatre) rend difficile l'identification des paramètres expliquant la variabilité temporelle.

Les modèles réalisés dans cette analyse permettent de générer plusieurs répartitions par filière, une par combinaison de variables explicatives testées (\sim OS, \sim OS + BA, \sim OS + BA + PRA) et par unité d'agrégation de la BNV-d (NODU, NODUf, substances actives, voire même les AMM). Nous avons trouvé des variations dans les répartitions estimées du NODU entre filière selon les modèles réalisés, avec ou sans les bioagresseurs et les PRA, et les méthodes de calcul. Aucun modèle n'étant parfait et tous les modèles offrant une part explicative importante, il est important d'étudier les ressemblances et divergences entre modèles. Les éléments stables sont plus susceptibles de refléter des corrélations robustes, les divergences peuvent faire apparaître des nuances et des complémentarité entre variables explicatives. L'ensemble de ces résultats suggère l'importance de réaliser au préalable une analyse plus approfondie du lien entre les résultats des modèles et les utilisations, notamment en comparant avec d'autres sources de données (voir **section 2.5**). Cette analyse pourrait être utilisée soit pour assurer un tri préalable des variables explicatives (OS et BA) susceptibles d'influer sur une fonction, soit pour mesurer de manière plus précise si la répartition proposée traduit une répartition d'usage, ainsi que d'éventuellement trancher pour les meilleurs modèles (avec ou sans PRA) et méthodes (directe ou reconstruite) d'estimation du NODU.

En l'état, chaque méthode présente certains avantages et inconvénients, l'observation des deux représentations permet de nuancer les estimations réalisées. En ce qui concerne l'inclusion des PRA, les modèles avec PRA semblent permettre d'améliorer les valeurs estimées de NODU, en particulier les variations interannuelles, de mieux faire ressortir certains effets attendus des bioagresseurs mais, en même temps, ils semblent augmenter le nombre d'anomalies dans la distribution entre filières et l'attribution aux BA. En ce qui concerne la nature des variables expliquées, les modèles réalisés directement sur les indicateurs peuvent limiter l'impact d'éventuelles substitutions de substances à la suite d'interdiction alors que les modèles plus détaillés, au niveau des substances actives notamment, sont peut-être plus à même de rendre compte des utilisations réelles.

Un certain nombre d'améliorations des modèles devrait être également réalisées, au premier rang desquels il faut inclure le calcul de marges d'erreur pour identifier les anomalies véritablement problématiques, mais aussi une meilleure prise en compte des pressions en bioagresseurs (**section 2.5**).

Il est important, cependant, de préciser que **cette répartition en filière sera toujours une estimation et pas une mesure de la répartition**. En effet, les modèles sont des approches mettant en évidence les corrélations existantes mais ne permettent pas d'établir des causalités entre les ventes et les utilisations possibles. Pour connaître les utilisations, la seule possibilité est de les mesurer, comme cela est fait au Danemark par exemple (Kudsk et al., 2018)⁵⁰. Ces modèles restent également une représentation du passé, dans notre cas la période de 2014 à 2017, qui peut être prise en défaut pour la prédiction des ventes en dehors de cette période. De plus, on peut rappeler que les modèles actuels ne prennent pas en compte les potentielles évolutions des pratiques au sein d'une filière, notamment d'éventuelles réductions ou intensifications de l'utilisation en produits phytosanitaires.

Ces recommandations d'usage et d'interprétation visent principalement à rappeler que les répartitions proposées (déduite des coefficients) ne sont pas des preuves qui peuvent imputer des ventes ou des utilisations à une filière. Pour cette raison, il serait avisé de ne pas publier la répartition en filière dans les notes de suivi de plan Ecophyto afin d'éviter des malentendus dans leur interprétation. Nous pensons, cependant, que les répartitions proposées sont utiles pour nourrir un dialogue avec les parties prenantes, corroborer d'autres informations et faire des projections qui peuvent guider les politiques publiques mais ne doivent pas se substituer au dialogue avec les acteurs de terrain et aux des quantifications complémentaires telles que les enquêtes pratiques culturelles.

⁵⁰ Les auteurs ne se prononcent pas cependant ici sur la possibilité et l'intérêt de transposer ces approches en France.

PRA plus ou moins consommatrices ?

Les valeurs des coefficients attribués au PRA donnent une estimation des excès ou déficits de ventes de chaque PRA une fois prises en compte les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs. Ces coefficients, que l'on peut visualiser sous forme de carte (**Fig. 2.4.28 ; section “Variation interannuelle et disparité spatiale”**), donnent une idée des PRA plus ou moins consommatrices de produits phytosanitaires. En l'état, les modèles semblent surtout opposer certaines zones viticoles à d'autres, les vignes de champagne et de bordeaux d'une part et celles du Languedoc-Roussillon d'autre part. Les mêmes recommandations d'usages et d'interprétations que pour le NODU filière s'appliquent à ce cas de figure, c'est à dire que l'on ne peut dire actuellement si les ventes attribuées aux PRA reflètent des différences d'utilisation ou de pratiques agricoles pour des mêmes cultures (voir une combinaison des deux). Il est possible, notamment, qu'une part des ventes attribuée aux PRA soit liée à des différences entre ventes et utilisations (décalage spatiaux) ou à des déterminants externes qui ne sont pas pris en compte actuellement, comme par exemple des différences de maladies ou de ravageurs sur vignes. En définitive, les effets des PRA semblent particulièrement intéressants pour visualiser spatialement l'effet des déterminants des ventes ou des utilisations qui ne sont pas pris en compte dans le modèle, et pour stimuler la recherche d'explications à ces variations. Les modèles réalisés dans cette analyse peuvent générer plusieurs cartes des effets PRA, une par unité d'agrégation de la BNV-d (NODU, NODUf, substances actives, voire même les AMM).

2.5. Discussion

2.5.1. Explication de la variations des ventes de produits phytosanitaires

Dans l'ensemble, les travaux sur les déterminants externes (**Partie 2**) n'ont mis en évidence aucun effet important et de long terme des réglementations, interdiction de produits phytosanitaires ou Redevance pour Pollution Diffuse (RPD), sur le NODU agricole au cours de la période étudiée. Nos observations suggèrent fortement l'existence de substitutions des substances actives interdites par d'autres substances pour des utilisations similaires, phénomène en mesure d'expliquer l'absence d'effet de leur interdiction sur les ventes globales. De très légers effets de la RPD ont pu être mis en évidence, mais il serait judicieux de poursuivre les analyses au-delà de la période étudiée dans ce rapport, notamment pour évaluer sur le long terme l'effet de la forte augmentation, en 2018, de substances actives contributives du NODU. En effet, l'importance du niveau de taxation des produits phytosanitaires pour la diminution des utilisations est un phénomène bien étudié de la littérature scientifique (Böcker et Finger, 2016). En définitive, les ventes de produits phytosanitaires du segment agricole - UA semblent très bien expliquées en premier lieu par les occupations du sol, puis par les pressions en bioagresseurs et enfin par les particularités (biophysiques et technico-économiques), relativement stables au cours des années, des Petites Régions Agricole (PRA). Malgré le faible nombre d'années de la série temporelle étudiée, la prise en compte de ces trois déterminants permet d'expliquer une partie des variations interannuelles de certains indicateurs au niveau national et de certaines substances au niveau des PRA (**Annexe H**). L'étude préliminaire sur les produits phytosanitaires autorisés en Agriculture Biologique (AB) semble montrer également l'importance des surfaces agricoles converties ou en conversion AB sur l'augmentation des ventes de ce segment.

2.5.2. Observations diverses

Nos analyses sur les substitutions (**section 2.1.3**) et sur l'effet des assolements et des pressions en bioagresseurs (**section 2.4.3**) nous ont permis de montrer l'intérêt de l'**approche par fonction (à savoir, herbicide, insecticide, etc.)**. En effet, les utilisations d'AMM et, dans une moindre mesure, de substances actives peuvent être différentes selon les années (substitutions, changement de stratégies commerciales) et les zones (dynamiques commerciales locales, différences de pratiques). Dans nos analyses, le lien entre vente et utilisation (occupations du sol et pressions en bioagresseurs) semble plus facile à mettre en évidence lorsque les ventes sont décrites par fonction (NODU par fonction), puis par substance active, que par produit (AMM).

Les pressions en bioagresseurs semblent avoir un effet plus faible, sur les ventes, que les surfaces d'occupation du sol (**section 2.4.3**), ce qui pourrait laisser entendre que les agriculteurs adaptent peu en moyenne leurs traitements au contexte de bioagresseurs (pathogènes fongiques et ravageurs) en cohérence avec les évolutions globales constatées sur la période de mise en oeuvre du plan ECOPHYTO. Il est cependant important de rappeler trois points : 1) une marge de progression existe (de 6 à 25 %) selon la méthode employée pour estimer la part de NODU associée aux pressions en bioagresseurs. Des analyses supplémentaires sont donc nécessaires pour sélectionner la meilleure méthode et ainsi avoir une estimation plus précise du rôle joué par les pressions en bioagresseurs. 2) L'ensemble des pressions en bioagresseurs n'est pas pris en compte dans le modèle, il faut donc considérer que l'effet des pressions en bioagresseurs mis en évidence est un **effet à minima**. 3) Certains bioagresseurs présents toutes les années étudiées ont pu être traités systématiquement par les agriculteurs, réduisant la capacité des modèles corrélatifs à différencier une utilisation liée à la pression, d'une utilisation systématique "aveugle".

Enfin, l'approche par filière, développée dans l'analyse **section 2.5**, présente certaines limites pour comprendre l'utilisation de pesticides. Cette approche consiste, de fait, à considérer l'effet des occupations du sol indépendamment les unes des autres, alors que différentes cultures sont gérées en interaction les unes avec les autres par les agriculteurs qui conduisent des systèmes de cultures.

Ces systèmes de culture peuvent posséder des propriétés émergentes liées par exemple à la durée de la rotation plus qu'à la nature de chaque culture. La simplification des rotations (diminution de la diversité des cultures) est en effet associée à une augmentation des ravageurs et en conséquence, une plus grande utilisation de produits phytosanitaires (Schott et al., 2010). Une partie de ces variations est déjà probablement prise en compte par l'effet des PRA qui représentent des zones agricoles homogènes. Cependant, les méthodes corrélatives que nous utilisons pourraient associer de manière erronée un produit caractéristique d'un système de culture à une culture représentative de ce système de culture, même si en pratique le produit était utilisé, dans ce système de culture particulier, sur une autre culture que la culture représentative de ce système.

2.5.3. Pour aller plus loin

Amélioration du modèle ~ OS + BA + PRA

Une première étape importante serait de faire des améliorations du modèle ~ OS + BA + PRA (**section 2.4**). Certains bioagresseurs importants en termes d'usage de produits phytosanitaires associés n'ont pas pu être pris en compte, ce qui affecte notre capacité à estimer le rôle joué par les pressions en bioagresseurs. Il faudrait donc **intégrer en priorité les pressions de bioagresseurs importants sur vignes, betteraves et dans la mesure du possible en arboriculture**. Ces données sont présentes en partie dans la base de données Epiphyt et devraient pouvoir être prises en compte une fois que les difficultés techniques rencontrées pour mobiliser cette base auront été surmontées, ce qui prendrait environ 2 mois selon nos estimations. L'utilisation d'Epiphyt permettra aussi d'étendre la couverture spatiale à la Bretagne, aux Pays de la Loire, au Limousin et à l'Alsace, du moins pour les grandes cultures à partir de 2015 en l'état actuel des bases de données.

On pourrait également chercher à améliorer l'**approximation faite pour estimer les pressions en bioagresseurs** dans les PRA. On pourrait notamment envisager de prendre des pressions moyennes sur une grande région, pondérées par les distances des PRA aux autres départements (temps estimé de réalisation : 2 semaines). Il serait également possible de prédire la pression en bioagresseurs localement en s'appuyant sur d'autres sources de données. Des travaux ont montré l'importance du contexte paysager pour prédire l'intensité de la pression en bioagresseurs (Delaune et al., 2021).

Une meilleure prise en compte des **cultures fruitières** (pommiers, pêchers...) agrégées actuellement dans l'occupation du sol "arboriculture", pourrait permettre de mieux estimer l'utilisation en produits phytosanitaires pour ces cultures, dont on sait qu'elle est importante (IFT entre 8 et 40), ce qui peut représenter localement une part significative des ventes. Mais pour l'instant, nous ne disposons pas de données nous permettant d'accéder à ce niveau de détails.

D'un point de vue technique, il est très important d'obtenir des intervalles de confiance pour les coefficients estimés. La méthode de bootstrap est sans doute la plus indiquée. Elle demande des capacités de calcul importantes et sa mise en œuvre requerrait environ 3 mois.

Enfin, il devrait être possible de limiter les anomalies de répartition détectées en construisant un **modèle avec *a priori***, c'est-à-dire considérant un ensemble plus limité de variables explicatives. Par exemple, on pourrait supprimer de tous les modèles les surfaces gérées par la SNCF ou des zones non agricoles (professionnelles ou non). Ce serait très simple (quelques jours) mais peu susceptible de changer les grands équilibres vu les volumes limités qui sont concernés. On peut aussi envisager de restreindre l'attribution des AMM ou des substances à des cultures spécifiques en fonction des usages autorisés de la base EPHY (**Annexe B.1**). C'est beaucoup plus long et difficile (environ trois mois). Un travail conceptuellement similaire et plus facilement réalisable serait de supprimer les pressions en bioagresseurs (~ OS + PRA) pour les NODU *herbicides* et les NODU *substances de croissance*, et de ne garder que les pressions de maladies fongiques pour le NODU *fongicides* et les pressions en ravageurs pour le NODU *insecticides*. Nous pensons cependant que le modèle sans *a priori* reste un modèle intéressant car les corrélations inattendues sélectionnées permettent de proposer de nouvelles hypothèses explicatives (effet condition climatique, zone de haut potentiel...) et de nouvelles variables qui pourraient être intéressantes à intégrer dans le modèle.

Comparaison des résultats des modèles avec d'autres sources de données

Comme nous l'avons déjà mentionné **section 2.5**, un travail important serait de comparer de manière plus détaillée les résultats obtenus avec la BNV-d Registre avec d'autres sources de données. Une première source serait la base de données EPHY qui permettrait de dire dans quelle mesure les

répartitions proposées correspondent aux usages autorisés, en termes notamment de cultures, de cibles (bioagresseurs) et de doses homologuées. Cette base ne sera pas aisée à manipuler dans la mesure où les utilisations mentionnées sont celles actuellement valides et ne reflètent pas nécessairement les usages passés (cf. **Annexe B.1**). Une deuxième source importante est l'ensemble des résultats des enquêtes pratiques culturelles⁵¹. On peut reconstituer une utilisation en produits phytosanitaires pour certaines filières (grandes cultures, viticulture, arboriculture...) à partir des déclarations des traitements effectués dans un échantillon de parcelles à l'échelle nationale.

Ces bases ne constituent pas non plus des points de repère absolus. La base EPHY permet simplement de voir si les utilisations proposées par les modèles renvoient à des utilisations autorisées. Les enquêtes pratiques culturelles reposent sur la déclaration des agriculteurs, rendant possible d'éventuelles omissions de certains produits. De plus, elles ne sont pas exhaustives en termes de cultures et de produits phytosanitaires. Ces 2 sources pourront nous donner une idée de la part des résultats du modèle qui est très fiable, car confortée par l'ensemble des bases. Il ne sera pas possible cependant de trancher, sans expertise de terrain, pour la part des résultats qui serait en contradiction avec ces bases.

Une sollicitation d'experts en utilisation de produits phytosanitaires plus exhaustive et systématique pourrait être un moyen d'estimer dans quelle mesure les répartitions proposées par les modèles correspondent aux attendus, ainsi que de recueillir des suggestions d'interprétations ou d'améliorations du modèle. Il faut cependant souligner la difficulté de faire ce travail pour l'ensemble des 272 substances actives autorisées alors que les usages peuvent varier d'une région à une autre.

Enrichissement du modèle ~ OS + BA + PRA + ...

Une série de variables explicatives intéressantes à ajouter dans le modèle serait des variables exprimant les conditions météorologiques. En effet, certaines corrélations inattendues mises en évidence par les modèles, comme par exemple l'effet des pressions en bioagresseurs sur le NODU *herbicides*, suggèrent que les conditions météorologiques jouent un rôle non négligeable. Si nos hypothèses d'effets indirects

⁵¹ Voir descriptions des différents enquêtes réalisés sur Agreste : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/agreste-pratiques-culturelles-dans-la-viticulture/>
<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/agreste-pratiques-culturelles-en-arboriculture/>
<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2009/detail/>

sont correctes, leur ajout dans le modèle devrait les limiter. Par exemple, les pressions en bioagresseurs sélectionnés pour le NODU *herbicides* devraient être remplacées par des variables météorologiques. L'ajout des conditions météorologiques peut également prendre en compte le fait que, dans certains cas, les agriculteurs adaptent davantage leurs traitements aux conditions météorologiques qu'aux pressions en bioagresseurs. Leur ajout devrait permettre d'estimer différemment dans quelle mesure les agriculteurs traitent de manière systématique selon les cultures ou bien s'adaptent aux pressions en bioagresseurs et aux conditions météorologiques. Intégrer les conditions climatiques, par exemple, les moyennes mensuelles de la pluviométrie et des températures minimums et maximums, serait relativement aisé et rapide (2 mois) mais pourrait compliquer l'attribution des ventes aux pressions de bioagresseurs, elles aussi très déterminées par les conditions climatiques.

Le modèle pourrait être enrichi de manière à prendre en compte les interactions entre les cultures, afin de mieux comprendre certaines utilisations de produits phytosanitaires enregistrés dans la BNV-d. Une première analyse simple pourrait consister en l'élaboration d'un modèle portant uniquement sur une sélection de PRA relativement uniforme. Nous disposons pour cela d'une analyse préliminaire qui a déjà permis de faire une sélection de PRA spécialisées sur les grandes cultures (travaux non publiés, unité ODR). Il serait donc possible d'intégrer cette typologie de PRA au modèle, ce qui permettrait de faire ressortir des systèmes plus ou moins consommateurs, au-delà des ventes moyennes par culture.

En termes de système de culture, il serait particulièrement pertinent de prendre en compte les surfaces en Agriculture Biologique (AB) (distinction des surfaces AB des non-AB), d'autant que les surfaces concernées augmentent rapidement (un à deux mois de travail).

Enfin, lorsque plus de 6 années seront disponibles dans la BNV-d Registre et dans les autres bases de données, il sera possible d'estimer d'éventuelles évolutions temporelles de l'utilisation en produits phytosanitaires par les filières. On pourrait ajouter au modèle des variables prenant en compte l'effet des surfaces d'occupation du sol en interaction avec les années, **pour mettre en évidence des tendances à l'augmentation ou à la diminution selon les filières.**

2.5.4. Prise en compte des déterminants internes pour l'analyse des déterminants externes

Une bonne partie des biais de la BNV-d ont été évités dans la **partie 2** en travaillant sur le segment agricole ou agricole - UA, qui est le segment sur lequel un plus grand nombre de vérifications ont été faites. Les analyses sur les effets de la réglementation (**section 2.1 et 2.2**) nécessitant de longues séries temporelles, nous avons été contraints de travailler à l'échelle nationale avec la BNV-d Bilan. On peut espérer conduire des analyses plus détaillées sur ces questions lorsque davantage d'années seront enregistrées dans la BNV-d Registre. Des effets possibles de décalage spatial ont pu être identifiés avec l'analyse de l'assolement et des pressions en bioagresseurs (**section 2.5**), comme par exemple l'effet des surfaces SNCF ou le coefficient très important sur la PRA de Reims. Il pourrait être intéressant pour les analyses mobilisant la BNVd Registre de systématiquement intégrer un paramètre indiquant la présence ou non de centres urbains pour prendre en compte l'excès possible associé à des décalages spatiaux.

Il paraît aussi important de rappeler ici que la proportion non négligeable du NODU affectée à des codes postaux 0 suite à des contrôles est un obstacle à l'utilisation de la BNV-d en général et aux analyses que nous avons réalisées en particulier.

Retour sur les actions menées en complément du rapport

Les chargés de projets Ecophyto (DRAAF, DREAL, Agence de l'Eau) ont été consultés en début de contrat, pour témoigner de leur utilisation actuelle de la BNV-d et du NODU ainsi que de leurs besoins. Cette étude a permis d'avoir une vision de leurs attentes pour développer l'utilisation de la BNV-D et des indicateurs qui en découlent. Il est notamment ressorti qu'ils avaient besoin de :

- 1) quantifications du NODU aux échelles locales.
- 2) représentations cartographiques des indicateurs
- 3) évaluations de la qualité de la BNV-D.

Pour répondre au premier de ces besoins, nous avons calculé les NODU départementaux et régionaux basés sur les DUs nationales pour le MTE, le MAA, et les chefs de projet Ecophyto. Nous avons fourni les outils de calcul du NODU à l'échelle nationale et locale (Région, département, PRA) via des scripts R et consacré du temps pour permettre leur utilisation de manière indépendante (dont une après-midi de formation). Ce point aurait probablement nécessité plus de temps et de moyens pour que les agents du MTE et du MAA soient en mesure de réutiliser ces outils. Ces derniers restent cependant à dispositions pour toutes personnes ou services ayant les compétences (R) et les moyens adaptés (ordinateurs capables de gérer des calculs relativement lourds). Pour répondre au besoin de cartographie des indicateurs, nous avons interagi avec la statisticienne de la DGALN (MTE), Carole Toque, dans le cadre du projet de visualisation des données BNV-d (dataviz) notamment au cours d'une séance de travail collective. Enfin, différentes quantifications de la qualité de la BNV-D sont mises en avant dans ce rapport pour répondre au troisième besoin exprimé par les chargés de projet ecophyto (voir en particulier la **partie 1.2**) .

Par ailleurs, nous avons régulièrement participé au comité de pilotage du projet de spatialisation de la BNV-d. Enfin, nous avons échangé avec les équipes du SSP du MAA qui vont être en charge du calcul du NODU à compter de 2021 pour leur faire part de nos réflexions méthodologiques issues de nos travaux présentés en première partie de ce rapport (voir notamment **Annexe L**).

Conclusion générale

En explorant les déterminants internes et externes des ventes de produits phytosanitaires au travers de différents indicateurs, ce rapport fournit à la fois des informations d'ordre méthodologique, un état des lieux de la base BNV-d et de l'indicateur NODU et une série d'analyses visant à explorer l'effet de différents facteurs sur l'évolution des utilisations de produits phytosanitaires.

Une première analyse méthodologique a été réalisée sur les indicateurs, la fiabilité et la signification de la BNV-d (**Partie 1**). Dans cette partie, nous avons d'abord cherché à répondre à des questionnements sur la construction de l'indicateur NODU, en particulier sur le calcul des doses unité (DU). Nous avons montré que le calcul des DU selon les années influence peu les variations interannuelles du NODU et que la DU est en générale très proche de la dose homologuée médiane. En conséquence, nous recommandons expressément une simplification de la définition du NODU par la suppression de la prise en compte des surfaces des cultures au profit de l'utilisation de la dose homologuée médiane sur l'ensemble des cultures (détail de l'argumentaire en **Annexe L**). Nous avons, ensuite, réalisé un schéma synthétique (**section 1.2.3**) permettant de savoir à quelle résolution spatiale et temporelle il est possible de mobiliser la BNV-d selon les grands usages de produits phytosanitaires considérés (amateur ou professionnel, agricole ou non, traitements de semences, biocontrôle). Nous avons également fait un état des lieux et quand cela était possible, une quantification des différentes erreurs ou imprécisions de la BNV-d. Nous avons enfin discuté des divergences possibles entre les ventes et les utilisations. Ces différents constats pourront aider soit à la manipulation du NODU ou de la BNV-d pour les différents utilisateurs, soit à l'amélioration et à la correction des erreurs pour les gestionnaires de la base.

Une deuxième série d'analyses exploratoires a été menée pour répondre à différentes questions que se posaient le MTE et le MAA, notamment sur l'effet de la réglementation et sur les produits autorisés en Agriculture Biologique (AB) (**Partie 2 section 2.1, 2.2 et 2.3**). Ces analyses n'ont pas mis en évidence à ce stade d'effet important de la réglementation, suggérant à l'inverse l'existence probable de substitutions, c'est-à-dire le remplacement des substances interdites par d'autres substances mobilisables pour les mêmes usages. Ces analyses ont également montré que l'augmentation des ventes de produits

phytosanitaires autorisés en Agriculture Biologique (AB) semblait pouvoir s'expliquer au moins en partie par l'augmentation des surfaces agricoles converties ou en cours de conversion vers l'AB.

Enfin, une troisième analyse a permis d'examiner l'effet de l'assolement et des pressions en bioagresseurs sur le NODU dans le but d'expliquer les ventes et d'éventuellement proposer une répartition de ces ventes par filière. Cette analyse propose, de manière inédite en France, une explication des ventes de produits phytosanitaires à usages strictement agricoles et hors produits de stockage. Permettant d'expliquer fortement les variations, cette modélisation montre qu'il est possible de retrouver indépendamment d'autres sources de données une répartition des ventes de produits phytosanitaires par utilisation potentielle parmi différentes cultures et pressions en bioagresseurs. Toutefois de nombreux points restent en suspens (pour passer de la corrélation à une causalité plausible) et l'analyse gagnerait à ce que des intervalles de confiance des grandeurs estimées soient calculés. L'échelle spatiale de la petite région agricole (PRA) et l'échelle de la fonction (herbicide, insecticide...) ou de la substance semblent particulièrement adaptées pour expliquer les NODU. Nous montrons que ce type d'analyse peut estimer des résultats d'intérêt comme l'adaptation partielle des ventes à la présence de bioagresseurs, l'identification d'écarts des ventes dans certaines PRA par rapport à la valeur attendue étant donné les occupations du sol et les pressions en bioagresseurs (carte des effets des PRA). Ces résultats, même après les améliorations méthodologiques que nous proposons, resteront des estimations, estimations utilisables pour questionner les pratiques agricoles et orienter les échanges avec les agriculteurs et autres professionnels de terrain.

Annexes

Annexe A : Synthèse des retours de la DRAAF et DREAL

Questions suivantes posées par mail à l'ensemble des chargés de missions Ecophyto (DRAAF, DREAL et Agence de l'Eau) en mai 2019 :

- Quelles **valorisations** des données de la BNV-D ont été faites ? (transmettre publications réalisées)
- Y a-t-il d'autres **analyses** en cours ou que vous **prévoyez** de faire ou que vous **aimeriez pouvoir mettre en œuvre** (régional et / ou national) ? (merci de transmettre exemple ou illustration sur les attentes)

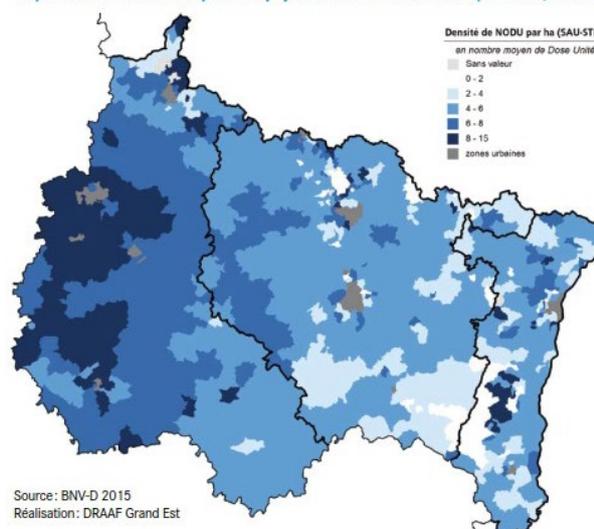
8 régions ont répondu : Auvergne-Rhône-Alpes, Bretagne, Centre-Val-de-Loire, Grand-Est, Haut-de-France, Ile-de-France, Normandie, Pays-de-la-Loire + Guyane

Documents transmis : notes de suivi et feuille de route régionale + extrait travaux Grand-Est

Synthèse des usages actuels de la Bnvd

- Usage de QSA et peu du NoDU
- Crainte sur la qualité des données Bnvd
- Incertitude sur la manière d'exploiter la bnvd de manière correcte et uniformisée entre les régions
- Séparation des SA selon leur gamme (amateur vs pro.) et leur fonction (herbicides,... etc.)
- Etude du top 10 (ou 20) des substances (en kg)
- 1 spatialisation du NoDu aux CP acheteurs (Grand-Est)

Répartition des ventes de produits phytosanitaires en NODU/ha (SAU-STH) en 2015



Liste des besoins et des attentes

- Guide clair sur les biais, les limites et les manques associés à la Bnvd et au NODU
- Avoir des données nettoyées de manière similaire entre région
- Méthodologie pour l'analyse des données de ventes uniformisées entre les régions
- Produire des cartes les ventes au CP
- Obtenir plus de DU pour pouvoir calculer le NoDU sur d'autres segments (biocontrôle)

Annexe B : Autres données mobilisées

Un certain nombre des référentiels cités ci-dessous et utilisés dans ce rapport, Segment (B.2), DU (B.3), fonctions (B.4), CMR (B.5) et RPD (B.10), transmis en 2019, ne sont pas tous à jour et présentent quelques erreurs et incohérences relevées ci-dessous. A compter de 2020, cependant, ces référentiels (2009-2019) sont stabilisés au niveau interministériel, différents services étant en charge de les établir et de les actualiser : ANSES et services statistiques du MAA, ou du MTE.

B.1. E-PHY

E-PHY est un catalogue géré par l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) qui recense les produits phytopharmaceutiques et leurs usages, les matières fertilisantes et les supports de culture autorisés en France. Il fournit pour chaque produit phytosanitaire, représenté par une Autorisations de Mises sur le Marché (AMM), les doses homologués pour chacuns des différents usages prévus, ainsi que les dates concernant leur autorisation et leur interdiction. Chacun des usages est décrit habituellement par trois éléments : une culture qui reçoit le traitement, les organes traités de la culture et une cible (Exemple usage de l'AMM 2170835, 500 g/L de cyperméthrine : Céréales à paille*Trt Part.Aer.*Chenilles phytophages). Ces informations sont disponibles en ligne sur le site <https://ephy.anses.fr/>. Pour les analyses de ce rapport, nous avons mobilisé une version de cette base de données la plus complète à notre disposition, fournie par l'ANSES en 2018. Cette base de données est une extraction de 2008-2018 et fournit l'historique des usages sur cette période. Du fait de la gestion de cette base de données, il a été observé qu'elle ne fournit pas d'informations (usages, dates et doses) sur les anciennes périodes d'autorisation pour les produits ayant été interdits temporairement. Ainsi, si un produit est interdit puis autorisé à nouveau, les anciens usages seront supprimés et remplacés par les nouveaux.

Période d'autorisation

Différentes dates d'autorisation et d'interdiction sont fournies pour chaque usage dans cette base de données (**Tableau B.1**). Pour définir la période d'autorisation d'une AMM, nous avons défini l'année d'autorisation comme étant l'année de première autorisation d'un usage de cet AMM (minimum des années de première autorisation d'un usage et d'un produit) ainsi que l'année d'interdiction comme étant l'année où l'ensemble des usages de l'AMM sont interdits. Pour l'année d'interdiction, nous avons sélectionné l'année d'interdiction du dernier usage autorisé d'un AMM, en prenant la dernière année disponible entre l'année de retrait, l'année de fin d'utilisation et l'année de distribution⁵². Si certains usages d'une AMM sont encore autorisés, nous n'avons pas sélectionné d'année d'interdiction. La même technique est mobilisée pour déterminer les périodes d'autorisation pour les substances actives à la différence que les sélections sont faites sur la totalité des usages possibles de chaque substance, c'est-à-dire l'ensemble des usages de chaque AMM qui contient la substance.

Tableau B.1 : Définitions des dates associés à l'autorisation et l'interdiction des usages des produits (AMM).

Intitulé	Définition
Date de première autorisation du produit	Date de la première décision d'amm du produit.
Date de première autorisation de l'usage	Date à partir de laquelle l'usage a été autorisé. A noter, si un usage est retiré, puis autorisé à nouveau par la suite, la date indiquée sera celle de la dernière autorisation. Qd 1/1/1900, on n'a pas la date
Date de retrait du produit	Date de la décision de retrait de l'AMM ou date d'arrivé à échéance de l'AMM (dans le cas de non renouvellement du produit suite au réexamen d'une substance active)
Date fin d'utilisation	Date à partir de laquelle un usage n'est plus autorisé
Date fin distribution	Date à partir de laquelle la vente d'un produit pour un usage donnée n'est plus autorisée

⁵² Ces trois années ne sont pas renseignées pour l'ensemble des substances interdites. Par exemple, parfois, seule la date de retrait est disponible et c'est cette année qui sera alors prise pour date d'interdiction.

B.2. Table des segments de chaque produits phytosanitaire

Cette table associe à chaque produit phytosanitaire (AMM) un segment qui représente les grands types d'usage d'un produit. La table mobilisée dans ce rapport est construite par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) en 2019. Elle se base sur les usages prévus de chaque AMM renseigné dans la base de données E-PHY (version à jour 2019) ainsi que sur l'index phytosanitaire ACTA. Elle mobilise également la liste des produits phytosanitaires de biocontrôle définis mensuellement par le MAA (<https://ecophytopic.fr/protoger/liste-des-produits-de-biocontrole>) pour définir le segment biocontrôle et biocontrôle EAJ.

Nous avons noté dans la version mobilisée dans le rapport quelques différences entre les substances issues du segment biocontrôle et biocontrôle EAJ et la liste des produits phytosanitaires de biocontrôle de mai 2019. 87 substances de la BNV-d Bilan appartenaient bien à un des deux segments biocontrôle et à la liste biocontrôle, contre 4 substances actives seulement au segment biocontrôle et 44 substances actives seulement à la liste biocontrôle (42 segment inconnu, 1 agricole - UAZNA et 1 ZNAA). La table des segments mobilisée a probablement été créée à partir d'une liste de biocontrôle antérieure à mai 2019.

B.3. Table des Doses Unités de chaque substance

Cette table associe à chaque substance une dose unité (DU) pour chaque segment auquel elle appartient (cf. **section 1.1.2**). Une table est calculée pour chaque année. Les tables des DU mobilisés dans ce rapport sont celles calculées par le MAA pour les années 2011 à 2017. Chacune des tables se basent sur la base de données E-PHY (dose en vigueur l'année de calcul), l'index phytosanitaire ACTA et les données d'occupation des sols de chaque culture une année donnée (SAA). Le calcul des DU est détaillé dans une fiche méthodologique (Méthodologie de calcul du NODU, 2017) dont est issu le schéma de récapitulatif **Fig. B.1**.

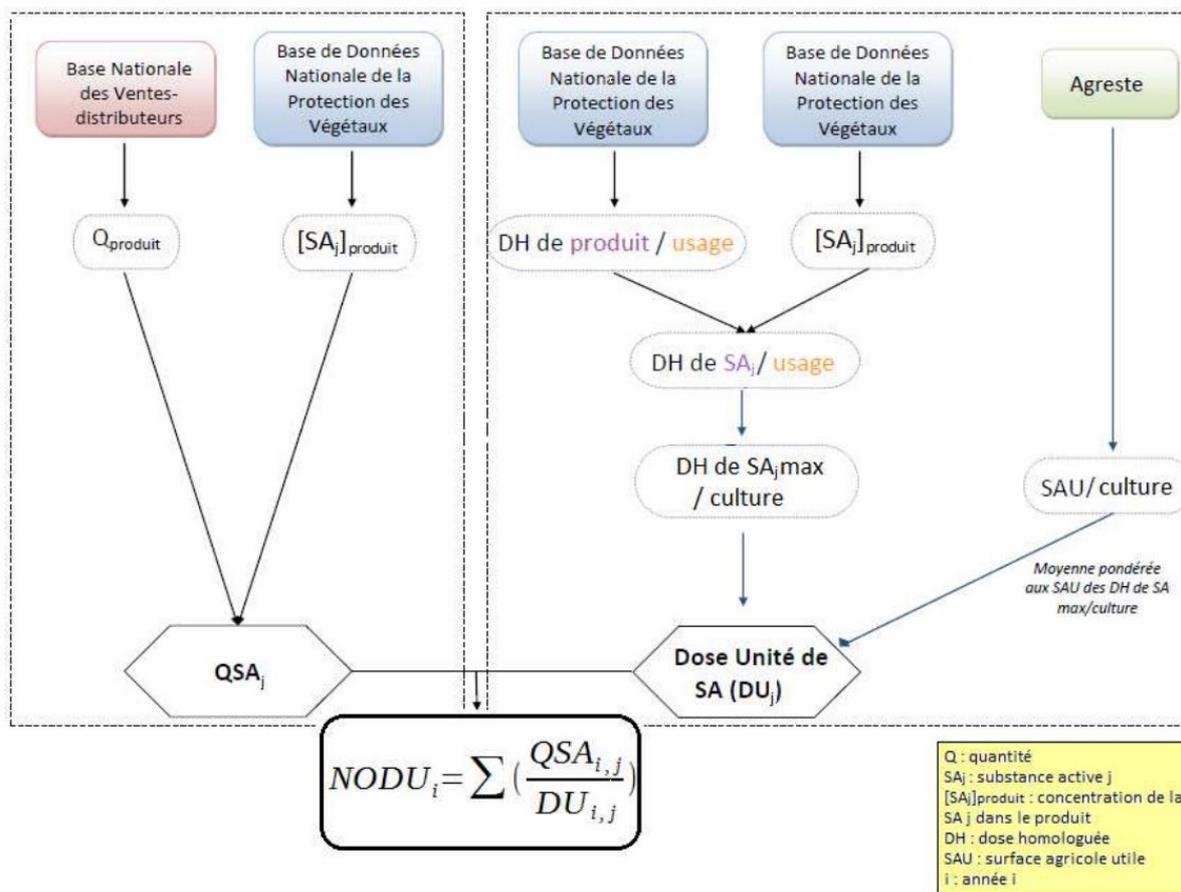


Figure B.1 : Schéma récapitulatif de la méthode de calcul

B.4. Table des fonctions de chaque substance

Dans ce rapport, nous appelons fonction des substances la catégorie d'usage homologué principal de chaque substance. La table des fonctions associées à chaque substance mobilisée dans ce rapport nous a été transmise par le MTE en octobre 2019. Elle a été élaborée à partir des usages détaillés de chaque AMM disponible dans la base de données européennes complétée des données E-PHY et de l'index phyto ACTA. Elle contient 3 colonnes donnant le nom de la substance avec la nomenclature de la BNV-d, leur code CAS et le nom de la fonction associée (**Tableau B.2**).

Tableau B.2 : Liste des fonctions disponibles pour les substances actives de la BNV-d

Fonction substance
Herbicides
Fongicides
Insecticides (dont acaricides)
Nématocides
Substances de croissance
Autres (Molluscicides, rodenticides, activateur végétal, etc.)
Multifonction (Herbicides)
Multifonction (Fongicides)
Multifonction (Insecticides (dont acaricides))
Multifonction (Nématocides)
Multifonction (Autres (Molluscicides, rodenticides, activateur végétal, etc.))
NON DETERMINE

Les substances pouvant être mobilisées dans différents produits phytosanitaires qui ont chacun des usages homologués potentiellement variés, certaines substances peuvent avoir des usages qui recouvre plusieurs fonctions (label Multifonction, **Tableau B.2**). Dans la table fournie par le ministère, des experts ont été sollicités par le ministère pour attribuer une fonction principale à ces substances de type Multifonction. Cette fonction principale est présentée entre parenthèses. Dans le rapport, nous avons fait le choix de regrouper les substances associées à une unique fonction avec celles qui sont associées à une

fonction principale par les experts, gardant un total de 7 catégories de fonction : herbicides, fongicides, insecticides (dont acaricides), nématocides, substance de croissance, autres (Molluscicides, rodenticides, activateur végétales, etc.) et NON DETERMINE.

Certaines substances dans la table du ministère n'ont pas eu de fonction attribuée et sont labellisées "NON DETERMINE", probablement parce qu'elles ont des usages trop variés ou sont trop peu utilisées. Dans ce rapport, les substances de la BNV-d qui n'étaient pas mentionnées dans la table ont été également labellisées "NON DETERMINE".

B.5. Table des CMR de chaque substance

Les substances sont dites "CMR" quand elles présentent un caractère Cancérogène, Mutagène ou toxique pour la Reproduction⁵³. Deux catégories sont détaillées, les CMR 1 pour le plus fort risque car leur nocivité est avérée ou supposée, et les CMR 2 dont la nocivité est seulement suspectée. La table des CMR associées à chaque substance mobilisée dans ce rapport nous a été transmise par le MTE en octobre 2019. Elle contient 3 colonnes donnant le nom de la substance avec la nomenclature de la BNV-d, leur code CAS et le statut CMR (1, 2 ou autres).

⁵³ <https://www.anses.fr/fr/content/substances-canc%C3%A9rog%C3%A8nes-mutag%C3%A8nes-et-toxiques-pour-la-reproduction-cmr>

B.6. Statistiques Agricoles Annuelles (SAA)

La SAA est une opération de synthèse annuelle sur les productions agricoles françaises. Elle se traduit par une base de données, disponible sur agreste, qui fournit chaque année les surfaces par cultures aux niveaux départemental, régional et national. La SAA existe depuis 1947 et permet à la France de répondre au règlement européen UE 543/2009 du 18 juin 2009. Pour établir la SAA, les services régionaux disposent de résultats d'enquêtes statistiques, d'informations rassemblées auprès des correspondants régionaux et de données administratives.

B.7. Registre Parcellaire Graphique (RPG)

Le RPG est un système de déclaration graphique utilisé par les agriculteurs qui fournit une représentation géo-localisée fine et annuelle de l'occupation du sol agricole français (hors Mayotte)⁵⁴ (Cantelaube et Carles, 2015). Administré par l'agence de Services et de Paiement (ASP), le RPG cartographie au 1/5000ème les parcelles (depuis 2015) ou les îlots⁵⁵ (2014 et antérieur), associant à chaque parcelle ou îlot, sa culture principale et sa surface⁵⁶. Les cultures sont séparées en 28 groupes, appelé groupe de culture (cf. **Tableau.B.3**). Ces données servent de référence pour l'instruction des aides de la PAC (Politique Agricole Commune) et recensent donc les surfaces agricoles des exploitations qui possèdent au moins une parcelle faisant l'objet d'une aide du 1^{er} pilier de la PAC ou encore une parcelle engagée sous une des mesures surfaciques du 2^e pilier de la PAC (mesures agro-environnementales).

⁵⁴ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

⁵⁵ un îlot correspond à un ensemble contigu de parcelles culturales exploitées par un même agriculteur

⁵⁶ https://odr.inra.fr/intranet/carto/cartowiki/index.php/Accueil_Portail_RPG

Tableau B.3 : Intitulé et identifiant des 28 groupes de cultures dans le RPG. Liste des 28 catégories d'occupations du sol (Groupe culture) et du code qui leur est associé (Code groupe culture) dans les cartographies issus du RPG.

Groupe culture	Code Groupe Culture
blé	1
maïs grain et ensilage	2
orge	3
autres céréales	4
colza	5
tournesol	6
autres oléagineux	7
protéagineux	8
plante à fibre	9
semences	10
gel	11, 12, 13
riz	14
légumineuse grains	15
fouillage	16
estives lande	17
prairies permanentes	18
prairies temporaires	19
vergers	20
vignes	21
fruits coque	22
oliviers	23
autres cultures industrielles	24
légumes et fleurs	25
canne sucre	26

La version mobilisée dans ce rapport est la version publique à partir de 2015 et entre 2008 et 2014 la version disponible pour la recherche indiquant la proportion des Groupes Culture par ilots. A partir de 2015, les occupations du sol récoltés par le RPG sont détaillées par culture⁵⁷. Ces données n'ont

⁵⁷ depuis l'édition 2015 (passage au RPG Version 2.0), certains codes de groupe de culture ne sont plus utilisés (10 : semences, 12 : gel industriel, 13 : autres gels et 27 : arboriculture) : les cultures correspondantes ont été transférées dans d'autres groupes.

cependant pas été mobilisée dans ce rapport car l'analyse des variations interannuelles nécessitent d'inclure un maximum d'années (ex: 2014 pour **Partie 2 section 2.4**).

B.8. Cartographie de l'occupation du sol ODR 2014

Une cartographie des occupations du sol élargie aux occupations du sol qui ne sont pas ou mal représentés dans le RPG est réalisé par l'US ODR (INRA Toulouse) à l'aide des bases de données de l'IGN (BDCarto®, BDParcellaire® et BDTopo®) et des statistiques agricoles annuelles (SAA, **Annexe B.6**) accessibles sur le site du MAA (Agreste) (US-ODR, 2018). La méthode d'élaboration de la cartographie d'occupation du sol est détaillée dans Carles et al. (2015) et Seard et al. (2017). Au niveau parcellaire deux catégories de zonage sont établies :

- Les zones professionnelles, qui regroupent les zones agricoles (RPG et zone agricoles hors RPG), les zones non agricoles (zna pro : bordures de routes, terrains de sport, aérodromes, cimetières et les voies et bordures des voies SNCF).
- Les zones non professionnelles (zna non pro : espaces entretenus par les jardiniers amateurs, sélection de parcelles en zones urbaines peu denses).

La cartographie réalisée fournit donc les occupations du sol issus du RPG 2014, détaillé en 28 groupes de culture anonymisé qui sont identifiables par le suffixe "gc", et les occupations du sol reconstruites à partir des autres source de données mentionnées précédemment, identifiables par le suffixe "gcodr" (**Tableau B.4**).

Tableau B.4 : Liste des catégories d'occupations du sol de la cartographie réalisé par l'ODR en 2014

Catégories des occupations du sol reconstruites	Code correspondant	Catégories d'occupations du sol issus du RPG	Code correspondant
céréales	gcodr01	blé	gc38
		maïs grain et ensilage	gc49
		orge	gc42
		autres céréales	gc52
riz	gcodr02	riz	gc48
oléagineux	gcodr03	colza	gc50
		tournesol	gc33
		autres oléagineux	gc34
protéagineux	gcodr04	protéagineux	gc47
cultures industrielles	gcodr05	plantes à fibre	gc44
		semences	gc56
		canne à sucre	gc36
		autres cultures industrielles	gc57
prairies temporaires	gcodr06	prairies temporaires	gc31
		fouillage	gc53
surface toujours en herbes	gcodr07	estives, landes	gc46
		prairies permanentes	gc43
légumes - fleurs	gcodr08	légumineuse à grains	gc39
		légumes, fleurs	gc37
vigne	gcodr09	vignes	gc35
culture fruitières	gcodr10	vergers	gc54
		fruit à coque	gc51
		oliviers	gc55
arboriculture	gcodr11	arboriculture	gc41
gel	gcodr12	gel (surface gelée sans production)	gc40
		gel industriel	gc32
		autres gels	gc45

Les autres cartographies détaillées n'ayant pas été finalisées sur les autres années au moment des analyses produites dans le rapport, nous avons mobilisé uniquement la cartographie de l'année 2014, transmise par l'US-ODR en 2018.

B.9. Cartographie reconstruite de l'occupation du sol entre 2013 et 2018 dans les PRA et les CP

Les surfaces des occupations des sols en France métropolitaine entre 2014 et 2017 dans des unités spatiales définies (CP ou PRA) ont été déterminée à partir de deux source de données :

- Une source **variable** pour chaque année : les surfaces des occupations du sol de la RPG détaillées chaque année de la période (**Annexe B.7**) et attribuées à chaque unité spatiale.
- Une source **fixe** pour chaque année : les surfaces des occupations du sol de la cartographie faite par l'ODR en 2014 (**Annexe B.8**), reportées sur l'ensemble des années et attribuées à chaque unité spatiale.

L'attribution à chaque unité spatiale est réalisé par : 1) une attribution des surfaces (RPG ou ODR 2014) au code commune INSEE via la localisation du centroïde des représentation graphique des îlots et parcelles et 2) l'attribution d'une commune INSEE à une PRA ou à un CP.

L'attribution à une PRA est basée sur une table d'association des PRA au code commune INSEE (**Annexe B.13**) : on trouve une seule PRA par commune. L'attribution à un CP est basée sur une table d'association des CP aux codes communes INSEE (**Annexe B.12**, base de données Opendatasoft⁵⁸). Quand certaines communes se répartissent sur plusieurs CP, le CP majoritaire à été sélectionné (celui associé au plus grand nombre de communes dans la table).

Le choix de la source de données pour chaque occupation du sol a été fait de manière à éviter les redondance de surfaces et pour maximiser la précision annuelle : les occupations du sol que l'on estime bien représenté par le RPG, c'est à dire celles qui sont associées à des aides de la PAC, ont leur surface estimée chaque année par les surfaces issues du RPG (céréales, oléagineuses, protéagineuses et industrielles). Les autres occupations du sol ont leurs surfaces estimées à partir de la cartographie de l'ODR en 2014, qui sont donc invariantes entre les années. L'arbitrage effectué est présenté **Tableau B.5**. On estime que la fixation des surfaces est raisonnable pour une bonne partie des occupations du sol qui sont prises dans la cartographie ODR 2014 car leurs surfaces sont probablement peu variables d'une

⁵⁸ Ce travail n'utilise par la base de données complète car il a été effectué par Jihane Drissi en 2018, avant la création de cette table

année à l'autre sur la période considérée (4 ans), comme par exemple les cultures pérennes (arboriculture, vignes), les estives et landes, ainsi que la sncf.

Tableau B.5 : Source de données sélectionnées (RPG ou ODR 2014) pour les catégories d'occupation du sol dans la cartographie reconstruite entre 2014 et 2017. Les occupations du sol sur fond gris sont les occupations du sol qui sont incluses dans la Surface Agricole Utile (SAU) dans ce rapport.

Occupations du sol	Source	Code correspondant
blé tendre	RPG	1
maïs grain et ensilage	RPG	2
orge	RPG	3
autres céréales	RPG	4
colza	RPG	5
tournesol	RPG	6
autres oléagineux	RPG	7
protéagineux	RPG	8
plante à fibre	RPG	9
semences	RPG	10
gel	RPG	11, 12, 13
riz	RPG	14
légumineuse grains	RPG	15
fourrage	RPG	16
prairies temporaires	RPG	19
betteraves sucrières	RPG	24
pommes de terres de plein champs	RPG	25
canne sucre	RPG	26
divers	RPG	28
arboriculture	ODR 2014	gc41, gc51, gc54, gc55, gcodr11, gcodr10
autres légumes fleurs	ODR 2014	gcodr08
estives et landes	ODR 2014	gc43, gc46, gcodr07
vignes	ODR 2014	gc35, gcodr09
sncf	ODR 2014	sncf
zna non pro	ODR 2014	zna_non_pro
zna pro	ODR 2014	zna_pro

Certains arbitrages un peu plus complexes sont explicités ci dessous :

Les occupations du sol “vergers”, “oliviers”, “arboriculture”, “cultures fruitières” et “fruit à coque”, ont été rassemblées sous une unique occupation du sol intitulée “arboriculture”. D’une part, une partie des surfaces issus de la carte ODR 2014 (code “gcodr”) n’est pas détaillée pour les vergers, fruits à coque et oliviers. D’autre part, les limites entre arboriculture et cultures fruitières ne sont pas suffisamment claires pour justifier une séparation.

L’occupation du sol “légumes et fleurs” du RPG et de la carte ODR 2014 a été séparée en deux : une occupation du sol “pommes de terre de plein champs” (code culture 25 du RPG) et une occupation du sol “autres légumes fleurs” (gcodr08). On peut estimer que les surfaces associées à “légumes fleurs” dans le RPG sont en large majorité des pommes de terres de plein champs⁵⁹ et que ces dernières sont bien répertoriées par cette occupation du sol. Les maraîchers déclarent, en effet, rarement leurs surfaces au RPG alors que les agriculteurs cultivant des pommes de terre en plein champs étant en général producteurs de grandes cultures (en rotation avec la pomme de terre) et donc bénéficiaires historiques des aides directes de la PAC, et déclarant leurs surfaces au RPG. Pour certains départements en 2015, on peut observer que la pomme de terre n’est pas majoritaire dans le groupe culture “légumes et fleurs” du RPG : prépondérance de la carotte dans la Manche (50), du melon dans l’hérault (34) et cultures relativement mixtes dans l’Aisne. On peut cependant observer que les surfaces totales “légumes et fleurs” sur ces départements sont très limitées par rapport aux surfaces sur les départements clef de la filière pommes de terres⁶⁰ (**Fig. B.2**). Ce constat justifie donc de faire une occupation du sol séparée pour les pommes de terre de plein champs et de conserver le reste des surfaces décrites par “légumes fleurs” dans la cartographie ODR (gcodr08), ces dernières faisant plutôt référence à des surfaces diversifiées de type maraîchères (“autres légumes fleurs”).

⁵⁹ 3 autres types de cultures peuvent jouer un rôle important

⁶⁰ Nord-Pas de Calais, Picardie, Champagne-Ardenne, Bretagne, Centre, Normandie, etc, voir <http://ephytia.inra.fr/fr/C/23152/Pomme-de-terre-Information-sur-la-filiere> (source : Agreste)

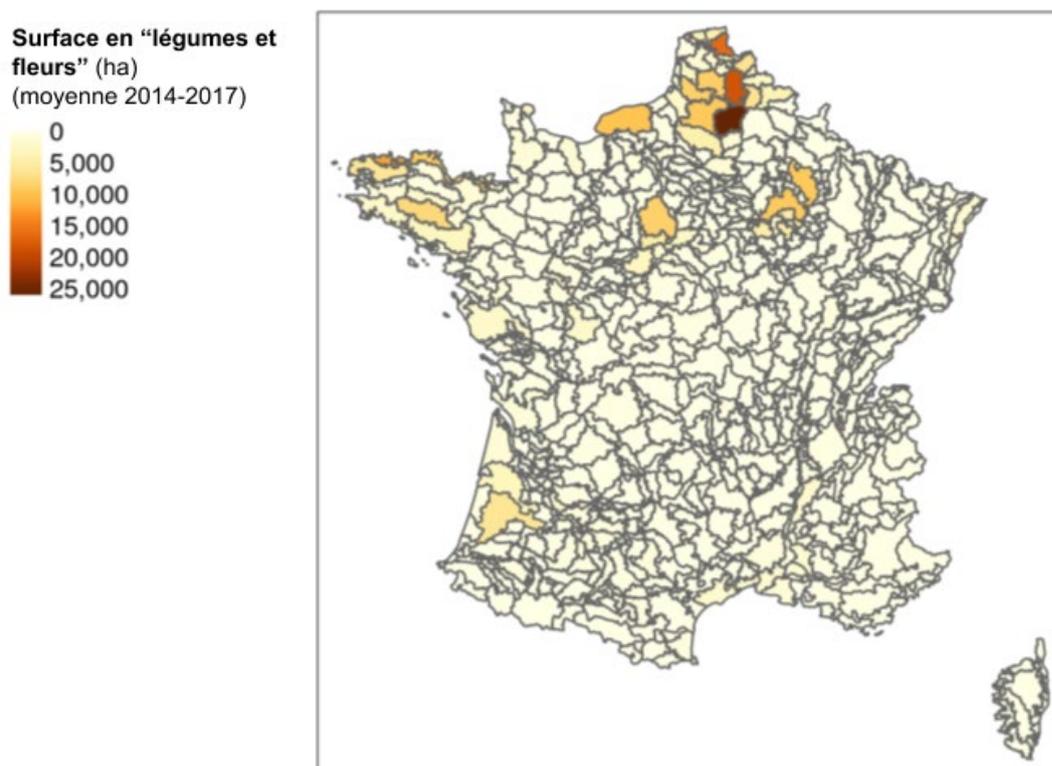


Figure B.2 : Carte des surfaces “légumes fleurs” (25) issus du RPG, interprétés comme pommes de terres de plein champs dans le rapport, agrégées au niveau des PRA et moyennées sur la période 2014 - 2017.

L’occupation du sol “autres cultures industrielles” est renommée “betteraves sucrières”, puisque, comme pour les pommes de terre de plein champs, on peut estimer que les surfaces déclarées au RPG pour cette occupation du sol sont en large majorité des surfaces de betteraves cultivés pour la production de sucre et que ces dernières ont leur surface bien répertoriées par cette occupation du sol.

B.10. Table des Redevance Pollution Diffuse (RPD) selon les années

La table des Redevances Pollution Diffuse (RPD) a été établie par le MTE en septembre 2019, à partir d'extractions de la BNV-D (ventes des bilans agrégés au niveau national) et d'une table de l'historique des arrêtés RPD élaborée par l'INERIS. Elle fournit le montant de la redevance (€/kg) entre 2008 et 2020 pour 380 substances actives (sur 584 substances actives renseignées dans la table).

Mise en place de la table de redevance pour pollutions diffuses selon les années :

Les données renseignées par l'extraction de la BNV-D sont les ventes annuelles de quantités de substances actives de la BNV-D. Pour chaque année, une table csv renseigne la liste des substances actives vendues, leur numéro CAS et leur classification dans l'arrêté RPD. Cette classification permet, pour chaque année où la substance a été vendue, de déduire le taux de redevance qui lui a été appliqué selon la définition de l'article L213-10-8 du code de l'environnement. Lorsque d'une année à l'autre une substance est absente des extractions de la BNV-D (parce qu'elle n'a pas été vendue) le tableau de l'INERIS sur l'historique des arrêtés permet de contrôler si la substance est classée dans l'arrêté ou non. La table d'historisation des arrêtés n'est pas directement exploitables pour faire des croisements avec la BNV-D car l'identification des substances n'est pas la même que dans la BNV-D. De plus, il existe plusieurs lignes pour désigner une même substance en fonction de son écriture dans l'arrêté. Les extractions de la BNV-D permettent de connaître de façon fiable l'information de la taxe appliquée aux substances car la BNV-D est justement l'outil de calcul de la redevance.

B.11. Cartographie numériques

Communes

La cartographie numérique des communes prise en référence dans ce rapport est issue de la base GEOFLA® version 2.0 téléchargée en juillet 2015. GEOFLA® est un produit numérique dérivé de la base de données unifiée décrivant le découpage administratif de la France métropolitaine et des Départements et Régions d'Outre-Mer (DROM). Les données sont proposées à des échelles de l'ordre de 1:1 000 000° dans systèmes légaux de référence :

Zone	Système géodésique	Ellipsoïde associé	Projection	Unité	Résolution	Système altimétrique
France continentale	RGF93	IAG GRS 1980	Lambert-93	m	cm	IGN 1969

L'ancienneté maximale des informations de GEOFLA® à la date d'édition est d'un an. Le code INSEE de la commune (concaténation du code du département et du code géographique de la commune) est identifié par l'attribut "INSEE_COM".

Petite Région Agricole (PRA)

La cartographie numérique des PRA a été téléchargée le 2-08-2019 sur le site data.gouv⁶¹. D'après ce site, la donnée est produite par agrégation des communes du référentiel géographique BD carto. Les codes des PRA mobilisés dans le rapport sont identifiés par l'attribut "CODE_PRA".

B.12. Table reliant les codes postaux aux codes communes INSEE

Cette table fournit les liens entre les codes postaux (CP) et les communes. Chaque CP, en particulier dans les campagnes, peut inclure plusieurs communes, on peut donc avoir plusieurs lignes par CP dans la table (une pour chaque commune). Chaque commune, en particulier dans les grandes villes, peut inclure plusieurs CP, on peut donc avoir plusieurs lignes par commune dans la table (une pour chaque CP). Les communes sont identifiées par un code INSEE de référence (appelés INSEEref), correspondant au code INSEE des communes d'une cartographie des communes prise en référence dans ce rapport (**Annexe B.11**). Chaque INSEEref fait donc référence à un territoire clairement défini. En effet, les communes ne sont pas des unités territoriales stables car leurs frontières évoluent au cours du temps. Par exemple, des villes voisines peuvent être regroupées en une seule et même commune. Cette table fournit également pour chaque lien entre CP et code commune INSEEref, le détail par lieu-dit, issu de la base de données Hexasmal (voir ci-dessous). On a donc une ligne par lieu-dit

⁶¹ <https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/f8e36d4abf14395e44665698fb73d7db765da312>

Pour établir cette table de lien entre CP et communes, nous nous sommes appuyés principalement sur trois sources données distinctes afin de maximiser le nombre CP de la BNV-d qui seront associés à des communes :

- La base de données **Hexasmal** créé le 10 février 2016 et téléchargé le 2017-09-05 sur un site dédié du gouvernement français⁶² fournit le CP, des informations sur les communes avant le changement en 2017 (Nom de la commune, code INSEE) et les départements, le libellé d'acheminement et la Ligne 5. Dans ce rapport, on considère que le libellé d'acheminement et la Ligne 5 représente un lieu-dit. Cette base présente une ligne par lieu-dit.
- La base de donnée **Opendatasoft** dont la dernière mise à jour datait d'avril 2016 et qui a été téléchargé en août 2018 sur le site public de opendatasoft⁶³. Ce jeu de données a été constitué à partir des données de la base GEOFLA® 2013 mise à disposition par l'IGN (codes INSEE) ainsi qu'à partir de données Wikipédia (CP).
- Une base de données construite par l'**INERIS**, à partir de Hexasmal transmise en 2019 à l'unité ODR. Cette base a subi différentes corrections, notamment un enrichissement de CP, afin de mieux correspondre au CP renseignés dans la BNV-d Registre. Elle fournit uniquement les CP et les codes INSEE des communes.

Plusieurs **traitements** ont été fait pour joindre ces différentes bases :

- Réarrangements de Hexasmal
 - Suppression du code INSEE 80756 appartenant à une commune à cheval sur deux départements qui avait déjà un code INSEE sur un autre département où se trouve la majeure partie de son territoire.
 - Création d'un identifiant différents pour chaque lieu-dit, par concaténation du libellé "Acheminement" et de la "Ligne 5"
- Réarrangements de Opendatasoft

⁶² <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-officielle-des-codes-postaux/>

⁶³ <https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/correspondance-code-insee-code-postal/table/>

- Duplication des lignes des codes INSEE associée à plusieurs CP, pour obtenir un seul CP par ligne et, en conséquence, une ligne par lien entre code INSEE et CP
- Jonction de Hexasmal et Opendatasoft par les colonnes en communs CP, code INSEE et CODE_DEPT (code du département)
 - On obtient une base avec l'ensemble des liens entre CP et INSEE : certains existant dans une seule base et d'autres existant dans les deux bases.
 - Pour les CP x INSEE existant dans Hexasmal le détail des lieux-dits est conservé, on a donc 1 ligne par lieu-dit
 - Pour les CP x INSEE existant seulement dans Opendatasoft, on a une ligne par lien CP x INSEE. On attribue artificiellement un lieu-dit par lien CP x INSEE en prenant la valeur de l'identifiant de Opendatasoft pour l'identifiant du lieu-dit.
- Modification de la base de données de l'INERIS
 - On ne conserve que les liens CP x INSEE qui ne sont pas déjà dans la base jointe Hexasmal / Opendatasoft (tous les INSEE déjà présents, 11856 CP en plus)
 - On a une ligne par lien CP x INSEE
 - On attribue artificiellement un lieu-dit par lien CP x INSEE en construisant un identifiant unique pour chacun des liens.
- Construction et arrangement de la table finale associant les CP à des INSEeref
 - Ajout de la base de données modifiées de l'INERIS à la base jointe Hexasmal / Opendatasoft
 - On associe chaque CP des arrondissements⁶⁴ des grandes villes Paris, Lyon et Marseille à CP unique par ville, respectivement 75056, 69123 et 13055.
 - On identifie les ligne CP x INSEE qui correspondent à l'outre mer via les codes des départements

⁶⁴ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/commune/COM69123-lyon>
<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/commune/COM75056-paris>
<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/commune/COM13055-marseille>

- On fait le lien entre les codes INSEEref des communes de références (**Annexe B.11**) et les codes INSEE de la base pour la France métropolitaine.
 - On identifie les INSEE qui ne sont pas dans les INSEEref et qui sont en métropole
 - On cherche de manière automatique dans la table d'historique des changements de codes INSEE⁶⁵ et si nécessaire à la main sur le site dédié de l'INSEE⁶⁶ ces codes parmi les codes INSEE des anciennes communes.
 - On vérifie que les nouveaux codes INSEE sont bien dans les INSEEref et on les spécifie dans la table finale.

⁶⁵ Le fichier historique des communes relate les changements de nom, les créations, les disparitions et les changements de département intervenus pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer (DOM) depuis 1943 de façon exhaustive. téléchargé en août 2019 sur <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/historique-commune?debut=0>

⁶⁶ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/commune>

B.13. Table reliant les codes communes INSEE, les PRA et les échelles supérieures

La table associant les code communes INSEE aux Petites Régions Agricoles (PRA) ou échelle supérieure (département, régions) a été téléchargé le 2-08-2019 sur le site du gouvernement français data.gouv⁶⁷. Des informations sur cette base sont également disponible sur le site d'Agreste⁶⁸. La répartition des communes en zones agricoles homogènes, les régions agricoles (RA) et les PRA, a été initiée en 1946 et remaniée en 1949. La RA couvre un nombre entier de communes et peut s'étendre sur plusieurs départements. La France métropolitaine est découpée en 432 RA (hors Paris). La PRA est constituée par le croisement du département et de la RA. On compte 713 PRA.

Ce zonage statistique, élaboré conjointement par l'Insee et le Scees (SSP) a donné lieu à une première publication conjointe Insee/Scees avec le référentiel de ce zonage et la carte associée en 1956. Largement inspirées des régions géographiques, les RA et PRA ont une taille intermédiaire entre la commune (zone trop petite pour présenter des résultats) et le département (zone trop hétérogène). Ce zonage a donné lieu à plusieurs actualisations mineures consistant, pour l'essentiel, à tenir compte des modifications de certains zonages administratifs (départements, communes). Une actualisation au 1er janvier 1971 puis au 1er janvier 1980, sur la base du Code Officiel Géographique (COG) correspondant à ces deux dates ont ainsi été réalisées en 1974 puis 1983.

Cette table a été modifiée dans le rapport de manière à faire correspondre chaque code commune INSEE avec des codes communes INSEeref du découpage territorial de référence (voir **Annexe B.11** et **B.12**). La même méthode décrite dans l'**Annexe B.12** a été utilisée pour attribuer les INSEeref en mobilisant la table d'historique des changements de codes INSEE et le site dédié de l'INSEE. Nous n'avons pas pu attribuer 11 INSEeref⁶⁹ à une PRA au moyen de cette table incluant Paris.

⁶⁷ <https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/0114f2c8b41f0466afb08cc626ee6f7041020da1>

⁶⁸ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/Z.1/!searchurl/listeTypeMethodon/;jsessionid=07986e5c4d15c21a8cc08c9402f8.stats-prod-glassfish-7.zsg.agri-20000>

⁶⁹ 31300, 35317, 52033, 52124, 52266, 52278, 52465, 55138, 62847, 75056, 89326

Annexe C : Champs disponibles dans la BNV-d Bilan et Registre

BNV-d	Champs	Définition	Valeurs prises
Bilan	<i>Début</i>	Date de début de période d'inclusion des ventes	date entre 2008-01-01 et le 2018-01-01
	<i>Fin</i>	Date de fin de période d'inclusion des ventes	date entre 2008-12-31 et le 2018-12-31
	<i>INSEE</i>	Code INSEE de la commune où se trouve le distributeur ou le siège social du distributeur	nombre de 5 chiffres
	<i>Commune</i>	Nom de la commune	caractère
	<i>Région</i>	Nom de la région où se trouve la commune	France métropolitaine et outre-mer
	<i>Département</i>	Nom du département où se trouve la commune	France métropolitaine et outre-mer
	<i>Agence</i>	Agence de l'eau recevant les déclaration?	
	<i>AMM</i>	numéro de l'Autorisation de Mise sur le marché (AMM)	numéro de 7 chiffres entre 1030003 et 9900452
	<i>Exemple de nom de produit</i>	Exemple de nom de spécialité commerciale associée à cet AMM	caractère
	<i>Quantité produit</i>	Quantité vendues de l'AMM	numérique
	<i>Conditionnement</i>	unité de conditionnement de l'AMM	L, Kg
	<i>EAJ</i>	mention Emploi Autorisé pour les Jardin (EAJ) pour cet AMM	oui, non
	<i>Substance</i>	Nom de la substance (appartenant à l'AMM)	caractère
	<i>N° CAS</i>	Numéro CAS de la substance	nombre à plusieurs chiffres - 2 chiffres - 1 chiffres
	<i>Classification</i>	classification de la substance	"Autre", "N Organique", "T, T+, CMR" et "N minéral"
	<i>Quantité substance (Kg)</i>	Quantité de substance vendue en kilogramme	numérique
	<i>Année</i>	Année de vente	2013 à 2018
	<i>Distributeurs concernées (niveau AMM)</i>	-	nombre entier de 1 à 15
	<i>% du distributeur principal (niveau AMM)</i>	-	16.37 à 100 %
	<i>Nombre de sociétés metteuses en marche de l'AMM</i>	-	nombre entier de 1 à 6

	<i>Distributeurs concernés (niveau substance)</i>	-	nombre entier de 3 à 17
	<i>% du distributeur principal (niveau substance)</i>	-	15.37 à 100 %
	<i>Nombre de sociétés metteuses en marche de la substance</i>	-	nombre entier de 1 à 83
	<i>Code sandre</i>		
Registre	<i>Code postal acheteur</i>	Code postal de l'acheteur final	numéro de 5 chiffres, 0 ou 530
	<i>AMM</i>	numéro de l'Autorisation de Mise sur le marché (AMM)	numéro de 7 chiffres entre 1030003 et 9900452
	<i>Exemple de nom de produit</i>	Exemple de nom de spécialité commerciale associée à cet AMM	caractère
	<i>Quantité produit</i>	Quantité vendues de l'AMM	numérique
	<i>Conditionnement</i>	unité de conditionnement de l'AMM	L, Kg
	<i>EAJ</i>	mention Emploi Autorisé pour les Jardin (EAJ) pour cet AMM	oui, non
	<i>Substance</i>	Nom de la substance (appartenant à l'AMM)	caractère
	<i>N° CAS</i>	Numéro CAS de la substance	nombre à plusieurs chiffres - 2 chiffres - 1 chiffres
	<i>Classification</i>	classification de la substance	"Autre", "N Organique", "T, T+, CMR" et "N minéral"
	<i>Quantité substance (Kg)</i>	Quantité de substance vendue en kilogramme	numérique
	<i>Année</i>	Année de vente	2013 à 2018

BNV-d	Nombre total d'AMM	Nombre total de substance actives	Localisations	Année
Bilan	5263	647	7457 INSEE	2008 - 2018
Registre	3877	577	9645 CP	2013 - 2018

CP : code postaux des acheteurs, INSEE : code commune des distributeurs

Annexe D : Répartition des ventes sur les codes INSEE des communes

La stratégie adoptée ici a été de répartir les ventes de chaque code postal entre les communes. Dans la base de données reliant les codes postaux aux communes, nous avons accès aux nombres de “lieux dits” par commune et par code postal (cf. **Annexe B.12**). Nous avons donc choisi de répartir les ventes en tenant compte de la proportion de lieux dit associés à une commune donnée dans un code postal donné (**Fig. D.1**).

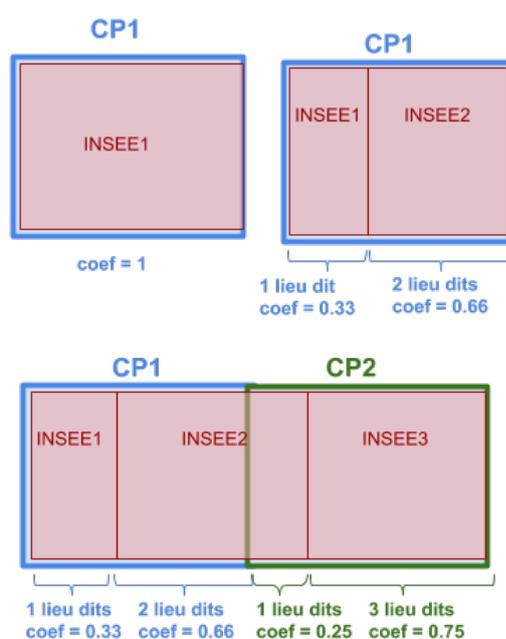


Figure D.1: Schéma explicatif de la création de coefficients de répartition des ventes sur les communes (INSEE) à partir des codes postaux (CP) et des lieux dits.

Cette répartition grossière au niveau des codes INSEE permet ensuite de faire toutes les agrégations souhaitées aux niveaux supérieurs qui permettent de limiter les erreurs liés à cette répartition. Lorsqu'on regarde le nombre de code postaux et les ventes correspondantes qui sont partagé entre plusieurs échelles (cf. **Tableau D.1**), on constate que très peu de CP s'étendent sur plusieurs départements (0.66 %) ou région (0.14 %), avec très peu de ventes concernés par une éventuelle erreur d'attribution. Les ventes réparties à ces échelles sont donc fiables *a priori*, même en cas d'erreur issue de cette technique de répartition.

Tableau D.1 : Pourcentage de CP qui sont partagés en au moins à deux échelles distinctes ainsi que la QSA associée

échelles	% de CP qui sont partagés entre	% de la QSA totale sur ces CP
----------	---------------------------------	-------------------------------

	plusieurs échelles	
Commune (code INSEE)	59.99 %	88.27 %
Canton	33.98 %	55.46 %
PRA	21.98 %	43.81 %
Département	0.42 %	0.38 %
Région	0.15 %	0.09 %

Perspectives :

- Cette méthode peut être mobilisée pour répartir les ventes sur des échelles agricoles intermédiaires comme la PRA. En effet, les 43.1% de la QSA totale sur les 21,98 % des CP qui sont à cheval entre plusieurs PRA sont bien répartis dans chacun des PRA à proportion du nombre de communes (INSEE) dans chaque PRA et d'une pondération de leur importance (approché par le nombre de lieu dits).
- Des améliorations de cette répartition peuvent être faite en se servant des *shapes*⁷⁰ des CP pour répartir les ventes sur les communes via les surfaces au lieu du nombre de lieu dit. Il faut alors mobiliser les "shapes" des CP et les "shapes" des communes⁷¹ pour calculer la surface relative prise par chaque commune sur le CP et en déduire un coefficient de répartition. Cette méthode ne donne pas une répartition plus exacte mais elle permettrait d'éviter des erreurs d'attribution de CP à des codes INSEE lointains. Il faut au préalable, cependant, vérifier que la base de CP dans cette base de données est aussi complète que celles mobilisées pour la répartition des lieux-dits.
- Il est possible également de mobiliser la répartition des ventes réalisés par les travaux de Spatialisation (cf. **Partie 1 section 1.3.3**). Cette méthode répartit les ventes sur chacun des îlots et parcelles agricoles en croisant les usages prévus des produits et les occupations du sol (cf. **Annexe B.8**). Elle permet donc d'avoir les quantités de produits phytosanitaires vendus chaque

⁷⁰ objet spatial, ici polygone vectoriel, représentant un territoire (CP ou commune)

⁷¹ voir la base de données spatiale visualisable et téléchargeable ici :

<https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/correspondance-code-insee-code-postal/map/?location=6.45.88236,1.77979&basemap=jawg.streets>

année à des échelles très fines (ex : bassin de captage d'eau). Bien que la fiabilité de cette méthode aux échelles fines reste encore à être démontrée, elle a le mérite de proposer, pour des échelles plus fines comme la PRA, une répartition des ventes plus logique et probable que les répartitions par lieu dit ou par surface présentés précédemment. Elle ne peut être utilisée, cependant, pour mettre en relation les ventes et les surfaces agricoles (cf. **Partie 2 section 2.4**) car ces dernières sont déjà mobilisées pour faire la répartition.

Annexe E : Liste des substances de la BNV-d Registre et Bilan qui ont toujours une quantité de substance (en kg) nulle

Chaque substances ci-dessous présente une quantité de substance toujours à 0, associée à une quantité de produits (QAMM) qui est parfois ou jamais nulle.

Substance	Segment	QAMM	Source
(z)-11-hexadecenal	biocontrôle	jamais nul	Bilan
(z)-13-octadecenal	biocontrôle	jamais nul	Bilan
(z)-9-hexadecenal	biocontrôle	jamais nul	Bilan
alkyl amine	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
aminopropyl dodecylamine	agricole - autres	jamais nul	Bilan
chlorhydrate de poly biguanide	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
chlorure d'alkyl dimethyl ammonium	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
chlorure de dimethyl ethyl ammonium	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
composés de l'ion ammonium quaternaire, benzylalkyl en c12-c18 diméthyles, chlorures	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
ethylene	agricole - UA	jamais nul	Bilan
<i>lactobacillus buchneri</i>	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
spores de <i>beauveria tenella</i> 96	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
z/e-11 hexadecenal	Segment inconnu	jamais nul	Bilan
1 iso thiazolinon chlorométhyl	Segment inconnu	jamais nul	Registre
chlorure de benzalkonium	Segment inconnu	jamais nul	Registre
chlorure de didécyl ammonium	Segment inconnu	jamais nul	Registre
huiles empyreumatiques	ZNAA	jamais nul	Registre
<i>metarhizium anisopliae</i> var. <i>anisopliae</i> souche f52	Segment inconnu	jamais nul	Registre
<i>bacillus amyloliquefaciens</i> souche mbi 600	Segment inconnu	parfois nul	Registre et Bilan
<i>bacillus amyloliquefaciens</i> subsp <i>plantarum</i> d747	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>bacillus subtilis</i> souche qst 713	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>beauveria bassiana</i> souche 203	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>beauveria bassiana</i> souche atcc 74040	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>beauveria bassiana</i> souche gha	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
bis (3 - aminopropyl) dodecylamine	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
chlorhydrate de poly hexaméthylène biguanidine	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>cydia pomonella</i> granulovirus, isolat r5 (cpgv-r5)	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
e,z-8-dodécen-1-yl acetate + z-8-dodécen-1-ol	biocontrôle	parfois nul	Registre et Bilan
e7,e/z9-dodécadienyl acetate + n-dodécanyl acetate	biocontrôle	jamais nul	Registre et Bilan
edta	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>lactobacillus plantarum</i>	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>metarhizium anisopliae</i>	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>pediococcus pentosaceus</i>	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>pythium oligandrum</i>	Segment inconnu	parfois nul	Registre et Bilan
<i>rhizobium japonicum</i>	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>rhizobium meliloti</i>	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
sable quartzeux	biocontrôle	jamais nul	Registre et Bilan
spores de <i>beauveria bassiana</i> 147	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>streptomyces griseoviridis</i> k61	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>trichoderma asperellum</i> t25	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>trichoderma asperellum</i> t34	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>trichoderma atroviride</i>	Segment inconnu	parfois nul	Registre et Bilan
<i>trichoderma atroviride</i> souche I-1237	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>trichoderma atroviride</i> t11	Segment inconnu	jamais nul	Registre et Bilan
<i>trichogramma brassicae</i>	Segment inconnu	parfois nul	Registre et Bilan

Annexe F : Listes des substances et AMM qui ont une quantité nulle certaines années seulement

Chaque substances ci-dessous présente une quantité de substance à 0, seulement certaines années.

AMM	Substance	Segment	Source
2050038	huile minerale paraffinique	biocontrôle EAJ	bilan
2010100	soufre	biocontrôle EAJ	bilan
2100241	acetate de e-8-dodecenylyle	biocontrôle	bilan
2100241	acetate de z-8-dodecenylyle	biocontrôle	bilan
2100241	(z)-8-dodecenol	biocontrôle	bilan
7400619	acide gibberellique	biocontrôle	bilan
2000042	bacillus thuringiensis serotype 3a 3b	Segment inconnu	bilan
9900429	chlorure d'alkyl dimethyl benzyl ammonium	Segment inconnu	bilan
2030340	goudrons de pin	ZNAA	bilan
2010100	sel de potassium de l'hydrazide maleique	biocontrôle EAJ	bilan
2080056	pseudomonas chlororaphis souche ma 342	Segment inconnu	bilan
9500651	acide propionique	Segment inconnu	bilan
9500651	acide formique	Segment inconnu	bilan
9500651	formiate d'ammonium	Segment inconnu	bilan
9500651	propionate d'ammonium (sel acide)	Segment inconnu	bilan
2030120	ethanol	Segment inconnu	bilan
2030120	sorbate de potassium	Segment inconnu	bilan
9600396	chlorure de benzalkonium	Segment inconnu	bilan
9600396	hydroxyde de sodium	Segment inconnu	bilan
2010003	chlorure d'alkyl dimethyl benzyl ammonium	Segment inconnu	bilan
9900260	polyhexamethylene diguanide chlorhydrate	Segment inconnu	bilan
9900300	hypochlorite de sodium	Segment inconnu	bilan
9600186	chlorure de lauryl dimethyl benzyl ammonium	Segment inconnu	bilan
9700240	chlorure d'alkyl dimethyl benzyl ammonium	Segment inconnu	bilan
9700240	n-n bis (3 aminopropyl) dodecylamine	Segment inconnu	bilan
9900082	chlorure de didecyl dimethyl ammonium	Segment inconnu	bilan
2130089	trichoderma asperellum tv1	Segment inconnu	bilan
8900676	chlorure de lauryl dimethyl benzyl ammonium	Segment inconnu	bilan
8900676	1 iso thiazolinon chloromethyl	Segment inconnu	bilan
2130114	deltamethrine	biocontrôle	bilan
2030209	chlorure d'alkyl dimethyl benzyl ammonium	Segment inconnu	bilan
2060121	chlorure de didecyl dimethyl ammonium	Segment inconnu	bilan
2060121	peroxyde d'hydrogene	Segment inconnu	bilan
2160943	bacillus thuringiensis ssp kurstaki souche sa-11	Segment inconnu	bilan
2030175	bacillus thuringiensis ssp kurstaki souche sa-11	Segment inconnu	registre et bilan
9800280	bacillus thuringiensis sp. tenebrionis	Segment inconnu	registre et bilan
9200482	bacillus thuringiensis ssp kurstaki souche sa-11	Segment inconnu	registre et bilan
2140084	polysulfure de calcium	biocontrôle	registre et bilan
8400364	alcool ethylique	ZNAA	registre et bilan
8400364	cire	ZNAA	registre et bilan
8400364	goudrons de pin	ZNAA	registre et bilan
8400364	terebenthine	ZNAA	registre et bilan
8400364	colophane traitee au maleate	ZNAA	registre et bilan
2070108	heptamaloxyloglucan	biocontrôle	registre et bilan
2020241	bacillus thuringiensis serotype h 7	Segment inconnu	registre et bilan
7400610	cire d'abeille	ZNAA	registre et bilan
7400610	huile de resine	ZNAA	registre et bilan
7400610	poix	ZNAA	registre et bilan
7400610	colophane traitee au maleate	ZNAA	registre et bilan
2160456	halosulfuron-methyle	agricole - UA	registre et bilan
2060125	virus zymv-wk	Segment inconnu	registre et bilan
2020241	bacillus thuringiensis serotype h 7	(Missing)	registre et bilan
2030175	bacillus thuringiensis ssp kurstaki souche sa-11	(Missing)	registre et bilan
9200482	bacillus thuringiensis ssp kurstaki souche sa-11	(Missing)	registre et bilan
9800280	bacillus thuringiensis sp. tenebrionis	(Missing)	registre et bilan
2060125	virus zymv-wk	(Missing)	registre et bilan

Annexe G : Top 15 des substances et AMM qui ont un $R^2_{ajusté} < 0.05$

Pour le modèle OS + BA

AMM ou substances actives avec R ² ajusté < 0.05	Nombre d'observations	Nombre de variables sélectionnées	% de NODU entre 2014 et 2017
2020049	706	0	0.46
2020224	706	0	0.28
2080123	2824	1	0.27
9600512	2824	0	0.26
8400255	2824	0	0.25
9600197	2824	1	0.24
2010315	2118	0	0.23
2090054	2824	0	0.22
8100198	2824	0	0.17
2110103	2824	0	0.15
2140065	1412	0	0.13
9600056	1412	1	0.11
2060051	2824	0	0.1
2020110	2824	0	0.1
9600516	2824	0	0.09
flupyrsulfuron-methyl	1412	0	0.45
trifloxystrobine	2824	0	0.32
clopyralid	2824	0	0.19
isoxaben	2824	3	0.14
methiocarbe	2824	0	0.11
rimsulfuron	2824	1	0.06
alpha naphthyl acetamide (nad)	2824	0	0.05
fludioxonil	2824	0	0.05
imidaclopride	2824	0	0.03
etofenprox	2824	0	0.03
acibenzolar-s-methyl	2824	0	0.02
mepanipyrim	2824	1	0.01
phosphure de magnesium	2824	0	0.01
methoxyfenozone	2824	0	0.01
zirame	2824	0	0.01

Annexe H : R² temporel et R² spatial

H.1. Objectifs

Dans cette analyse, nous avons cherché à savoir si nos modèles d'occupation du sol et de bioagresseurs (OS, OS + BA, OS + BA + PRA) expliquent bien les variations spatiales et les variations temporelles

H.2. Matériels et Méthodes

Soit Obs_i et $Pred_i$ les valeurs observées et prédites sur une zone (PRA) pour une année donnée : $R^2 =$

$$1 - \frac{\sum_i (Obs_i - Pred_i)^2}{\sum_i (Obs_i - \mu_o)^2} \quad (\text{éq. 1})$$

avec μ_o : moyenne sur l'ensemble des observations

$$R^2_{\text{spatial}} = 1 - \frac{\sum_i (Obs_i - Pred_i)^2}{\sum_i (Obs_i - \mu_{sp,n})^2} \quad (\text{éq. 2})$$

avec $\mu_{sp,n}$: moyenne nationale des observations de l'année n

$$R^2_{\text{temporel}} = 1 - \frac{\sum_i (Obs_i - Pred_i)^2}{\sum_i (Obs_i - \mu_{tp,n})^2} \quad (\text{éq. 3})$$

avec $\mu_{tp,n}$: moyenne interannuelle des observations sur la PRA n

Pour estimer la capacité des modèles à expliquer ces variations spatiales et temporelles, nous avons calculé deux R² distincts. Le R² classique⁷² revient à comparer les écarts entre les données observées et les données prédites par le modèle (erreur du modèle) aux écarts entre les données observées et la moyenne sur l'ensemble des observations (éq. 1). Le R² classique estime ainsi la capacité du modèle à expliquer les variations mieux que la moyenne générale des observations. Pour estimer le R²_{spatial}, c'est-à-dire la capacité du modèle à expliquer les variations spatiales, nous proposons de comparer l'erreur du modèle à l'écart entre les données observées et la moyenne nationale annuelle (éq. 2). On procède de manière similaire pour estimer le R² temporel, c'est-à-dire la capacité du modèle à expliquer les

⁷² Pour cette analyse nous n'avons pas mobilisé le R²_{ajusté}. Il faut noter que la pondération des R²_{ajusté} par le nombre d'observations et de variables sélectionnés est identique pour un même modèle et donc est identique entre les R² classique, R² spatial et R² temporel. Ce qui signifie que les différences observées entre ces différents R² seront identiques pour les R²_{ajusté} classique, R²_{ajusté} spatial et R²_{ajusté} temporel.

variations temporelles, en comparant l'erreur du modèle à l'écart entre les données observées et la moyenne interannuelle de chaque PRA (éq. 3).

Le R^2_{spatial} mesure l'amélioration de l'estimation des ventes par le modèle par rapport à la moyenne nationale annuelle alors que le R^2_{temporel} mesure l'amélioration de l'estimation des ventes par rapport aux moyennes pluriannuelles de chaque PRA.

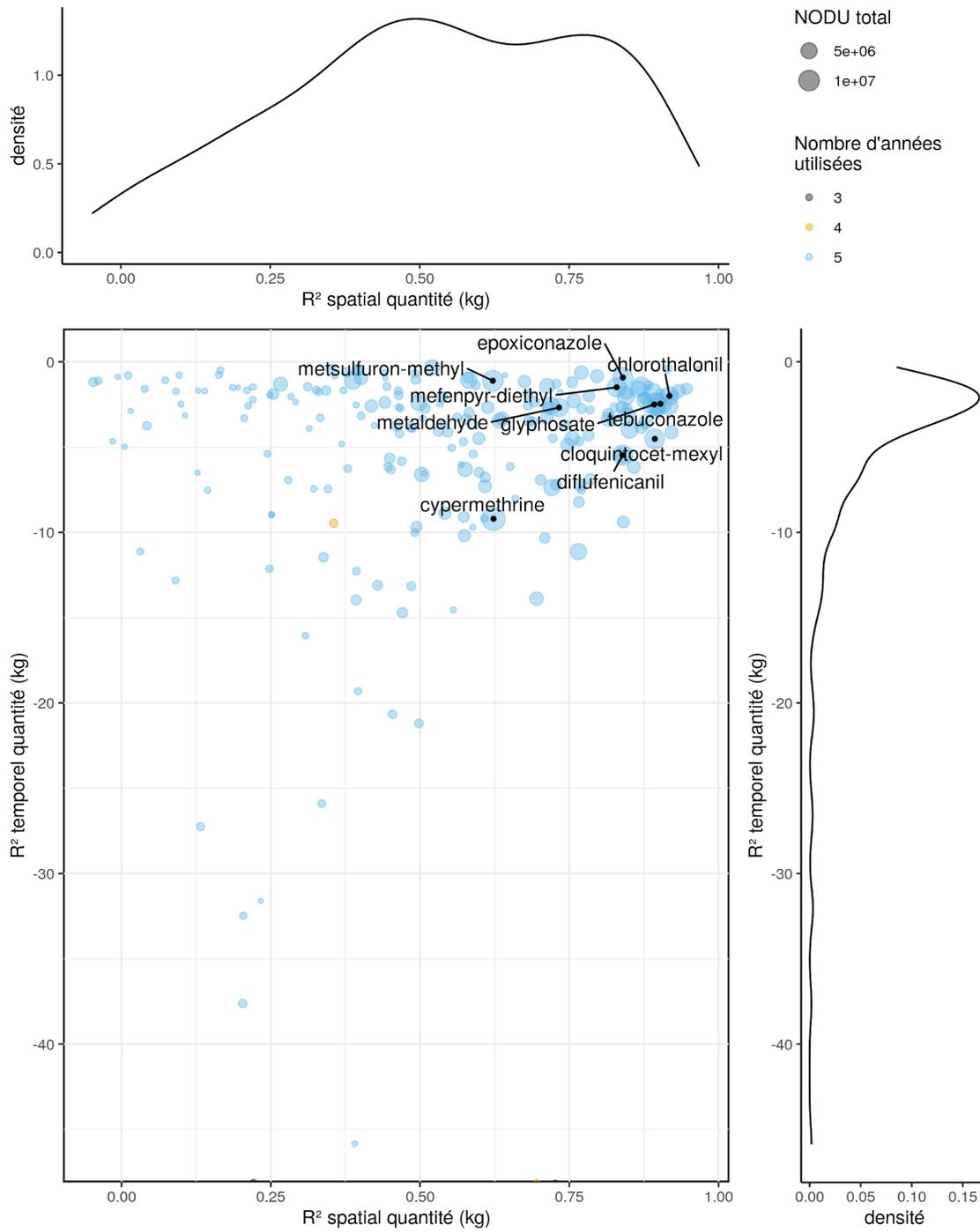
Nous avons regardé les valeurs de R^2 spatial et temporel pour l'ensemble des substances actives sur trois modèles distincts : a) $Q_{SA} \sim OS$, b) $Q_{SA} \sim OS + BA$ et c) $Q_{SA} \sim OS + BA + PRA$

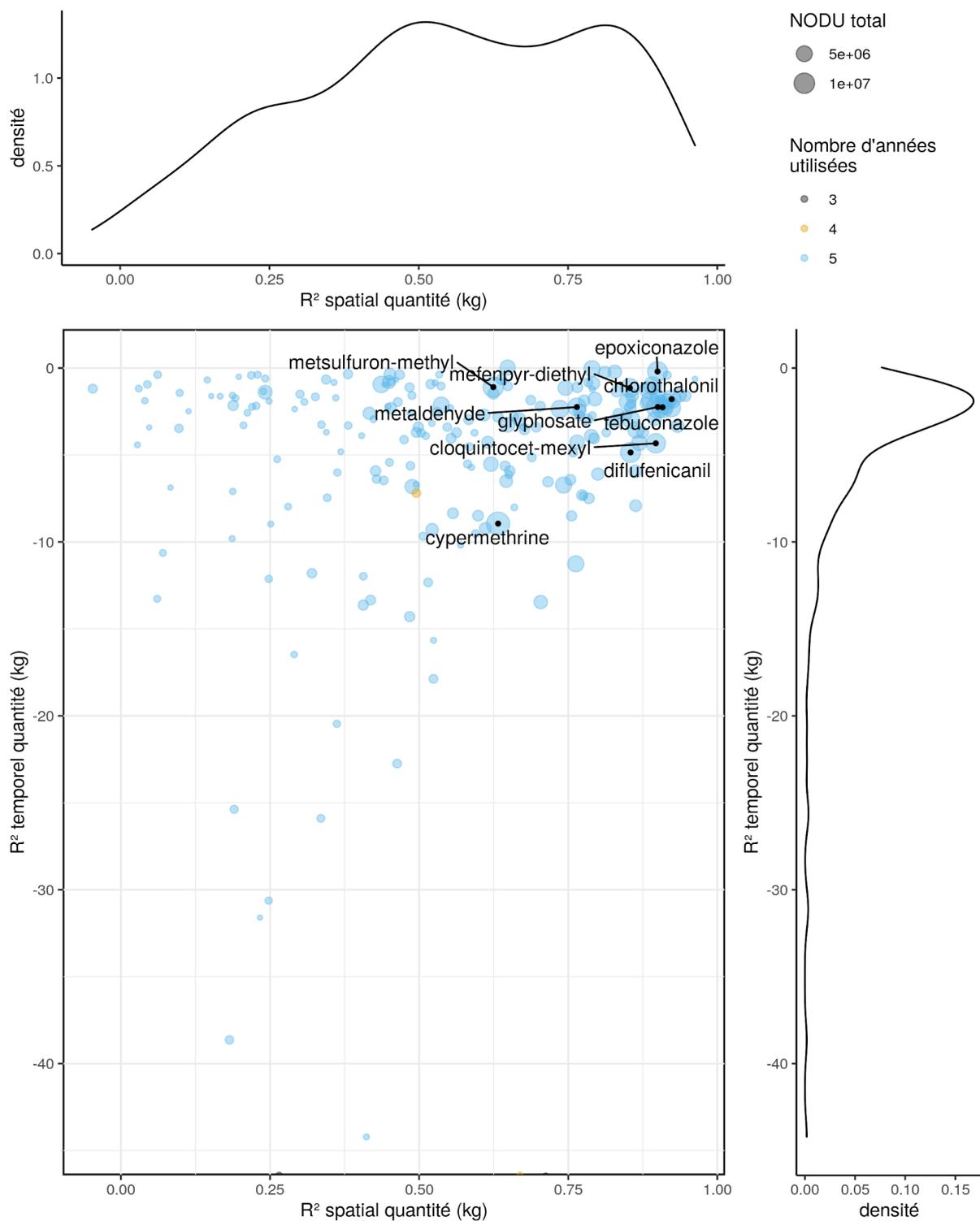
H.3. Résultats

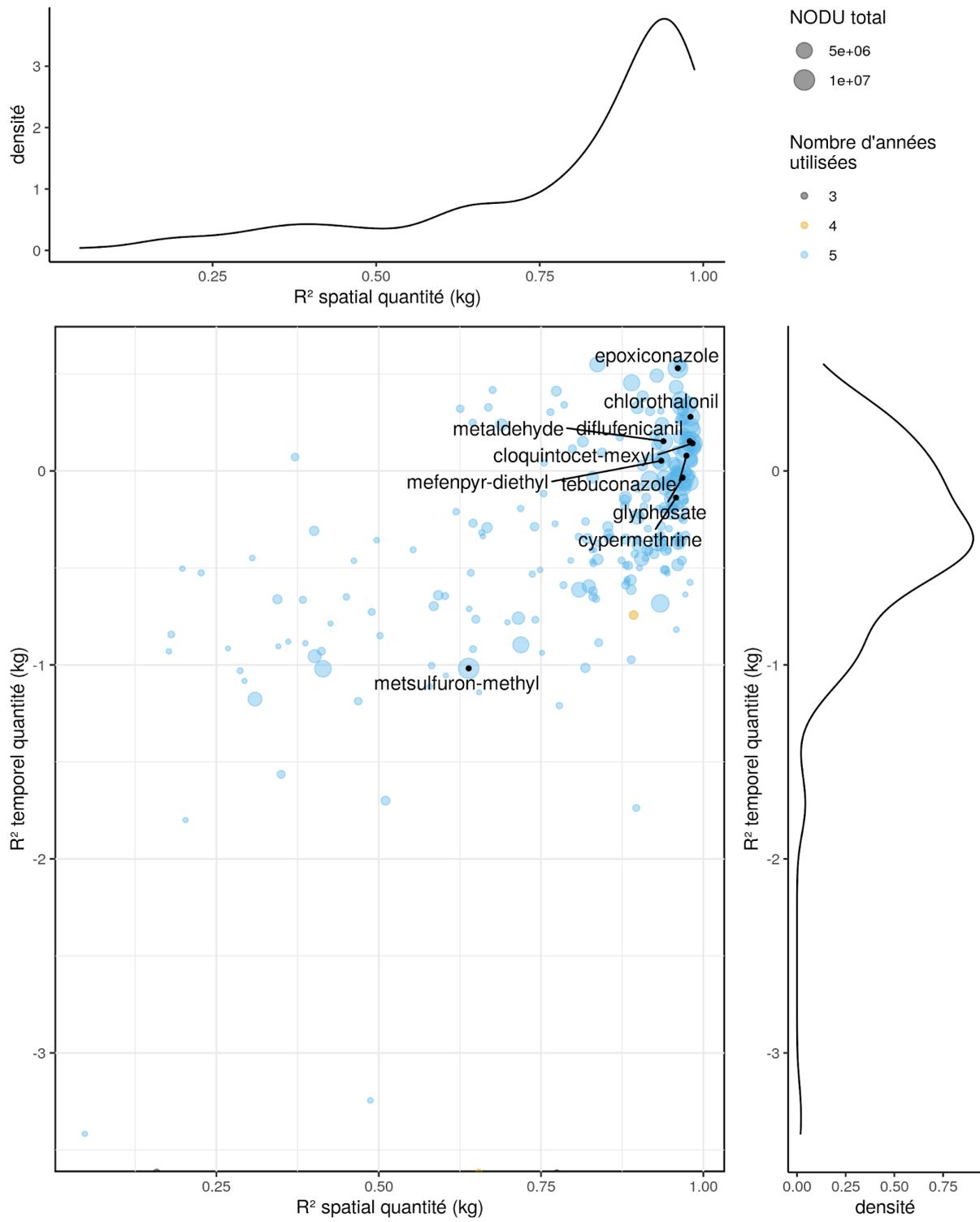
Dans les figures a), b) et c) ci-après, on peut constater que les R^2 spatiaux sont toujours bons (pic entre 0.50 et 0.8), voire meilleurs que le R^2 classique. On constate également que les substances contributrices du NODU (taille des points plus importantes) correspondent à des R^2 spatiaux élevés. En conséquence, les modèles $\sim OS$, $\sim OS + BA$ et $\sim OS + BA + PRA$ semblent bien expliquer les variations spatiales observées, surtout pour les substances très vendues.

Pour les modèles $\sim OS$ et $\sim OS + BA$, figures a) et b), on constate que les R^2 temporels sont toujours très mauvais (< 0), ce qui signifie que les moyennes des quantités de substances dans les PRA prédisent toujours mieux la quantité de substances que les quantités estimées par les modèles. Il est important de rappeler ici que les R^2 temporels négatifs sont cohérents avec les contraintes des modèles LASSO réalisés. En effet, les R^2 temporels négatifs peuvent être expliqués par des quantités de substance systématiquement sous-estimées. Ainsi, bien que les variations de quantité puissent être éventuellement bien reproduites, la moyenne du PRA sera toujours une meilleure estimation. L'ajout de la variable qualitative PRA, figure c), améliore les R^2 temporels de manière importante. Les valeurs de R^2 temporels n'atteignent pas les valeurs des R^2 spatiaux mais une bonne partie des substances ont un R^2 temporel positif, donc une capacité à prédire les variations annuelles des ventes au sein des PRA, et un certain nombre de substances contributives du NODU ont des R^2 temporels qui atteignent les 0.50 (ex : epoxiconazole), autrement-dit les modèles reproduisent 50% des variations temporelles.

L'effet PRA jouant le rôle d'un intercept local, **il évite en partie le biais à la baisse des quantités vendu, sans pouvoir éviter le biais à la baisse lié aux ventes non affectées** (en gris dans la **Fig. 2.4.25** ou **2.4.27**).

a) $Q_{SA} \sim OS$ 

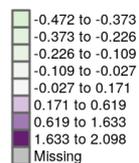
b) $Q_{SA} \sim OS + BA$ 

c) $Q_{SA} \sim OS + BA + PRA$ 

Annexe I : Cartes des coefficients PRA obtenus pour les modèles sur les NODU par fonction

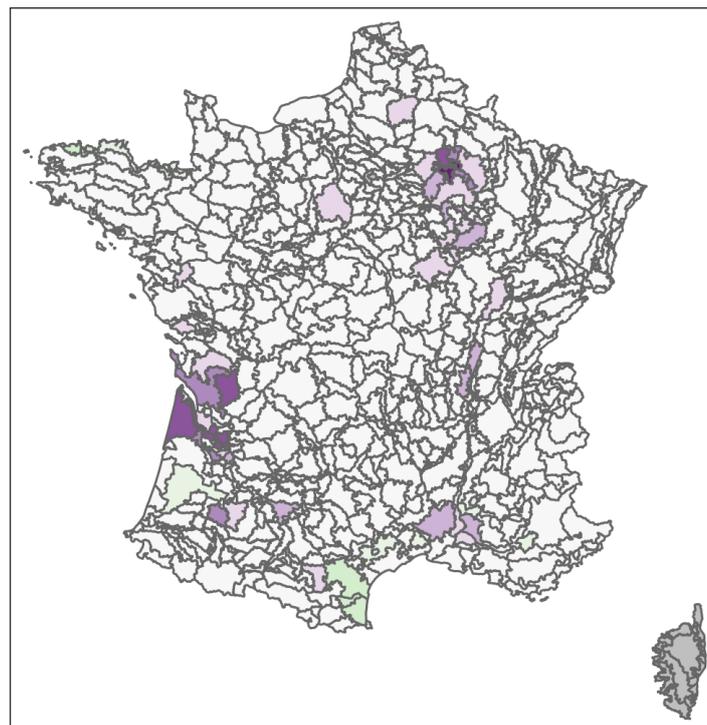
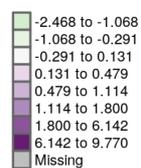
NODU *herbicides*

Coefficient NODU_Herbic. /
SAU moyenne (ha)
(2014 - 2017)



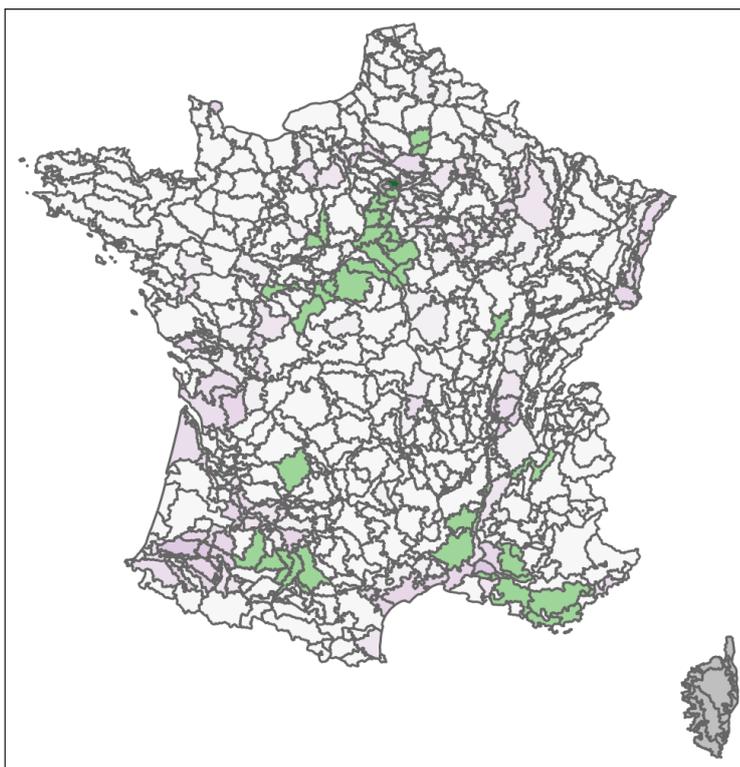
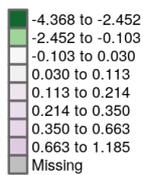
NODU *fongicides*

Coefficient NODU_Fongic. /
SAU moyenne (ha)
(2014 - 2017)

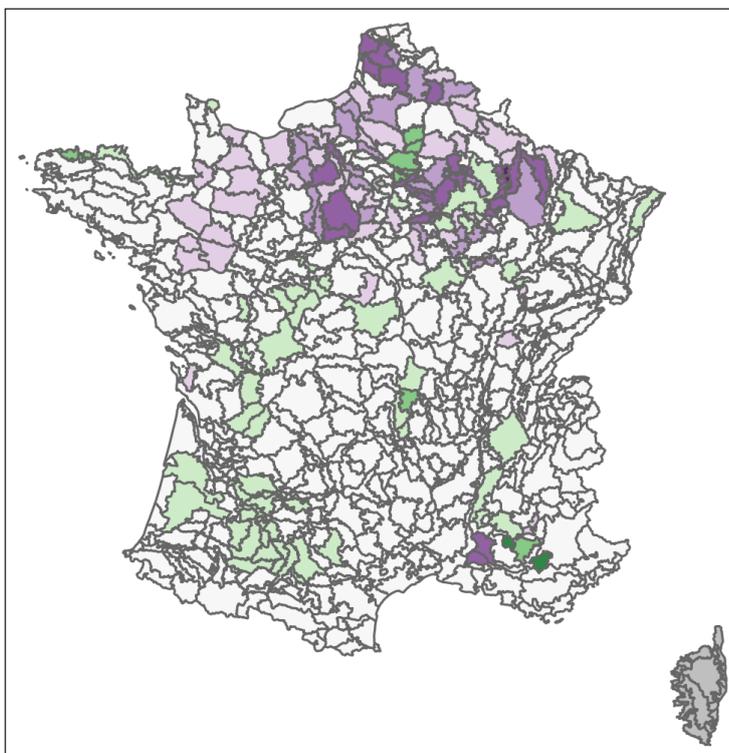
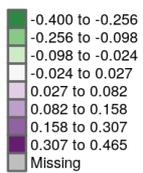


NODU *insecticides*

Coefficient NODU_Insect.acaric. /
SAU moyenne (ha)
(2014 - 2017)

**NODU *substances de croissance***

Coefficient NODU_Subst.crois. /
SAU moyenne (ha)
(2014 - 2017)



Annexe J : Intégralité des variations prédites pour chaque PRA et chaque années pour les modèle sur le NODU total et ses déclinaisons

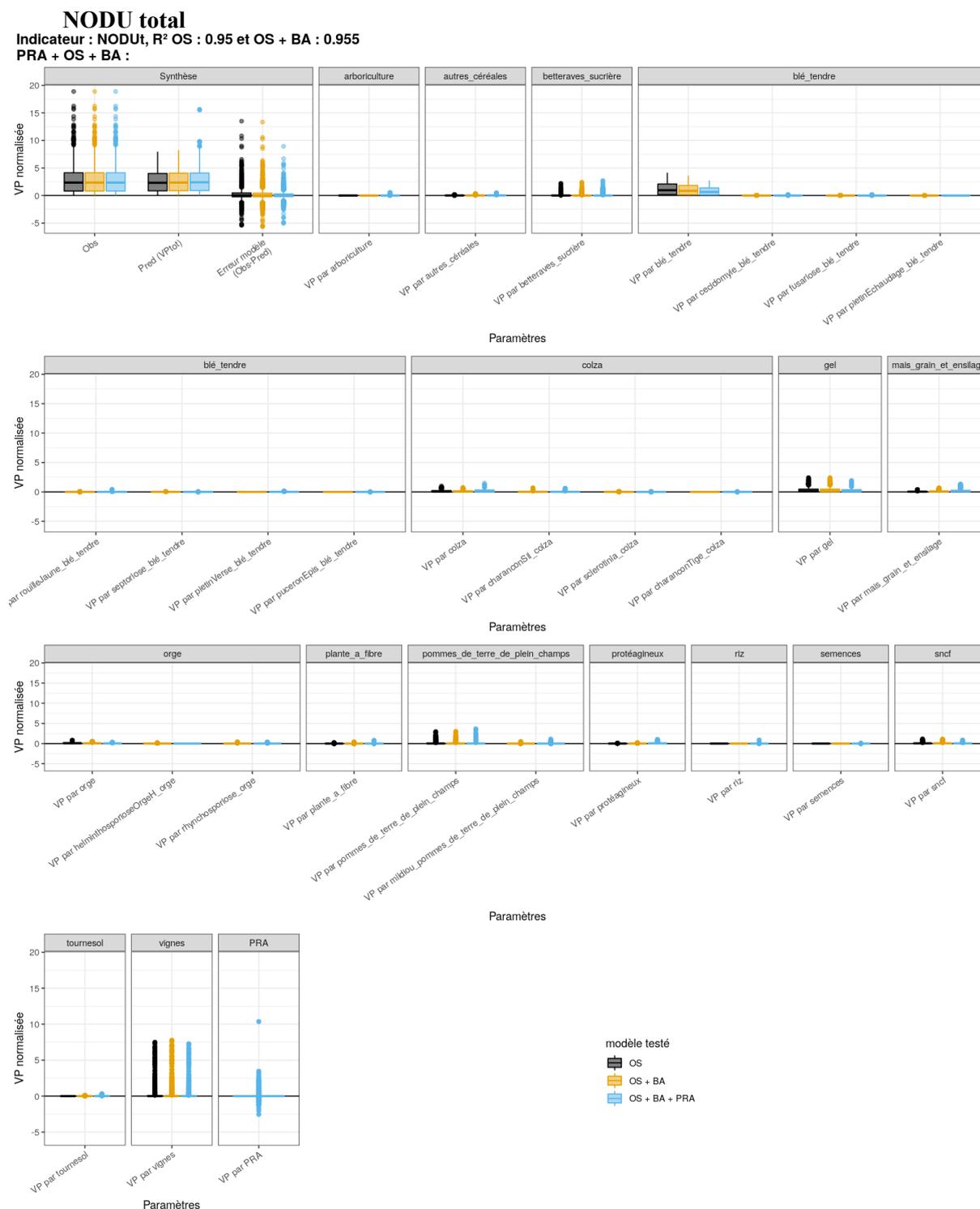


Figure J.1 : Variations Prédites normalisées (VP / surface totale modélisée PRA) du NODU total par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnées, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA).

NODU herbicides

Indicateur : NODU_Herbic., R² OS : 0.965 et OS + BA : 0.969

PRA + OS + BA :

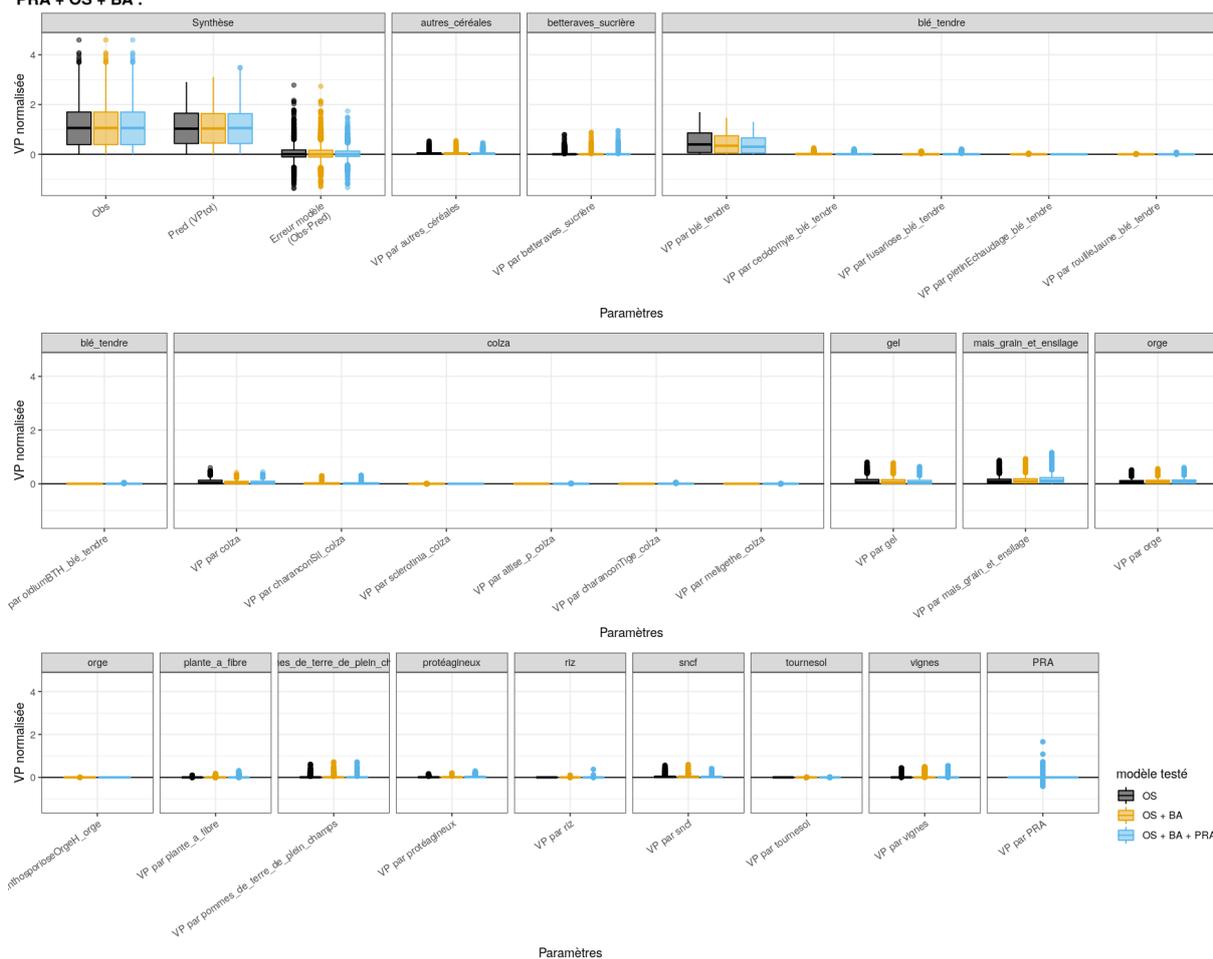


Figure J.2 : Variations Prédites normalisées (VP / surface totale modélisée PRA) du NODU herbicides par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnées, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA).

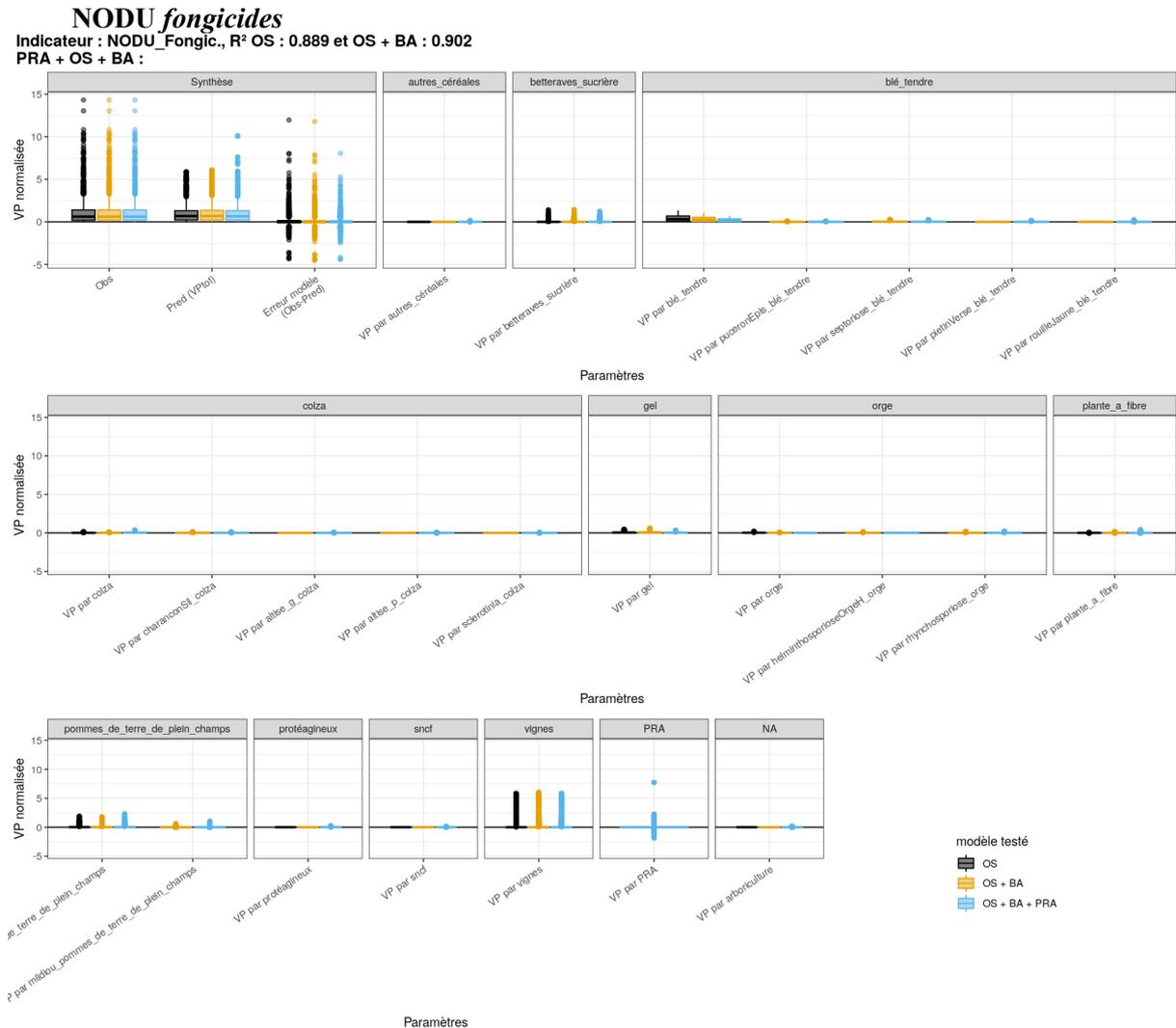


Figure J.3 : Variations Prédites normalisées (VP / surface totale modélisée PRA) du NODU fongicides par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnées, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA).

NODU insecticidesIndicateur : NODU_Insect.acaric., R^2 OS : 0.851 et OS + BA : 0.854

PRA + OS + BA :

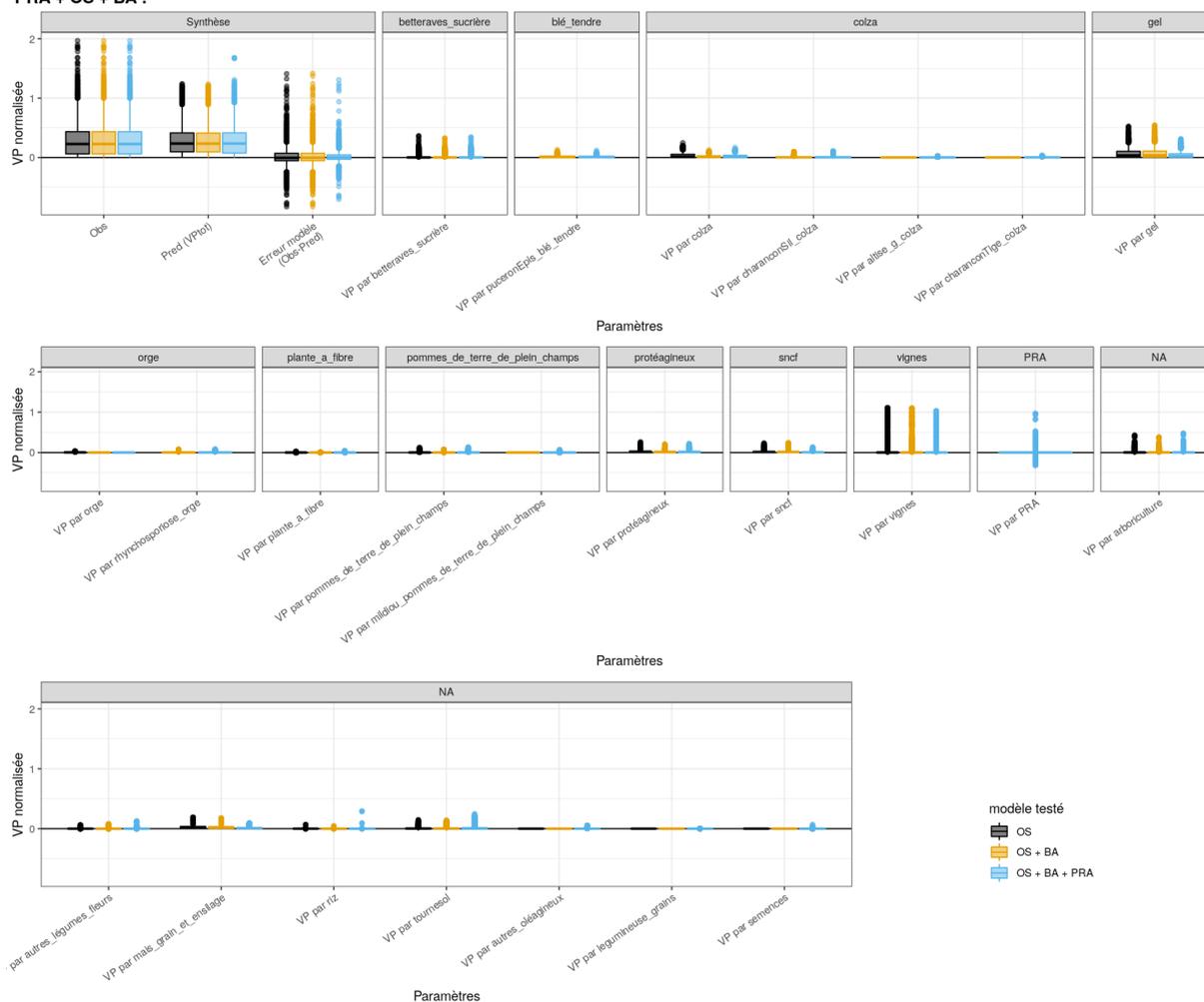


Figure J.4 : Variations Prédites normalisées (VP / surface totale modélisée PRA) du NODU insecticides par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnées, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA).

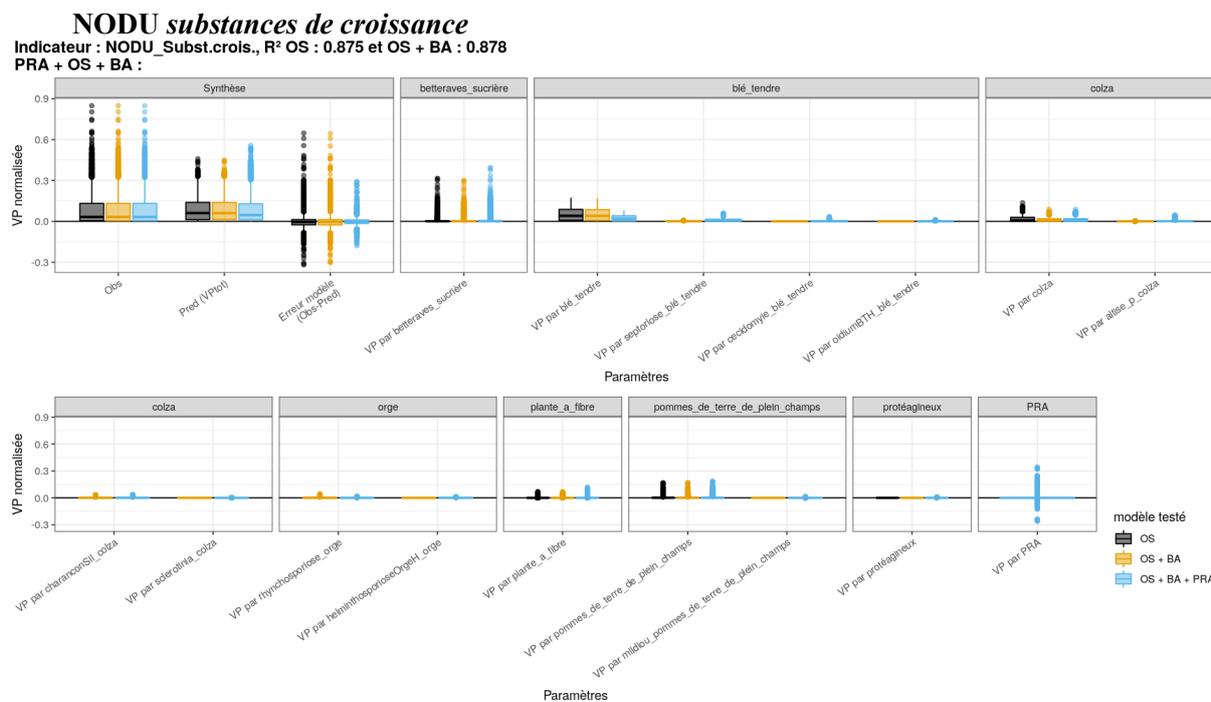


Figure J.5 : Variations Prédites normalisées (VP / surface totale modélisée PRA) du NODU substances de croissance par les occupations du sol (OS) et les bioagresseurs (BA) sélectionnées, ainsi que l'erreur associée au modèle Lasso réalisé et au modèle nul selon le type de modèle réalisé : modèle avec les occupations du sol seul (OS) ou avec la pression en bioagresseurs (OS + BA).

Annexe K : Synthèse des valeurs obtenues pour les coefficients PRA du modèle

NODU ~ OS + BA + PRA

PRA	
Nombre de PRA	coefficient (NODU)
2]293000;366498.407]
1]147000;220000]
8]73000;147000]
111]0;73000]
500	0
62] -36000;0]
16] -71000;-36000]
4] -107000;-71000]
1] -142000;-107000]
1] -177728.531;-142000]

Annexe L : Argumentation pour la simplification du calcul du NODU

Au cours de notre travail sur le NODU et de nos échanges avec les parties prenantes scientifiques, techniques et administratives nous avons acquis la conviction que tout le monde aurait à gagner à la simplification du NODU, tant d'un point de vue technique que d'un point de vue scientifique et de communication.

Le calcul actuel de la DU pour une substance, fondement du NODU se fait par les étapes suivantes :

- pour chaque culture, identification de la dose maximale d'utilisation
- moyenne des doses max des différentes cultures pondérées par leurs surfaces l'année donnée

L'expérience montre que :

- 1) ce calcul est très long, il prend presque trois mois chaque année aux services du MAA car **l'attribution des substances à des cultures est très complexe**. Le simple fait que personne n'ait été capable depuis plusieurs années de produire un NODU régional en calculant les DUs à l'échelle régionale devrait prouver la difficulté de la chose.
- 2) Nous ne voyons aucun véritable intérêt à prendre en compte les autorisations ANSES par culture, notre travail, ainsi que des travaux précédents sur les enquêtes pratiques culturelles, montrent que **l'autorisation d'un produit sur une culture n'a qu'un lien très limité avec le fait que la substance soit utilisée sur cette culture**.
- 2bis) **L'utilisation d'un maximum pour une culture est d'un point de vue statistique dangereux** car les extremums (maximums ou minimums) sont très instables : les changements de réglementation peuvent retirer les doses les plus élevées, induisant mathématiquement une élévation du NODU qui leur est inversement lié. Ces extremums sont aussi sensibles à des erreurs (outliers) inévitables pour les bases de données de cette taille.
- 3) Vu l'aspect complexe du 1) et aléatoire de 2 et 2bis), **ces calculs de DU ne sont ni reproductibles ni fiables**.

- 4) Ce calcul est **très difficile à comprendre et à expliquer**, a) donnant **l'impression à tort que les surfaces jouent un grand rôle** dans le calcul, en effet, nous montrons qu'à l'échelle nationale les NODU ne sont impactés que de 2% par les variations de DU qui pourtant traduisent à la fois les changements de surfaces et les modifications réglementaires, b) **limitant la confiance des gens** dans cette usine à gaz, nous l'avons vu dans de nombreuses réunions, notamment avec les animateurs régionaux Ecophyto mais aussi dans des réunions avec d'autres chercheurs.
- 5) La conjonction des points précédents fait que **le NODU est trop peu utilisé**, la QSA lui étant parfois préférée, **alors que le NODU permet de prendre en compte l'augmentation de substances très toxiques et utilisées à faible dose, ce que la QSA ne peut pas**. C'est très dommageable car le NODU est l'indicateur le plus pertinent actuellement disponible pour suivre de manière fiable l'intensification et la potentielle désintensification future de l'agriculture. C'est à notre avis le problème le plus grave.
- 6) Les **doses autorisées**, variables entre AMM et dans le temps, ne traduisent que de manière **indirecte et fragmentaire la réalité environnementale**, agronomique et toxicologique. **Ne justifiant pas que l'on attache trop d'importance** au détail des doses autorisées par culture.
- 7) Le calcul actuel de la DU conduit à se **poser la question de calculs de DU différentes par région**, pour prendre en compte les surfaces de cultures différentes. En effet, si la prise en compte des surfaces se justifiait au niveau national (et nous sommes convaincu que ce n'est pas le cas) comment justifier qu'elle ne se justifie pas à l'échelle régionale ? Cela **multiplierait le temps perdu** mais aussi les **difficultés de comparaisons** entre régions d'un point de vue environnemental et pour la santé des populations puisque les DUs seraient différentes entre régions.

Il faut donc **simplifier le calcul de la DU**. Nous proposons d'utiliser tout simplement la **médiane (ou la moyenne) des doses autorisées par l'ANSES**, sans prendre en compte les surfaces des cultures, et dès 2021 avec les avantages suivants :

1. La médiane a l'avantage d'être **stable et peu sensible aux erreurs** dans la base de données.

2. N'ayant plus à faire de lien avec les cultures, l'automatisation sera évidente faisant **gagner un temps considérable**.
3. Il sera **évident d'expliquer** ce qu'est le NODU : la somme des volumes divisés par la dose médiane d'utilisation pour chaque substance, toutes cultures confondues.
4. La **modification des valeurs de NODU devrait être marginale** : nous avons déjà montré qu'à l'échelle nationale ce calcul induit des variations inférieures à 2% du NODU par rapport aux calculs complexes actuels.
5. Les DUs seront plus stables, plus compréhensibles et plus rapidement disponibles **facilitant leur utilisation par les différentes parties prenantes**.
6. Le transfert actuel du calcul du NODU au SSP du MAA est une bonne occasion de faire ce changement.

Le temps et l'énergie gagnées pourraient profitablement être utilisés pour l'analyse des NODU résultants ou pour le calcul d'indices plus orientés vers la toxicité des produits utilisés, tel que le "Pesticide Load Index" danois⁷³ (Kudsk et al., 2018, Möhring et al., 2020) qui n'est pas parfait mais qui a le mérite de s'attaquer à la problématique du risque induit par les pesticides.

⁷³

Références

- Agreste, 2013. Enquête Pratiques culturales 2011 - Les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures - Indicateurs de fréquence de traitement (No. 18), Agreste Les Dossiers. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt.
- ANSES, 2018. Délais de grâce octroyés par l'Anses et délais de mise à jour des étiquettes en cas de retrait, de modification ou de non-renouvellement d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) ou d'un permis de commerce parallèle de produits phytopharmaceutiques. https://www.anses.fr/fr/system/files/Note_info_delaix_grace.pdf
- Bache, S.M., Wickham, H., 2014. magrittr: A Forward-Pipe Operator for R.
- Benarous, A., Duchesne, C., Dubreuil, C., Mandaron, J., 2006. la généralisation de la téléprocédure pour les déclarations de surfaces déposées par les agriculteurs (Mission d'audit de modernisation). <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/064000433.pdf>
- Böcker, T., Finger, R., 2016. European Pesticide Tax Schemes in Comparison: An Analysis of Experiences and Developments. *Sustainability* 8, 378. <https://doi.org/10.3390/su8040378>
- Borrell, Anaïs, 2018. Annexe 3 : La BNV-D : structure et évolution depuis sa création, in: Risques et bénéfices relatifs des alternatives aux produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes, Rapport d'appui scientifique et technique sur l'impact agricole. ANSES, Maisons-Alfort, France, pp. 123–133.
- Cantelaube, P., Carles, M., 2015. Le Registre Parcellaire Graphique : des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole. Cahier des Techniques de l'INRA 58–64.
- Carles, M., Cahuzac, E., Guichard, L., Martin, P., 2015. Mieux suivre spatialement l'usage des pesticides, en particulier sur les bassins versants, en s'appuyant sur un observatoire des ventes détaillé au code postal de l'utilisateur final de produit. (Rapport [Contrat] Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
- Delaune, T., Ouattara M.S., Ballot R., Sausse C., Felix I., Maupas F., Chen M., Morison M., Makowski D., **Barbu C.M.**, 2021. Landscape drivers of pests and pathogens abundance in arable crops. *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ecog.05433>
- Direction générale de l'alimentation, 2017. Méthodologie de calcul du NODU (Nombre de doses unités). <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-nodu>
- Dowle, M., Srinivasan, A., 2019. data.table: Extension of `data.frame`.
- Fan, L., Niu, H., Yang, X., Qin, W., Bento, C.P.M., Ritsema, C.J., Geissen, V., 2015. Factors affecting farmers' behaviour in pesticide use: Insights from a field study in northern China. *Science of The Total Environment* 537, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.150>
- Femenia, F., Letort, E., 2016. How to significantly reduce pesticide use: An empirical evaluation of the impacts of pesticide taxation associated with a change in cropping practice. *Ecological Economics* 125, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.02.007>
- Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R., 2010. Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent. *J Stat Softw* 33, 1–22.
- Gong, Y., Baylis, K., Kozak, R., Bull, G., 2016. Farmers' risk preferences and pesticide use

- decisions: evidence from field experiments in China. *Agricultural Economics* 47, 411–421. <https://doi.org/10.1111/agec.12240>
- Green, J., 2000. Adjuvant outlook for pesticides. *Pest. Outlook* 11, 196–199. <https://doi.org/10.1039/b008021g>
- Grolemund, G., Wickham, H., 2011. Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software* 40, 1–25.
- Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Reau, R., Savini, I., 2017. Le plan Ecophyto de réduction d’usage des pesticides en France : décryptage d’un échec et raisons d’espérer. *Cah. Agric.* 26. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017004>
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. *The Elements of Statistical Learning: Prediction, Inference and Data Mining.*, 2nd edition. ed. Springer-Verlag, New York.
- Hossard, L., Guichard, L., Pelosi, C., Makowski, D., 2017. Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. *Sci. Total Environ.* 575, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.008>
- Joassard, I., Tavernier, J.-L., Mayo-Simbsier, S., 2017. *Les acteurs économiques et l’environnement - Edition 2017.* Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, Mayenne.
- Klik, M., 2020. *fst: Lightning Fast Serialization of Data Frames for R.*
- Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., Tette, J., 1992. A method to measure the environmental impact of pesticides. *New Yorks Food Life Sci Bull* 139, 1–8.
- Krogh, K.A., Halling-Sørensen, B., Mogensen, B.B., Vejrup, K.V., 2003. Environmental properties and effects of nonionic surfactant adjuvants in pesticides: a review. *Chemosphere* 50, 871–901. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00648-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00648-3)
- Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Ørum, J.E., 2018. Pesticide Load—A new Danish pesticide risk indicator with multiple applications. *Land Use Policy* 70, 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.010>
- Malherbe, L., Salomon, M., Jouglet, P., 2019. *BNV-D - Synthèse des travaux du GT Mise en Qualité des Données de la BNV-D et perspectives d’amélioration (Rapport d’étude No. DRC-19-158752-00020A).* Agence Française pour la Biodiversité.
- Meisner, M.H., Zaviezo, T., Rosenheim, J.A., 2017. Landscape crop composition effects on cotton yield, *Lygus hesperus* densities and pesticide use: Landscape crop composition, cotton yield and pest densities. *Pest. Manag. Sci.* 73, 232–239. <https://doi.org/10.1002/ps.4290>
- Mesnage, R., Antoniou, M.N., 2018. Ignoring Adjuvant Toxicity Falsifies the Safety Profile of Commercial Pesticides. *Front. Public Health* 5, 361. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00361>
- Möhring, N., Gaba, S., Finger, R., 2019. Quantity based indicators fail to identify extreme pesticide risks. *Sci. Total Environ.* 646, 503–523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.287>
- Möhring, N., Bozzola, M., Hirsch, S., Finger, R., 2020. Are pesticides risk decreasing? The relevance of pesticide indicator choice in empirical analysis. *Agricultural Economics* 51, 429–444. <https://doi.org/10.1111/agec.12563>
- US-ODR, 2018. *Spatialisation des ventes de produits Phytopharmaceutiques Plan Ecophyto II (Plaquette).*

- Pettersson, O., Lehman, H., 1994. Reduced Pesticide Use in Scandinavian Agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences* 13, 43–55. <https://doi.org/10.1080/07352689409701907>
- R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rahman, S., 2003. Farm-level pesticide use in Bangladesh: determinants and awareness. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 95, 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00089-0)
- Rahman, S., 2015. Agroecological, climatic, land elevation and socio-economic determinants of pesticide use at the farm level in Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 212, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.002>
- Rahman, S., Chima, C., 2018. Determinants of Pesticide Use in Food Crop Production in Southeastern Nigeria. *Agriculture* 8, 35. <https://doi.org/10.3390/agriculture8030035>
- Rosenheim, J.A., Cass, B.N., Kahl, H., Steinmann, K.P., 2020. Variation in pesticide use across crops in California agriculture: Economic and ecological drivers. *Science of The Total Environment* 733, 138683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138683>
- Schott, Céline, Mignolet, Catherine, Meynard, Jean-Marc, 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL* 17, 276–291. <https://doi.org/10.1051/ocl.2010.0334>
- Sear, C., Filippi, P., Carles, M., Cahuzac, E., Guichard, L., Martin, P., 2017. Mieux suivre spatialement l'usage des pesticides, en particulier sur les bassins versants, en s'appuyant sur un observatoire des ventes détaillées au code postal de l'utilisateur final de produit (Rapport [Contrat] Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).
- Stenrod, M., Heggen, H., Bolli, R., Eklo, O., 2008. Testing and comparison of three pesticide risk indicator models under Norwegian conditions—A case study in the Skuterud and Heiabekken catchments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 123, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.03.003>
- Strassemeyer, J., Daehmlow, D., Dominic, A.R., Lorenz, S., Golla, B., 2017. SYNOPSIS-WEB, an online tool for environmental risk assessment to evaluate pesticide strategies on field level. *Crop Prot.* 97, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.036>
- Tennekes, M., 2018. tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software* 84, 1–39. <https://doi.org/10.18637/jss.v084.i06>
- Tibshirani, R., 1996. Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 58, 267–288. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x>
- Tibshirani, R., 2011. Regression shrinkage and selection via the lasso: a retrospective. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 73, 273–282. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2011.00771.x>
- Truche, C., Poméon, T., Fernandez, F., Martin, P., Malherbe, L., Lescot, C., 2019. Vers un meilleur suivi spatial des usages de produits phytosanitaires à partir de la BNV-d. Colloque "Les inégalités socio-environnementales de santé. Pour une approche interdisciplinaire", Paris, France. <https://hal.inrae.fr/view/index/identifiant/hal-02437606>
- van der Werf, H.M.G., Zimmer, C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 2225–2249. <https://doi.org/10.1016/S0045-252>

[6535\(97\)10194-1](#)

Wickham, H., 2011. testthat: Get Started with Testing. *The R Journal* 3, 5–10.

Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.

Wickham, H., 2019. stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations.

Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., 2020. dplyr: A Grammar of Data Manipulation.

Wilke, C.O., 2019. cowplot: Streamlined Plot Theme and Plot Annotations for “ggplot2.”

Wu, Y., Xi, X., Tang, X., Luo, D., Gu, B., Lam, S.K., Vitousek, P.M., Chen, D., 2018. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. *Proc Natl Acad Sci USA* 115, 7010–7015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>