



HAL
open science

Alternatives au S-métolachlore et étude de leur mobilisation. INRAE. 17 septembre 2022. 203 p.

Xavier Reboud, Margot Tysebaert, Benjamin Fayolle

► To cite this version:

Xavier Reboud, Margot Tysebaert, Benjamin Fayolle. Alternatives au S-métolachlore et étude de leur mobilisation. INRAE. 17 septembre 2022. 203 p.. [Rapport de recherche] INRAE Dijon Agroécologie; (DPA3P) - Dispositif Pérenne d'Appui aux Politiques Publiques sur les Pesticides. 2022. hal-03807462

HAL Id: hal-03807462

<https://hal.inrae.fr/hal-03807462>

Submitted on 9 Oct 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Alternatives au S-métolachlore et étude de leur mobilisation

17 SEPTEMBRE 2022

Xavier Reboud
Margot Tysebaert
Benjamin Fayolle

Liste des auteurs :

Xavier Reboud, Margot Tysebaert, Benjamin Fayolle.

Supervision :

Christian Huyghe, Directeur Scientifique Agriculture d'INRAE.

Financement :

Ce rapport a bénéficié d'un financement de l'Office Français de la Biodiversité.

Remerciements :

Les conclusions de ce travail n'engagent que les auteurs de ce rapport. Il n'aurait néanmoins pas été possible sans de nombreuses personnes que nous souhaitons remercier ici pour leur aide à différentes étapes ayant mené à la publication de ce rapport.

Nous souhaitons remercier particulièrement Alain Carpentier (INRAE), Nicolas Chartier (Idèle, Réseau DEPHY ECOPHYTO), Nathalie Delame (INRAE-AgroParisTech), Adélaïde Fadhuile (Université Grenoble Alpes), Christian Huyghe (INRAE), Florence Jacquet (INRAE), Thomas Poméon (INRAE), et Lionel Védrine (INRAE) et Claude Vergnet (ANSES).

Nous avons également eu des échanges avec un certain nombre d'experts à différentes étapes de ce travail ainsi qu'une aide précieuse de la part de certains pour la phase de relecture de ce rapport. Nous souhaitons ainsi remercier ici ces personnes, rattachées aux structures suivantes : Anses, Instituts techniques agricoles (Arvalis, FNAMS, ITAB, ITB, Terres Inovia, UNILET), équipe Agrosyst d'INRAE, Observatoire du Développement Rural d'INRAE, Direction d'Appui aux Politiques Publiques d'INRAE, Ingénieurs du Réseau DEPHY, représentants du Luxembourg, Agences de l'eau, Ministères, Direction pour la science ouverte d'INRAE et autres collègues scientifiques.

Pour citer ce rapport :

Reboud X., Tysebaert M. & Fayolle B. *Alternatives au S-métolachlore et étude de leur mobilisation*. INRAE. 17 septembre 2022. 201 p. [Code Hal de référence et DOI](#)

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations	9
Résumé exécutif.....	12
1. Introduction.....	20
1.1. Commande.....	20
1.2. Le contexte	20
1.2.1. Quelques rappels réglementaires : mise sur le marché des substances actives et produits pharmaceutiques	20
1.2.2. Règlement (CE) N° 1107/2009 : cadre de l'évaluation comparative	21
1.2.3. Une molécule impliquée dans la pollution des eaux.....	22
1.3. L'approche employée.....	25
1.3.1. Les bases de données mobilisées	25
1.3.2. Littérature et échanges complémentaires.....	26
1.3.3. Définition du terme alternatives.....	28
1.4. Les grandes étapes de ce rapport	29
2. Caractéristiques du S-métolachlore, historique et tonnages employés.....	31
2.1. Chronologie générale.....	31
2.2. Caractéristiques générales.....	32
2.3. Caractéristiques chimiques	35
2.4. Tendances des tonnages employés.....	35
2.5. Répartition des usages.....	38
2.6. Le S-métolachlore dans la presse grand public	41
3. Evaluation du degré de dépendance de l'agriculture au S-métolachlore	42
3.1. Utilisations du S-métolachlore d'après la BNVD au regard de l'assolement	42
3.1.1. Quantités achetées et quantités maximales consommables (QMC).....	42
3.1.2. Mise en évidence des hétérogénéités géographiques	48
3.1.3. Facteurs de tension.....	52
3.2. Utilisations du S-métolachlore par rapport à d'autres substances actives.....	55
4. Qualité de l'eau et scénarios de baisse des doses	57

4.1.	Impacts sur la qualité de l’eau et changement de réglementation	57
4.2.	Scénarios de baisse des doses : quelles options pour la réglementation ?	59
4.2.1.	Scénarios étudiés	59
4.2.2.	Résultats	60
4.3.	Desserrer la dépendance de l’agriculture au S-métolachlore	63
5.	L’utilisation du S-métolachlore au Luxembourg et en France.....	66
5.1.	Cas du Luxembourg.....	66
5.1.1.	Contexte	66
5.1.2.	Mesures prises face à la contamination des eaux.....	67
5.1.3.	Évolution de la situation après 2015 : désherbage mécanique et report sur d’autres substances actives	70
5.1.4.	Evolution des préconisations pour les programmes de désherbage.....	73
5.1.5.	Éléments de bilan sept ans après l’interdiction	75
5.2.	Remontées du terrain en France : raisons de l’utilisation du S-métolachlore et discussion autour des alternatives	76
5.2.1.	Éléments de contexte	76
5.2.2.	Raisons de l’utilisation du S-métolachlore	78
5.2.3.	Retours du terrain sur les alternatives au S-métolachlore	83
5.3.	Pratiques générales pour réduire l’utilisation des herbicides	88
5.3.1.	Le recours au désherbage mixte	88
5.3.2.	Autres pistes envisagées.....	90
5.3.3.	L’appui au désherbage en grandes cultures validé dans les CEPPs	92
6.	Alternatives au S-métolachlore et impacts technico-économiques de leur mobilisation sur les exploitations agricoles.....	95
6.1.	Utilisations du S-métolachlore, exemples d’alternatives et impacts technico-économiques de leur mobilisation	95
6.1.1.	Maïs Grain.....	107
6.1.2.	Maïs fourrage	112
6.1.3.	Soja	115
6.1.4.	Tournesol.....	119
6.1.5.	Exemple d’itinéraires techniques en cultures de betteraves, haricots et portegraines, avec et sans S-métolachlore.....	123
6.2.	Comparaison entre conventionnel et biologique : une logique de systèmes.....	125

6.3. Analyses de sensibilité	129
6.4. Zoom sur quelques alternatives chimiques.....	131
6.5. Le désherbage mixte dans DEPHY	134
6.6. Synthèse de l’analyse des parcelles de DEPHY	138
7. Conclusion et perspectives	141
Bibliographie	146
Annexes.....	154
Annexe 1 : Saisine.....	154
Annexe 2 : Bases de données mobilisées	156
Annexe 3 : Le S-métolachlore dans la presse grand public.....	163
Annexe 4 : Spectres d’action de quelques substances actives herbicides seules ou en combinaison	167
Annexe 5 : Usages autorisés du S-métolachlore, du diméthénamide-P et de la Pendiméthaline fin 2021	171
Annexe 6 : Description des indicateurs DEPHY	173
Annexe 7 : Description des rotations dans DEPHY.....	175
Annexe 8 : Table des prix des récoltes millésimés utilisés pour l’analyse économique de DEPHY.....	176
Annexe 9 : Hypothèses de la pondération par les scores de propension	180
Annexe 10 : Détail des résultats de l’analyse de sensibilités menée sur les estimations des performances économiques des parcelles avec et sans S-métolachlore	188
Annexe 11 : Détails de la comparaison du S métolachlore à ses potentielles alternatives chimiques	191
Annexe 12 : Montant de redevance pour pollution diffuse (RPD) et niveaux d’alerte pour la santé humaine et l’environnement des principaux herbicides	200

Liste des figures

FIGURE 1 : TAUX DE QUANTIFICATION DU S-MÉTOLACHLORE ET SES MÉTABOLITES ESA ET OXA DANS LES EAUX DE SURFACE EN FRANCE (MÉTROPOLE) EN 2015 ET 2016.....	23
FIGURE 2 : TAUX DE DÉPASSEMENT DE LA NORME DU S-MÉTOLACHLORE ET SES MÉTABOLITES ESA ET OXA DANS LES EAUX SOUTERRAINES EN FRANCE (MÉTROPOLE) DE 2015 À 2017	23
FIGURE 3 : CHRONOLOGIE DU S-MÉTOLACHLORE EN FRANCE	31
FIGURE 4 : QUANTITÉS DE S-MÉTOLACHLORE ACHETÉES DE 2014 À 2020 EN FRANCE (TONNES).....	36
FIGURE 5 : QUANTITÉS DE S-MÉTOLACHLORE ACHETÉES EN 2020 PAR RÉGION EN FRANCE MÉTROPOLITAINE (EN KG)	37
FIGURE 6 : QUANTITÉS DE S-MÉTOLACHLORE EMPLOYÉES PAR CULTURES EN FRANCE EN 2011, 2014 ET 2017 (EN TONNES)	40
FIGURE 7 : CALCUL DE LA QUANTITÉ MAXIMALE DE S-MÉTOLACHLORE POUR LE MAÏS GRAIN	45
FIGURE 8 : ANALYSE DE LA QMC POUR LE S-MÉTOLACHLORE EN FRANCE EN 2020	47
FIGURE 9 : RÉPARTITION DES CODES POSTAUX SELON LES QUANTILES DU RATIO BNVD/QMC	48
FIGURE 10 : QUANTITÉS DE S-MÉTOLACHLORE VENDUES PAR CODE POSTAL EN 2020.....	50
FIGURE 11 : RATIO BNVD/QMC PAR CODE POSTAL EN 2020.....	50
FIGURE 12 : VALEURS DE A POUR DIFFÉRENTES SA EN 2020	55
FIGURE 13 : VALEURS DE R2 POUR DIFFÉRENTES SA EN 2020.....	56
FIGURE 14 : RÉSULTATS DES PROJECTIONS D'ACHATS DE S-MÉTOLACHLORE EN FONCTION DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION	62
FIGURE 15 : RÉSULTAT DE LA CAMPAGNE D'ANALYSES DES EAUX SOUTERRAINES DU 9 AU 17 OCTOBRE 2014 AU LUXEMBOURG ..	67
FIGURE 16 : CARTOGRAPHIE DES ZONES DE PROTECTION DE L'EAU DU LUXEMBOURG DÉBUT 2022.....	68
FIGURE 17 : DIFFÉRENTES ZONES DE PROTECTION D'UN CAPTAGE D'EAU POTABLE AU LUXEMBOURG.....	69
FIGURE 18 : ÉVOLUTION DE LA SURFACE EN MAÏS AU LUXEMBOURG (EN HECTARES).....	70
FIGURE 19 : RÉPARTITION DES CULTURES DANS DEPHY ET PK (2017).....	97
FIGURE 20 : RÉPARTITION DES CULTURES PAR TYPE DE DÉSHERBAGE DANS DEPHY ET PK (2017).....	98
FIGURE 21 : IFT TOTAL DANS DEPHY ET PK (2017).....	99
FIGURE 22 : IFT HERBICIDE DANS DEPHY ET PK (2017)	100
FIGURE 23 : RENDEMENTS DANS DEPHY ET PK (2017)	100
FIGURE 24 : STRATÉGIES DE DÉSHERBAGE CONTRE LES ADVENTICES ANNUELLES EN MAÏS GRAIN.....	107
FIGURE 25 : CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE FACTEURS AUX RENDEMENTS EN MAÏS GRAIN	128
FIGURE 26 : NIVEAU DE TENSION AUTOUR DU S-MÉTOLACHLORE POUR LES CODES POSTAUX RÉGULIÈREMENT CITÉS DANS LA PRESSE GRAND PUBLIC.....	166
FIGURE 27 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES INDICATEURS DE DEPHY	174
FIGURE 28 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES CHIMIQUES - MAÏS GRAIN	184
FIGURE 29 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES NON-CHIMIQUES - MAÏS GRAIN.....	184
FIGURE 30 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES CHIMIQUES - MAÏS FOURRAGE	185
FIGURE 31 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES NON-CHIMIQUES - MAÏS FOURRAGE.....	185
FIGURE 32 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES CHIMIQUES - SOJA	186
FIGURE 33 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES NON-CHIMIQUES - SOJA.....	186
FIGURE 34 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES CHIMIQUES - TOURNESOL	187
FIGURE 35 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON AUX ALTERNATIVES NON-CHIMIQUES - TOURNESOL	187
FIGURE 36 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON ENTRE S-MÉTOLACHLORE ET DMTA-P - MAÏS GRAIN	193
FIGURE 37 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON ENTRE S-MÉTOLACHLORE ET DMTA-P - MAÏS FOURRAGE	193
FIGURE 38 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON ENTRE S-MÉTOLACHLORE ET PENDIMÉTHALINE - MAÏS GRAIN	196
FIGURE 39 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON ENTRE S-MÉTOLACHLORE ET PENDIMÉTHALINE - MAÏS FOURRAGE	196
FIGURE 40 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON ENTRE S-MÉTOLACHLORE ET SULCOTRIONE - MAÏS GRAIN	199
FIGURE 41 : EQUILIBRE DES COVARIABLES POUR LA COMPARAISON ENTRE S-MÉTOLACHLORE ET SULCOTRIONE - MAÏS FOURRAGE	199

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : RECHERCHE ET QUANTIFICATION DES MÉTABOLITES ESA, OXA ET NOA DU S-MÉTOLACHLORE EN PAYS DE LA LOIRE EN 2020.....	22
TABLEAU 2 : USAGES AUTORISÉS DU S-MÉTOLACHLORE EN FÉVRIER 2022, COMPOSITIONS ET DOSES MAXIMALES AUTORISÉES DES PRODUITS COMMERCIAUX.....	34
TABLEAU 3 : QUANTITÉS DE S-MÉTOLACHLORE ACHETÉES PAR AMM EN 2017 ET EN 2020 (EN KG) EN FRANCE.....	37
TABLEAU 4 : SURFACES TRAITÉES AU S-MÉTOLACHLORE, DOSES MOYENNES ET VOLUMES EMPLOYÉS PAR CULTURE EN FRANCE EN 2017.....	38
TABLEAU 5 : SURFACES TRAITÉES AU S-MÉTOLACHLORE, DOSES MOYENNES ET VOLUMES EMPLOYÉS PAR CULTURE EN FRANCE EN 2014.....	39
TABLEAU 6 : SURFACES TRAITÉES AU S-MÉTOLACHLORE, DOSES MOYENNES ET VOLUMES EMPLOYÉS PAR CULTURE EN FRANCE EN 2011.....	40
TABLEAU 7 : DIFFÉRENCE ENTRE LES SURFACES TOTALES EN FRANCE ISSUES DU RPG ET DE LA SAA D'AGRESTE EN 2020.....	43
TABLEAU 8 : DIFFÉRENCES ENTRE LES SURFACES EN AB EN FRANCE ISSUES DU RPG AB ET DES DONNÉES DE L'AGENCE BIO EN 2020.....	44
TABLEAU 9 : DIFFÉRENTES ÉTAPES DE LA MODÉLISATION DU RATIO BNVD/QMC.....	54
TABLEAU 10 : PESTICIDES À L'ORIGINE DE CLASSEMENT EN SITUATION NC1 OU NC2 EN 2020.....	58
TABLEAU 11 : : EFFET DE LA RÉGLEMENTATION DE NOVEMBRE 2021 SUR LES QUANTITÉS MAXIMALES DE S-MÉTOLACHLORE.....	59
TABLEAU 12 : SYNTHÈSE DES ACTIONS CONTRIBUANT À RÉDUIRE LE RECOURS AU S-MÉTOLACHLORE.....	63
TABLEAU 13 : UTILISATION D'HERBICIDES SUR LE MAÏS AU LUXEMBOURG (EN KG DE SUBSTANCES ACTIVES).....	72
TABLEAU 14 : PART DES SURFACES TRAITÉES PAR AU MOINS UN HERBICIDE CHIMIQUE ET CELLES TRAITÉES AU S-MÉTOLACHLORE EN 2017 PAR CULTURES.....	77
TABLEAU 15 : USAGES AUTORISÉS DU S-MÉTOLACHLORE, DU DIMÉTHÉNAMIDE-P ET DE LA PENDIMÉTHALINE FIN 2021.....	84
TABLEAU 16 : UNE PARTIE DES SPECTRES D'ACTION DU S-MÉTOLACHLORE, DU DIMÉTHÉNAMIDE-P ET DE LA PENDIMÉTHALINE.....	85
TABLEAU 17 : EXTRAIT DU CATALOGUE DES CEPPS.....	93
TABLEAU 18 : GROUPES UTILISÉS POUR L'ANALYSE STATISTIQUE DE DEPHY.....	96
TABLEAU 19 : NOTATIONS POUR LA PONDÉRATION PAR LES SCORES DE PROPENSION.....	102
TABLEAU 20 : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE MAÏS GRAIN – COMPARAISON AU GROUPE 2.....	110
TABLEAU 21 : : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE MAÏS GRAIN – COMPARAISON AU GROUPE 4.....	111
TABLEAU 22 : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE MAÏS FOURRAGE - COMPARAISON AU GROUPE 2.....	113
TABLEAU 23 : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE MAÏS FOURRAGE - COMPARAISON AU GROUPE 4.....	114
TABLEAU 24: RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE SOJA - COMPARAISON AU GROUPE 2.....	117
TABLEAU 25 : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE SOJA - COMPARAISON AU GROUPE 4.....	118
TABLEAU 26 : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE TOURNESOL - COMPARAISON AU GROUPE 2.....	121
TABLEAU 27 : RÉSULTATS TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES PARCELLES DEPHY POUR LE TOURNESOL - COMPARAISON AU GROUPE 4.....	122
TABLEAU 28 : GRAMINICIDES DE PRÉ-LEVÉE POUR LA BETTERAVE.....	123
TABLEAU 29 : DIFFÉRENCES MOYENNES DE RENDEMENTS AINSI QUE D'APPORTS EN FERTILISANTS (MINÉRAUX ET ORGANIQUES) ENTRE LES PARCELLES TRAITÉES AU S-MÉTOLACHLORE ET LES PARCELLES EN AB.....	126
TABLEAU 30 : SYNTHÈSE DES DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES POUR LES INDICATEURS TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE DEPHY ENTRE LE S-MÉTOLACHLORE ET DES ALTERNATIVES POTENTIELLES.....	132
TABLEAU 31 : PHRASES DE RISQUES POUR LE S-MÉTOLACHLORE ET DES ALTERNATIVES POTENTIELLES.....	134
TABLEAU 32 : ANALYSE DU DÉSHÉRBAGE MIXTE DANS DEPHY - MAÏS GRAIN.....	136
TABLEAU 33 : ANALYSE DU DÉSHÉRBAGE MIXTE DANS DEPHY - MAÏS FOURRAGE.....	137
TABLEAU 34 : SYNTHÈSES DES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DE DEPHY.....	139

TABLEAU 35 : LISTE ET DESCRIPTION DES VARIABLES CLIMATIQUES ISSUES DE SAFRAN	160
TABLEAU 36 : LISTE ET DESCRIPTION DES VARIABLES ISSUES DE L'ESDAC	161
TABLEAU 37 : LISTE ET DESCRIPTION DES MODALITÉS DE LA TYPOLOGIE DE LA RURALITÉ	162
TABLEAU 38 : SPECTRE COMPLET DE QUELQUES SUBSTANCES ACTIVES	167
TABLEAU 39 : DESCRIPTION DES CHARGES ISSUES DE DEPHY	173
TABLEAU 40 : DESCRIPTION DES MARGES ISSUES DE DEPHY	174
TABLEAU 41 : TYPOLOGIE DE LA ROTATION ISSUE DE DEPHY	175
TABLEAU 42 : TABLE DES PRIX DES RÉCOLTES MILLÉSIMÉS UTILISÉS POUR L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DE DEPHY	176
TABLEAU 43 : VALEURS MINIMUM ET MAXIMUM DES SCORES DE PROPENSION ESTIMÉS	180
TABLEAU 44 : PARCELLES EXCLUES DE L'ANALYSE	181
TABLEAU 45 : DESCRIPTION DES COVARIABLES INCLUES DANS L'ESTIMATION DES SCORES DE PROPENSION	182
TABLEAU 46 : COMPARAISON S-MÉTOLACHLORE - DIMÉTHÉNAMIDE-P - MAÏS GRAIN	191
TABLEAU 47 : COMPARAISON S-MÉTOLACHLORE - DIMÉTHÉNAMIDE-P - MAÏS FOURRAGE	192
TABLEAU 48 : COMPARAISON S-MÉTOLACHLORE - PENDIMÉTHALINE - MAÏS GRAIN	194
TABLEAU 49 : COMPARAISON S-MÉTOLACHLORE - PENDIMÉTHALINE - MAÏS FOURRAGE	195
TABLEAU 50 : COMPARAISON S-MÉTOLACHLORE - SULCOTRIONE - MAÏS GRAIN	197
TABLEAU 51 : COMPARAISON S-MÉTOLACHLORE - SULCOTRIONE - MAÏS FOURRAGE	198
TABLEAU 52 : NIVEAUX D'ALERTE ET MONTANTS DE RPD DES PRINCIPAUX HERBICIDES	201

Liste des abréviations

AB : Agriculture biologique

ACTA : Association de coordination technique agricole

Agreste : marque des publications du SSP

AMM : Autorisation de mise sur le marché

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire

ATE : *Average Treatment Effect*

BIC : *Bayesian Information Criterion*

BNVD : Banque nationale des ventes de produits phytopharmaceutiques par les distributeurs agréés

CEPP : Certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques

CST : Comité scientifique et technique

CUMA : Coopérative d'utilisation de matériel agricole

DGAL : Direction générale de l'Alimentation

DGS : Direction générale de la Santé

dmta-P : diméthénamide-P

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

DU : Dose unité

DVP : Dispositif végétalisé permanent

E-Phy : Catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture autorisés en France

EDCH : Eaux à destination de la consommation humaine

EFSA : Agence européenne de sécurité alimentaire

ESDAC : *European Soil Data Centre*

ETA : Entreprise de travaux agricoles

FNAMS : Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences

GES : Gaz à effet de serre

GIEE : Groupement d'intérêt économique et environnemental

HRAC : *Herbicide Resistance Action Committee*

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

IPAMPA : Indice mensuel des prix d'achat des moyens de production agricoles (produit par l'INSEE)

IPC : Indice des prix à la consommation (produit par l'INSEE)

IPPAP : Indice mensuel des prix agricoles à la production (produit par l'INSEE)

IPTW : *Inverse Probability of Treatment Weighting*

ITA : Instituts techniques agricoles

ITAB : Institut technique de l'agriculture biologique

ITB : Institut technique de la betterave

JOUE : Journal officiel de l'Union européenne

LQ : limite de qualité

MASA : Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire

MTE : Ministère de la Transition écologique

NODU : Nombre de doses unités

ODR : Observatoire du Développement Rural

PAC : Politique agricole commune

Enquêtes PK : Enquêtes Pratiques culturelles

PSD : Panics, sétaires et digitales

PSN : Plan stratégique national

QMC : Quantité Maximale Consommable

R&D : Recherche et Développement

RICA : Réseau d'information comptable agricole

RPD : Redevance pour pollutions diffuses

RPG : Registre parcellaire graphique

RSE : Responsabilité sociétale des entreprises

RTK : *Real Time Kinematic*

SA : Substance active

SAA : Statistique agricole annuelle

SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie (Météo-France)

SAU : Surface agricole utilisée

SER : Service d'Economie Rurale (au Luxembourg)

Smoc : S-métolachlore

SSP : Service de la statistique et de la prospective (du MASA)

SVM : *Support Vector Machine*

TCS : Techniques culturelles simplifiées

UDI : Unité de distribution

UE : Union Européenne

ZNT : Zone de non traitement

ZPS : Zones de protection spéciales (au Luxembourg)

Résumé exécutif

Le S-métolachlore s'est progressivement imposé pour lutter contre les graminées estivales en cultures de printemps.

Le S-métolachlore est un herbicide à action racinaire antigerminative de prélevée ou de post-levée précoce, utilisé sur des cultures de printemps telles que le maïs, le sorgho, le soja, le tournesol, la betterave ou les haricots, sur quelques cultures tropicales (ananas et canne à sucre), ainsi que sur certaines cultures porte-graines. En 2020, il est la 6^{ème} substance active la plus achetée en France en kg de matière active et le 3^{ème} herbicide après le glyphosate et le prosulfocarbe. Plus de 1900 tonnes de S-métolachlore ont été achetées en France cette même année.

Il est apprécié pour son efficacité sur les graminées estivales, le ray-grass, ainsi que sur quelques dicotylédones annuelles. En bloquant les germinations des adventices pendant quelques semaines, il permet en général d'assurer une bonne installation des cultures. Il constitue à ce titre un pilier du désherbage chimique de ces dernières. En prenant le relai du métolachlore en 2006, il s'est d'autant plus imposé qu'un certain nombre d'herbicides racinaires ont été interdits, tels que l'atrazine en 2002, l'alachlore et la trifluraline en 2008, ou l'acétochlore en 2013. Le S-métolachlore apparaît comme un incontournable du désherbage pour certaines cultures conduites en conventionnel telles que les maïs doux et semences.

Le S-métolachlore est classé par l'Herbicide Resistance Action Committee (HRAC) dans le groupe K3 maintenant appelé groupe 15 dans la nouvelle nomenclature regroupant les inhibiteurs de la synthèse des acides gras. Il fait ainsi partie de la famille des chloroacétamides et joue un rôle dans la diversification des modes d'action pour gérer les résistances des adventices aux principales familles d'herbicides. En effet, on ne connaît pas à ce jour en France d'espèces d'adventices ayant développé des populations résistantes au S-métolachlore. En revanche, les sulfonylurées du groupe HRAC n°2 mobilisées dans de nombreuses cultures des rotations connaissent une progression des résistances des espèces adventices à leur rencontre ; c'est également le cas pour les inhibiteurs de l'ACCase (fop et dim, groupe HRAC n°1).

Le recours au S-métolachlore en France est plus systématique que pour nombre d'autres herbicides.

Dans le cadre de cette étude, nous avons développé un indicateur illustrant la dépendance de l'agriculture à une substance active. Pour chaque molécule et pour chaque code postal, nous comparons les quantités réellement achetées aux quantités maximales qui pourraient être utilisées au vu de l'assolement, en respectant les doses homologuées par cultures. On en déduit un ratio entre les quantités achetées issues de la BNVD et les quantités maximales consommables (QMC) d'après l'assolement. Nous avons calculé ce ratio pour une trentaine d'herbicides parmi les plus utilisés en France en 2020, à l'échelle du code postal ; avec une valeur moyenne de 0,48, le S-métolachlore se place dans le tiers supérieur. L'agriculture française présente ainsi un degré de dépendance au S-métolachlore élevé comparativement

aux principaux herbicides utilisés en France. Par ailleurs, la forte dépendance globale de l'agriculture française au S-métolachlore ne doit pas masquer une certaine hétérogénéité au sein des territoires métropolitains. Nous pouvons ainsi identifier de larges bassins de production où l'utilisation de S-métolachlore est particulièrement en tension (*i.e.* quantités achetées proche des quantités maximales autorisées par la réglementation) comme le Sud-Ouest ou le Bassin Parisien, notamment du fait de la pression adventice dans ces zones.

Les grandes quantités utilisées entraînent des pollutions fréquentes des eaux à destination de la consommation humaine, ce qui a conduit à un changement de réglementation fin 2021.

Le S-métolachlore et ses métabolites sont retrouvés dans l'eau à une fréquence très élevée, ce qui a conduit à réduire les doses maximales autorisées sur maïs, sorgho, tournesol et soja fin 2021 à 1 kg/ha au maximum par année, soit une baisse de plus de 25% en sorgho, tournesol et soja, et de près de 48% en maïs. D'après les travaux relayés par le ministère de la santé, plus de 1,6 millions d'habitants étaient concernés par une pollution de l'eau potable par cette molécule en 2020 en France, soit dans plus de 75% des cas répertoriés en situation de non-conformité (NC1 ou NC2). Par ailleurs, pour protéger les ressources en eau, il est à la fois interdit de traiter des parcelles drainées en période d'écoulement des drains et obligatoire de respecter une zone non traitée aux abords des points d'eau. Ceci est complété par des préconisations de bon usage de la molécule telles que l'utilisation de buses antidérive ou l'application privilégiée en post-levée précoce. Des préconisations visent aussi une application localisée uniquement sur les rangs des cultures afin de limiter les quantités épandues.

Ce durcissement de la réglementation ne sera vraisemblablement pas suffisant pour restaurer la qualité de l'eau et atteindre les objectifs du Green Deal (réduction de l'utilisation des pesticides de 50% d'ici 2030).

Nous avons estimé les quantités de S-métolachlore qui seraient achetées annuellement en France selon deux scénarios réglementaires de réduction des quantités appliquées à l'hectare. Nous avons considéré d'une part le changement des doses maximales autorisées appliqué depuis fin 2021 (à propos duquel nous n'avons pas encore de données du fait que la première campagne sous cette nouvelle réglementation est en cours à la publication de ce rapport), et d'autre part la généralisation d'un traitement à la dose pré-2021 limité aux seuls rangs (soit environ un tiers de la surface des parcelles pour une culture sarclée). Pour chaque scénario, nous avons envisagé trois niveaux d'adoption de la mesure par les agriculteurs : i) seuls les agriculteurs qui se retrouvent au-dessus du nouveau cadre réglementaire changent leurs pratiques et réduisent leur utilisation au minimum afin de satisfaire les nouvelles exigences (borne inférieure), ii) tous les agriculteurs adoptent une dose réduite même s'ils respectaient déjà le nouveau cadre réglementaire (borne supérieure), iii) seuls les agriculteurs qui se retrouvent au-dessus du nouveau cadre réglementaire changent leurs pratiques en reproduisant les pratiques des agriculteurs déjà dans la réglementation, et donc en faisant potentiellement plus que le strict minimum (projection intermédiaire).

Les résultats de ces analyses soulignent que la réglementation de fin 2021 n'induit pas d'effet majeur sur les volumes employés à l'échelle de la France : dans ce scénario, le S-métolachlore ne devient au mieux que le cinquième herbicide le plus utilisé en France, avec près de 1 100 tonnes achetées par an. Il est probable que la baisse des tonnages soit encore moins marquée, avec des quantités achetées entre 1 600 et 1 700 tonnes. De plus, parmi les scénarios envisagés, seul celui d'une réglementation autorisant le S-métolachlore sur le seul rang permet de respecter les objectifs du Green Deal européen d'une réduction de 50% des produits phytosanitaires (soit une réduction à 950 tonnes environ des quantités achetées pour le S-métolachlore). Dès lors, l'amélioration de la qualité de l'eau et sa contamination par cette molécule et ses métabolites particulièrement solubles dans l'eau pourraient rester à court terme une préoccupation de premier ordre.

C'est sur cette base que nous avons engagé notre travail pour i) identifier des alternatives chimiques et non chimiques au S-métolachlore, qu'elles soient à visée curative et/ou préventive, et pour ii) évaluer les impacts technico-économiques de leur mobilisation sur les exploitations agricoles. Nous avons travaillé dans le cadre du règlement (CE) N°1107/2009 relatif à l'évaluation comparative qui impose que l'alternative existe déjà, voire soit d'usage courant. Avec le réseau des Fermes Ecophyto Dephy et les enquêtes Pratiques culturelles et phytosanitaires du Service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère en charge de l'Agriculture, nous disposons de jeux de données plus ou moins récentes sur les pratiques agricoles en France métropolitaine. Par ailleurs, si nous n'avons pas d'information décrivant la flore présente, nous disposons de données décrivant notamment les sols, le climat ou le type de ruralité. Ces éléments sont susceptibles d'influencer l'état de flore et ainsi, d'entrer en ligne de compte dans le choix de recourir au S-métolachlore. Ces données étant disponibles à l'échelle de la France métropolitaine, nous nous sommes concentrés sur ce périmètre. Les analyses économiques réalisées dans le cadre de ce travail s'appuient sur une méthode employée notamment en statistiques médicales afin d'estimer l'effet d'un traitement : la pondération par les scores de propension. Elle permet de prendre en compte l'effet de facteurs externes, dits confondants (*e.g.* type de sol, climat) pouvant avoir une influence à la fois sur les variables que nous cherchons à estimer (*e.g.* le rendement) et sur le choix de recourir au S-métolachlore.

En raison des contraintes d'accès aux résultats des enquêtes Pratiques culturelles du SSP, incompatibles avec les délais de ce rapport, l'analyse économique a été menée sur les données issues du réseau DEPHY. Si ce dernier est moins représentatif des pratiques de désherbage de la ferme France, nous nous sommes assurés que les principaux indicateurs techniques (rendements et IFT) étaient comparables. Ainsi, les résultats de cette analyse nous semblent être généralisables, mais pourront toutefois être validés ultérieurement sur les nouvelles données des enquêtes Pratiques Culturelles couvrant la campagne 2021.

La mobilisation des alternatives chimiques identifiées n'implique pas de variation de marge directe par unité de surface à l'échelle de la parcelle. Le report sur le diméthénamide-P apparaît comme très probable en cas d'interdiction du S-métolachlore.

Le diméthénamide-P apparaît comme la première alternative chimique au S-métolachlore. La pendiméthaline et la sulcotrione le sont aussi dans une moindre mesure, notamment au vu de leur efficacité moindre sur graminées estivales ou contraintes d'emploi. La mobilisation de ces molécules n'induit pas de variation de marge directe pour le maïs, culture commune à ces substances actives et pour laquelle nous avons suffisamment de parcelles pour réaliser l'évaluation économique. La forte mobilisation du S-métolachlore au détriment d'alternatives chimiques ne s'explique donc pas particulièrement par des raisons économiques mais plutôt par un faisceau d'éléments en sa faveur dont la contamination des parcelles par des graminées estivales (*cf.* début de ce résumé). Enfin, en anticipation d'une potentielle substitution vers une autre molécule, on peut s'interroger sur le risque d'un simple report du problème maintenant la pollution des milieux ainsi que le risque de développement de résistances. A ce titre, le diméthénamide-P est déjà détecté dans les eaux de certaines rivières, et d'autres alternatives chimiques, candidates à la substitution, ont un avenir incertain.

La mobilisation des alternatives non chimiques n'implique pas de variation de marge directe par unité de surface à l'échelle de la parcelle. La comparaison implique néanmoins des systèmes très différents (agriculture conventionnelle et biologique) puisque les systèmes conventionnels sans désherbage chimique sont très rares.

Les systèmes conventionnels désherbant sans pesticide chimique existent seulement de manière exceptionnelle. Il n'est donc pas possible de conclure avec un appui statistique sur les résultats économiques de ces derniers comparativement à ceux mobilisant un désherbage chimique au S-métolachlore. Nous avons ainsi été amenés à comparer des parcelles appartenant à des systèmes conventionnels mobilisant du S-métolachlore, à des parcelles appartenant à des systèmes en agriculture biologique (AB). Ces systèmes diffèrent par leurs successions culturales, travail du sol, longueur de la rotation, etc.

L'analyse, menée sur le réseau DEPHY, n'identifie aucun avantage économique à l'usage du S-métolachlore en termes de marge directe par unité de surface, malgré des baisses de rendement significatives allant de 20% pour le maïs fourrage à 35% pour le maïs grain pour les parcelles conduites en AB. Néanmoins, il s'agit de parcelles appartenant à des systèmes différents ayant leurs logiques et contraintes propres. Il est donc difficile d'extraire le seul aspect du désherbage du reste de la logique de ces systèmes. A titre d'exemple, la fertilisation est réfléchiée très différemment d'un système à l'autre. D'autre part, l'absence d'avantage économique final à l'utilisation du S-métolachlore ne doit pas masquer l'existence de surcoûts et d'économies importantes se compensant. Ainsi, la mobilisation du S-métolachlore est corrélée à une économie de charges de mécanisation comprise entre 40 et 70 €/ha, et une économie de coût de main d'œuvre comprises entre 10 et 30 €/ha, selon les cultures. A l'inverse, elle génère une augmentation marquée des charges opérationnelles (liées aux différents intrants) de 130 à 270 €/ha selon les cultures. Ainsi, si le S-métolachlore ne procure

pas d'avantage économique apparent, cela tient : i) à de moindres charges totales en AB, portées par de faibles charges liées aux intrants, et ii) à une augmentation de la valeur de vente de la production, portée par des prix de l'AB supérieurs (+30% à +50% en moyenne, selon les cultures). Ces résultats s'avèrent robustes aux variations des prix des récoltes ou des principales charges dans une gamme de -50 à +50% testées dans le cadre d'une analyse de sensibilité. Toutefois, ces conclusions seraient remises en cause si la différenciation des prix entre AB et conventionnel venait à se contracter. Les choix des agriculteurs d'avoir ou non recours au S-métolachlore traduisent aussi d'autres formes de contraintes que celles d'ordre économique comme la fenêtre météorologique, l'organisation du temps de travail ou le degré de dépendance à l'énergie fossile.

Il reste toutefois une large marge de manœuvre pour que les alternatives non chimiques soient plus facilement incluses dans les systèmes, qu'ils soient conduits en conventionnel ou en AB. Une meilleure articulation à des leviers préventifs est susceptible de réduire la pression adventice et permettre une moindre dépendance aux herbicides et/ou au désherbage mécanique avec des retombées sur la vie du sol ou sur le stockage du carbone. Cela ouvre la voie à une modification profonde de la façon de devoir approcher l'évaluation comparative prévue dans le règlement 1107/2009 et son article 50. On gagnerait à ne pas analyser la substitution molécule par molécule mais par famille d'usages.

Si la poursuite du développement de l'AB dans le calendrier du Green Deal devrait concourir à diminuer la dépendance au S-métolachlore, les modèles de désherbage mixte doivent pouvoir y contribuer à court terme.

Le Plan Stratégique National (PSN) français pour la future Politique Agricole Commune (PAC) vise 18% de la SAU en agriculture biologique d'ici 2027 ; le Green Deal vise 25% en 2030. Par ailleurs, des modèles mixtes de contrôle des adventices alliant non-chimique et chimique sont expérimentés. Nous en avons évoqué certains, seulement de manière qualitative : (i) commencer par le désherbage chimique sur le rang puis assurer toute la suite du programme de gestion des adventices en saison par des interventions mécaniques sur l'inter-rang, que ce dernier reçoive un couvert végétal ou non ; (ii) privilégier des faux semis et un décalage de date d'installation de la culture, puis n'intervenir qu'en dernier recours par du désherbage chimique localisé en post-levée. Dans les deux cas, une gestion différenciée du rang et de l'inter-rang est à envisager et elle va donc plus loin, quand les conditions pédoclimatiques le permettent, que les combinaisons des désherbages chimiques et mécaniques telles que préconisées et mobilisées assez couramment.

Selon nos modélisations, un scénario d'utilisation à pleine dose (pré-2021) localisée sur le rang uniquement pourrait réduire les quantités achetées de S-métolachlore à l'échelle française et contribuer aux objectifs du Green Deal relatifs aux produits phytosanitaires (-50% en 2030) plus sûrement que la réduction des doses proposée fin 2021. Dans ce scénario, le S-métolachlore resterait présent pour faciliter la gestion des espèces adventices problématiques, résistantes ou toxiques à l'instar de l'ambrosie. Cela permettrait aussi d'éviter une autre modalité de réduction des volumes de S-métolachlore consommés qui

consiste à instaurer un nombre maximum d'interventions au S-métolachlore sur plusieurs campagnes à l'échelle de la rotation.

Toutefois, il n'y a actuellement pas consensus sur le fait que ces pratiques soient suffisamment fiables et robustes pour envisager leur généralisation. De plus, les agriculteurs ne sont aujourd'hui pas massivement équipés pour une gestion différenciée du rang et de l'inter-rang. Par ailleurs, retarder la date de semis ou réaliser des interventions culturales contribuant à baisser la réserve en eau du sol peut être difficile dans certains pédoclimats et obérer les objectifs de rendement. En outre, le temps de travail, la dépendance aux énergies fossiles et donc l'émission de gaz à effet de serre sont également des points sur lesquels la recherche pourra porter une vigilance particulière. Des actions de recherche peuvent donc être nécessaires pour fiabiliser et développer de tels systèmes gérant différemment le rang et l'inter-rang.

Au Luxembourg, un système de contractualisation avec les agriculteurs permet la sortie du S-métolachlore et participe à la réduction des volumes employés d'herbicides.

Au Luxembourg, le S-métolachlore est interdit depuis 2015. La qualité des eaux de surface s'est améliorée lors des saisons suivantes mais les aquifères profonds restent contaminés et leur amélioration ne s'amorcerait qu'aux alentours de 2030. Le Luxembourg a mandaté les agences de l'eau et les Entreprises de Travaux Agricoles (ETA) pour prendre en charge le traitement herbicide localisé sur le seul rang ; l'agriculteur paie uniquement le(s) produit(s) phytosanitaire(s). Ce système peut aussi être couplé à une assurance en cas de perte de récolte ou diminution anormale du rendement. Ces contractualisations sont prioritairement destinées aux agriculteurs localisés dans des zones de protection de l'eau : elles apportent une solution locale pour protéger des zones sensibles. Il existe en France des situations localisées (autour de captages prioritaires par exemple) où des agriculteurs peuvent contractualiser et être aidés financièrement en échange du respect d'un cahier des charges limitant, voire interdisant, l'utilisation de certaines molécules dont le S-métolachlore. Néanmoins, la collectivité finance en parallèle d'importants dispositifs pour maintenir l'eau potable.

D'autres éléments peuvent contribuer à une moindre dépendance au S-métolachlore.

Dans le cas de la production de semences hybrides de maïs, la diversité des variétés et leur rythme de renouvellement, la faible vigueur des géniteurs et la complexité des semis restreignent la pharmacopée disponible. Afin d'être suffisamment sélectif, le S-métolachlore est associé au bénoxacore, son phytoprotecteur. Des mesures permettraient de limiter son usage (mesures prophylactiques, applications localisées, combinaison avec des moyens mécaniques) ; leur mobilisation est néanmoins limitée par des cahiers des charges très stricts. Ainsi, préciser les lignées pour lesquelles le S-métolachlore est la seule molécule supportée pourrait contribuer à restreindre son usage aux seules situations le justifiant. Comme cette information n'est actuellement pas diffusée, le S-métolachlore est préconisé 'par défaut'. Par ailleurs, rehausser le niveau de tolérance des lignées parentales à d'autres herbicides pourrait

aussi contribuer à desserrer la dépendance de la filière de production de semence à cette seule molécule.

Au-delà de la production de semences, le recours à un obstacle physique au développement des adventices en occupant la place ou en bloquant les germinations reste très peu mobilisé à ce jour dans les pratiques innovantes. Il existe peu de couverts végétaux pouvant être facilement installés dans l'entre rang sans impact sur la culture ou dans lesquels installer une culture en strip-till. La R&D pourrait ainsi amplifier les travaux conduits sur des espèces ou variétés adaptées à ces nouveaux usages, au même titre qu'elle travaille sur des architectures du peuplement différentes du modèle standard (rangs resserrés, densités accrues, etc.). Enfin, pour de petites surfaces, un obstacle physique par paillage ou mulch mort peut sans doute s'avérer une option intéressante et des équipements permettant d'en faciliter la gestion gagneraient à être développés conjointement. Autant d'exemples qui soulignent que sortir de la dépendance actuelle au S-métolachlore engage l'ensemble des acteurs des filières et non le seul agriculteur, et que ceci impose des approches systémiques de portée élargie sur la famille d'usage dans laquelle le S-métolachlore s'inscrit.

Il reste important de souligner que desserrer la dépendance au S-métolachlore passera prioritairement par la mobilisation de l'ensemble des leviers prophylactiques permettant de minimiser la présence des graminées dans les parcelles. Cela peut nécessiter des travaux sur les meilleures combinaisons à activer et leur inscription dans des politiques volontaristes (labélisation de cahiers des charges, premier pilier de la PAC ou MAEC dédiées).

Pour conclure, la réalisation de cette étude nous a conduit à identifier trois limites de portée générale qui sont aussi des pistes d'amélioration de l'analyse comparative.

Tout d'abord, nos analyses économiques visent l'exhaustivité et s'efforcent donc d'inclure nombre d'indicateurs économiques : dépenses liées aux intrants, mobilisation d'outils mécanisés, coût de leur utilisation, de leur entretien et de leur amortissement et temps de travail de la main d'œuvre. En revanche, nous avons été confrontés en premier lieu à l'absence d'informations précises concernant la flore effectivement présente dans les parcelles analysées. Bien qu'aucun surcoût ne soit identifié, il reste possible que les variations des degrés d'infestation induisent un biais que l'on ne peut retirer. En second lieu, l'accès aux prix réels payés aux (et par les) agriculteurs (nous avons travaillé à partir de référentiels de prix), aux contraintes auxquelles ils peuvent être localement soumis et aux aides qu'ils touchent (PAC ou autres) aurait été précieux. Ces manques conduisent à ce que nous n'ayons pas toujours disposé de toutes les clés pour saisir la stratégie retenue par les agriculteurs. La possibilité de coupler les données sur les pratiques agricoles aux données du réseau d'information comptable agricole (RICA) demeure un maillon faible du dispositif permettant d'étayer l'analyse comparative.

La deuxième limite identifiée concerne la philosophie que fixe implicitement le cadre réglementaire de l'évaluation comparative. Elle est pensée pour analyser la substitution entre alternatives très similaires qui peuvent donc être assez facilement comparées toutes choses égales par ailleurs. C'est plus facilement le cas quand il s'agit de comparer deux molécules,

mais plus difficile quand il s'agit de comparer la mobilisation d'une molécule à des pratiques sans chimie. Ces dernières mobilisent des leviers qui induisent des périmètres plus larges et de natures différentes. A titre d'exemple, substituer du désherbage chimique par du désherbage mécanique implique d'importants changements du parc matériel, de ses performances et de son amortissement. C'est donc rapidement la logique du système de culture, et plus largement de l'exploitation, qui change. En l'état, les agriculteurs qui mobilisent uniquement le désherbage mécanique sont très majoritairement en AB, là où ceux qui mobilisent le désherbage chimique sont en conventionnel. Rares sont les systèmes conventionnels qui n'emploient aucune chimie pour le désherbage ; il est dès lors difficile d'isoler une pratique de la logique générale du système. Une réflexion à l'échelle du système entier permettrait de mobiliser des leviers majeurs qui relèvent de la reconception (*e.g.* repenser les rotations). L'alternative à une molécule en particulier peut alors être un élément déclenchant, mais pas la seule modification à envisager. Elle peut aussi nécessiter un travail préalable comme l'adoption de mesures préventives pour se mettre en situation d'activer l'alternative. C'est là que le contexte amont et aval, avec notamment l'existence de filières de collecte et de valorisation, peut offrir des leviers d'action dont il est difficile de rendre compte dans des comparaisons quand elles sont limitées à la parcelle ou la saison.

Par ailleurs, l'analyse comparative est pensée par son entrée agricole. Elle considère que les pratiques à comparer doivent préexister et que le choix de l'une ou l'autre n'entraîne pas de changement profond pour l'agriculteur. Dans le cas du S-métolachlore, des éléments variés entrent en ligne de compte dans la mobilisation des alternatives possibles : i) fiabilité du travail et organisation des chantiers, ii) disponibilité de filières d'écoulement des productions primaires et secondaires dans les territoires concernés et iii) existence d'options de contractualisation. Si ces éléments peuvent avoir un impact positif pour le collectif (*via* une amélioration significative de la qualité de l'eau), alors on pose la question de leur prise en considération dans une étude qui vise à mettre à plat ce que pourrait être une évolution importante de l'agriculture ou ce qui constitue indéniablement une situation actuelle de blocage.

1. Introduction

1.1. Commande

Le ministère de l’Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, le ministère de la Transition écologique et le ministère des Solidarités et de la Santé ont saisi INRAE pour mener une partie du processus pouvant conduire à une Évaluation comparative sur une dizaine de molécules phytosanitaires. Cette saisine s’inscrit dans le cadre du plan Écophyto II+, et plus particulièrement dans l’axe 3 « évaluer et maîtriser les risques et les impacts », action « s’appuyer sur des indicateurs d’utilisation, d’impact et d’évolution des pratiques ».

Cette sollicitation a pour objectif, sur la base d’une méthodologie consolidée et à partir de bases de données solides, de cerner les alternatives chimiques et non chimiques à certains pesticides et d’éclairer la faisabilité et les impacts technico-économiques sur les exploitations agricoles de la mobilisation de ces alternatives. Divers herbicides, fongicides et insecticides seront étudiés dans le cadre de ce projet et feront l’objet d’autant de publications.

Le présent rapport traite du cas du S-métolachlore, 6^{ème} substance active la plus achetée en France en 2020 (en kilogrammes de matière active) et 3^{ème} substance herbicide après le glyphosate et le prosulfocarbe (BNVD Traçabilité, 2022). Il aborde les principaux usages du S-métolachlore en France métropolitaine, les alternatives chimiques et non chimiques identifiées, et les impacts technico-économiques de la mobilisation de ces alternatives sur les exploitations agricoles.

1.2. Le contexte

1.2.1. Quelques rappels réglementaires : mise sur le marché des substances actives et produits pharmaceutiques¹

Les substances actives sont autorisées au niveau de l’Union européenne. Une entreprise qui demande une autorisation présente une analyse de risque de la molécule concernée. L’Agence européenne de sécurité alimentaire (EFSA) mène alors une évaluation scientifique et remet un avis public. La molécule « *ne peut être approuvée que si l’évaluation permet de conclure [qu’elle] ne présente pas d’effet nocif inacceptable sur la santé humaine ou animale et n’a pas d’influence inacceptable sur l’environnement* » (MASA, 2015). La Commission européenne examine alors le dossier ; si la substance est autorisée, elle est inscrite dans la liste des substances actives approuvées dans l’Union européenne, soit l’annexe du Règlement (UE) N°540/2011 (JOUE, 2011).

¹ Ce paragraphe s’inspire des informations regroupées sur le site du Ministère de l’Alimentation et de la Souveraineté alimentaire, en date du 28 septembre 2015 : <https://agriculture.gouv.fr/procedure-de-mise-sur-le-marche-de-produits-phytopharmaceutiques-de-levaluation-lautorisation>

Les produits phytosanitaires sont autorisés au niveau des Etats membres. Une entreprise qui demande une autorisation doit donc en faire la demande dans chaque Etat membre où elle souhaite commercialiser son produit (contenant des substances ayant été préalablement approuvées à l'échelle communautaire). En France, c'est l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) qui réalise une analyse de risques et remet un avis public. C'est ensuite le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (MASA) qui autorise ou non le produit sur la base de cet avis.

1.2.2. Règlement (CE) N° 1107/2009 : cadre de l'évaluation comparative

Selon l'article 50.1 du règlement (CE) N° 1107/2009 (JOUE, 2009), « *les États membres réalisent une évaluation comparative lors de l'examen de toute demande d'autorisation relative à un produit phytopharmaceutique contenant une substance active approuvée en tant que substance dont on envisage la substitution* ». En fonction des résultats de l'évaluation comparative, « *les États membres n'autorisent pas ou limitent l'utilisation d'un produit phytopharmaceutique pour une culture donnée* ».

Pour ce faire, il est nécessaire que différents éléments ressortent de l'évaluation comparative : i) une alternative (chimique ou non chimique) doit déjà exister et être « *sensiblement plus sûr[e] pour la santé humaine ou animale ou l'environnement* », ii) cette alternative « *ne présente pas d'inconvénients économiques ou pratiques majeurs* », iii) la diversité des solutions existantes (chimiques ou non) « *sont de nature à réduire autant que possible l'apparition d'une résistance dans l'organisme cible* » et iv) « *les conséquences sur les autorisations pour des utilisations mineures sont prises en compte* ».

Au premier semestre 2022, le S-métolachlore n'est pas classé comme substance dont on envisage la substitution. Néanmoins, certains éléments (voir ci-après) en font une molécule à étudier. Tout d'abord, son homologation à l'échelle européenne s'arrête au 31 juillet 2023². Par ailleurs, l'article 50.2 de ce même règlement (CE) N° 1107/2009 prévoit que « *par dérogation [...] un État membre peut également, dans des cas exceptionnels, appliquer les dispositions [non autorisation ou limitation de l'utilisation d'un produit] lors de l'examen de toute demande d'autorisation relative à un produit phytopharmaceutique ne contenant aucune substance dont on envisage la substitution ni de substance active à faible risque, s'il existe une méthode non chimique de prévention ou de lutte pour la même utilisation et si elle est d'usage courant dans cet Etat membre.* »

² https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/active-substances/?event=as.details&as_id=1137

1.2.3. Une molécule impliquée dans la pollution des eaux

Plusieurs éléments ont contribué à retenir le S-métolachlore parmi les premières molécules étudiées dans le cadre des travaux mobilisables pour une évaluation comparative qui seront menés par INRAE.

Tout d’abord, le règlement (CE) n°1272/2008 (JOUE, 2008) attribue la classification suivante au S-métolachlore :

- H317 : peut provoquer une allergie cutanée ;
- H400 : très toxique pour les organismes aquatiques ;
- H410 : très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets à long terme.

Le S-métolachlore a un faible coefficient d’absorption sur les sols et est soluble dans l’eau ; il est régulièrement retrouvé, ainsi que ses métabolites ESA, OXA et NOA, dans les eaux brutes (cours d’eau et nappes) (Chambre d’Agriculture Pays de la Loire, 2020). Le **Tableau 1** ci-dessous présente à titre d’exemple la situation en Pays de la Loire en 2020, dans laquelle ces trois métabolites faisaient partie des 15 molécules les plus quantifiées dans la région.

Tableau 1 : Recherche et quantification des métabolites ESA, OXA et NOA du S-métolachlore en Pays de la Loire en 2020

	Nombre de fois où les molécules ont été recherchées en 2020	Taux de quantification des molécules ³
Métolachlore ESA	1374	0,977
Métolachlore OXA	1374	0,885
Métolachlore NOA	966	0,734

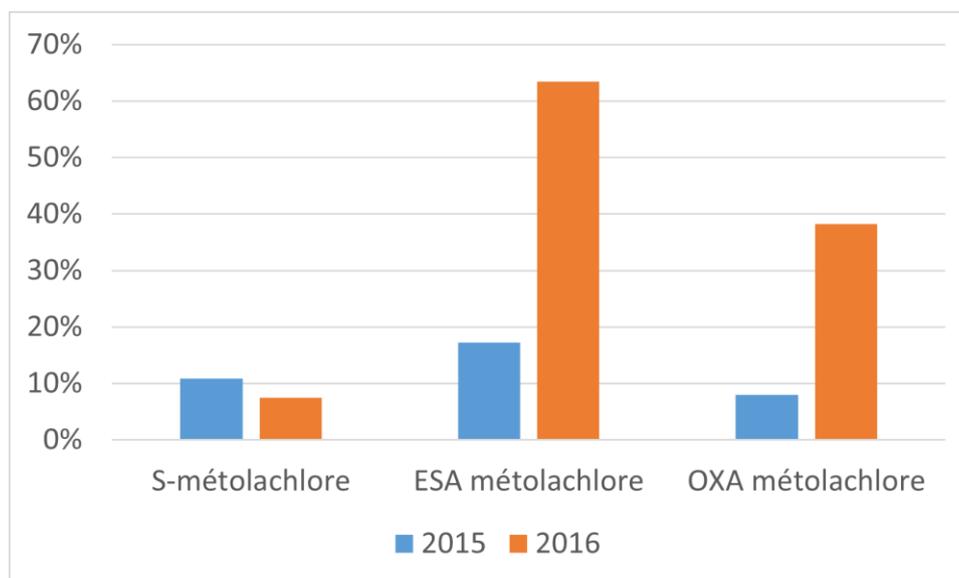
Source : DREAL Pays de la Loire⁴

Les données du Ministère de la Transition écologique et celles du Bureau de recherches géologiques et minières reprises dans le document de phytopharmacovigilance de l’Anses relatif au S-métolachlore (Anses, 2018) vont également dans ce sens : le S-métolachlore et ses métabolites sont régulièrement retrouvés dans les eaux de surface (**Figure 1**) ainsi que dans les eaux souterraines (**Figure 2**). Dans ces dernières, ils sont régulièrement retrouvés à des concentrations qui dépassent la limite de qualité (LQ) dans les eaux destinées à la consommation humaine fixée par la directive européenne 98/83/CE (0,1 µg/L) (Anses, 2019).

³ Nombre de fois où la molécule est détectée divisé par le nombre de fois où elle est recherchée.

⁴ apps.datalab.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/qualite-des-eaux/

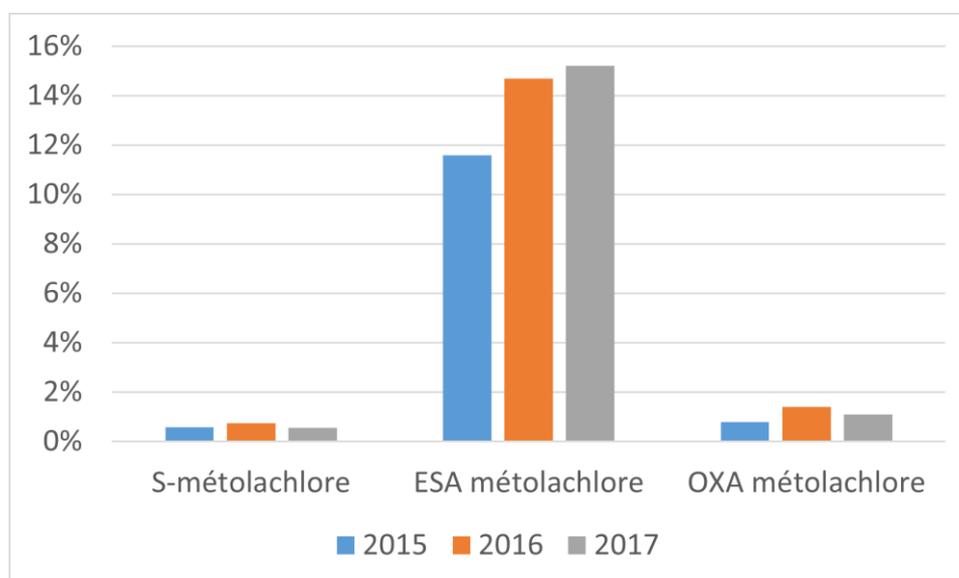
Figure 1 : Taux de quantification du S-métolachlore et ses métabolites ESA et OXA dans les eaux de surface en France (métropole) en 2015 et 2016



Source : Propre élaboration à partir de la fiche phytopharmacovigilance sur le S-métolachlore (Anses, 2018)

Note : Seules les années pour lesquelles la fiche phytopharmacovigilance contient des données et pour lesquelles plus de 1000 analyses ont été effectuées pour chacune des molécules considérées sont présentées sur ce graphe. En effet, l'Anses semble considérer que le nombre d'analyses est important au-delà de 1000 ; voir encadré page 83 du rapport 2021-AST-0088 de l'Anses (Anses, 2021a).

Figure 2 : Taux de dépassement de la norme du S-métolachlore et ses métabolites ESA et OXA dans les eaux souterraines en France (métropole) de 2015 à 2017



Source : Propre élaboration à partir de la fiche phytopharmacovigilance sur le S-métolachlore (Anses, 2018)

Notes : Le taux de dépassement de la norme correspond à la limite de qualité évoquée plus haut dans ce rapport et fixée pour les eaux à destination de la consommation humaine (EDCH) à 0,1 µg/L par la directive européenne 98/83/CE. Par ailleurs, seules les années pour lesquelles la fiche phytopharmacovigilance contient des données et pour lesquelles plus de 1000 analyses ont été effectuées pour chacune des molécules considérées sont présentées sur ce graphe. En effet, l'Anses semble considérer que le nombre d'analyse est important au-delà de 1000 ; voir encadré page 83 du rapport 2021-AST-0088 de l'Anses (Anses, 2021a).

Par ailleurs, le 14 janvier 2021, l'Anses a donné un avis relatif à la détermination de la pertinence pour les eaux destinées à la consommation humaine pour les métabolites de pesticides ; cet avis concernait les trois métabolites du S-métolachlore précédemment cités (Anses, 2021b). Si le métolachlore OXA est considéré comme un métabolite « non pertinent pour les eaux à destination de la consommation humaine (EDCH) », le métolachlore ESA et le métolachlore NOA sont quant à eux considérés comme des métabolites pertinents pour les EDCH. Cela signifie qu'ils présentent des risques potentiels pour la santé, comme décrit par le schéma de l'annexe 1 de ce même avis de l'Anses (Anses, 2021b).

De plus, cette étude intervient après l'interdiction de l'utilisation du S-métolachlore sur l'ensemble du territoire du Luxembourg actée par le Règlement grand-ducal du 12 avril 2015⁵. Cette évolution réglementaire fait suite à une contamination d'eaux de surface et souterraines par un certain nombre de produits phytosanitaires et leurs métabolites dont le S-métolachlore et le métolachlore ESA.

Enfin, le S-métolachlore a récemment (fin 2021) fait l'objet d'un changement réglementaire qui limite la dose maximale utilisable à 1 kg de matière active par hectare par an en grandes cultures (voir [Tableau 2](#) pour détails). Syngenta, qui commercialise la molécule, est particulièrement proactif pour rappeler les bons usages et outiller les agriculteurs avec une application, Quali'Cible⁶, qui peut aider à cerner les situations conformes. D'autres distributeurs de S-métolachlore font de même ; voire par exemple l'application Zea Scan de Ascenza⁷.

⁵ <https://legilux.public.lu/eli/etat/leg/rgd/2015/04/12/n1/jo>

⁶ <https://quali-cible.syngenta.fr/portail-quali-cible/>

⁷ <https://www.ascenza.fr/news/zea-scan>

1.3. L'approche employée

1.3.1. Les bases de données mobilisées

L'étude que nous avons menée repose sur un ensemble de bases de données (voir l'Annexe 2 pour une présentation plus détaillée de ces bases). Certaines sont publiques telles que la Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques par les Distributeurs (BNVD)⁸, le catalogue en ligne des produits phytopharmaceutiques tenu par l'Anses (E-Phy)⁹ et le Registre Parcellaire Graphique (RPG)¹⁰ recensant l'occupation des sols en France. Ces données sont disponibles en libre accès sur internet. L'Observatoire du Développement Rural (ODR) d'INRAE nous a également donné accès à une version retravaillée du RPG.

Ce travail repose également sur les Enquêtes « Pratiques culturales et Pratiques phytosanitaires » du Service de la statistique et de la prospective (SSP) du MASA. Ces données étant individuelles et non anonymisées, leur accès est autorisé dans le cadre strict de projets de recherche scientifique ou historique et une autorisation du comité du secret statistique est nécessaire¹¹. Les enquêtes du Réseau DEPHY du plan Ecophyto ont également été mobilisées suite à une sollicitation du Comité des partenaires Agrosyst, système d'information du Réseau DEPHY, puis validation d'accès par cette instance.

Le règlement (CE) N° 1107/2009 impose, dans le cadre de l'évaluation comparative, que l'alternative envisagée « existe déjà » (article 50.1), et même qu'elle soit « d'usage courant » (article 50.2). Cela suppose donc de pouvoir les trouver (de manière *a minima* non ponctuelle) dans les bases de données recensant des pratiques agricoles *i.e.* celles du SSP ainsi que les enquêtes du Réseau DEPHY. Ces deux bases de données comprennent une série d'indicateurs et d'éléments de contexte permettant d'évaluer les implications technico-économiques de la mobilisation (ou non) des alternatives ciblées. Les enquêtes du SSP étant principalement centrées sur les pratiques culturales, donc des indicateurs techniques, le travail présenté ici se repose assez largement sur les données du Réseau DEPHY qui sont riches à la fois en indicateurs techniques et en indicateurs économiques. Nous avons néanmoins préalablement vérifié que les principaux indicateurs techniques que nous mobilisons dans DEPHY sont bien

⁸ Données disponibles sur le site « BNVD Traçabilité » ici : <https://ventes-produits-phytopharmaceutiques.eaufrance.fr/search>

⁹ Données disponibles en format « catalogue » ici : <https://ephy.anses.fr/> ; et téléchargeable en format CSV plus pratique à manipuler pour l'utilisation que nous en faisons ici : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-ouvertes-du-catalogue-E-Phy-des-produits-phytopharmaceutiques-matieres-fertilisantes-et-supports-de-culture-adjouvants-produits-mixtes-et-melanges/>. Néanmoins, pour ce second format, les données des années précédentes sont écrasées chaque année au moment de la publication de celles de la dernière année disponible. C'est pourquoi l'Anses nous a fourni le 12 octobre 2021 une version (format Excel) plus complète compilant l'ensemble des usages (autorisés et retirés) depuis la date de première autorisation de chaque produit phytosanitaire. Nous avons complété ces informations à l'aide du site E-Phy mentionné précédemment à chaque fois que cela nous semblait nécessaire et pertinent.

¹⁰ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

¹¹ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/servicon/l.1/listeTypeServicon/>

dans l'univers de ceux des enquêtes pratiques culturales et phytosanitaires (point que nous détaillerons plus loin dans ce document).

Ces deux bases de données ont des avantages et inconvénients qui leur sont propres. Les enquêtes du SSP ont une certaine portée statistique au vu du grand nombre de parcelles enquêtées. De plus, les échantillons sont constitués de manière à être les plus représentatifs possibles de la Ferme France (voir méthodologie employée (Agreste, 2020)). Néanmoins, elles sont pauvres en indicateurs économiques. Le réseau DEPHY est quant à lui moins représentatif de la Ferme France puisqu'il réunit des agriculteurs volontaires et non rémunérés pour y participer : l'échantillon des fermes enquêtées est plus petit et il n'est pas raisonné pour représenter a priori l'agriculture française. C'est en revanche une base de données potentiellement plus riche en alternatives non chimiques à certaines substances actives puisqu'elle concentre des agriculteurs et agricultrices engagés dans la réduction des pesticides. Par ailleurs, comme évoqué plus haut, elle contient un certain nombre d'indicateurs économiques qui seront mobilisés pour l'analyse économique de cette étude. Nous présenterons les indicateurs économiques mobilisés pour ce travail plus loin dans ce rapport et en Annexe 6. Néanmoins, nous pouvons d'ores et déjà souligner que les aides, qu'elles émanent de la Politique Agricole Commune (PAC), de cahiers des charges privés ou autres, ne sont pas connues à travers les relevés du réseau DEPHY. Il en va de même pour les autres contraintes éventuelles qui s'appliquent aux systèmes que peuvent déployer les agriculteurs comme l'appartenance à une zone sensible ou de captage d'eau.

Pour finir, nous avons également mobilisé :

- Les données climatiques issues du modèle SAFRAN qui proviennent de Météo-France¹² et ont été téléchargées *via* la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE ;
- Les données de l'European Soil Data Centre (ESDAC) sur la composition physique¹³ et chimique¹⁴ des sols pour lesquelles nous avons dû faire une demande spécifique ;
- Les données relatives à la typologie des espaces ruraux et des espaces à enjeux spécifiques¹⁵ tel que mis à disposition sur l'entrepôt de données correspondant.

1.3.2. Littérature et échanges complémentaires

En complément du travail réalisé sur les bases de données citées précédemment, un travail bibliographique (littérature scientifique et littérature grise) a été réalisé et divers échanges ont été organisés.

Un premier Comité de Pilotage a eu lieu le 10 mars 2022 en présence de représentants de l'ACTA¹⁶, du CST d'Ecophyto, de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, du Ministère de l'Agriculture

¹² <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article788>

¹³ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data#tabs-0-description=0>

¹⁴ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/chemical-properties-european-scale-based-lucas-topsoil-data>

¹⁵ Données disponibles ici :

<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/KEF0YW>

¹⁶ Association de coordination technique agricole

et de la Souveraineté alimentaire, du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, du Ministère des Solidarités et de la Santé et du Ministère de la Transition écologique. Cet échange a permis de faire un premier bilan de l'avancée des travaux, de préciser les attentes des commanditaires et d'orienter la suite de l'étude pour répondre au mieux aux besoins de ces derniers.

Un deuxième Comité de Pilotage a eu lieu le 25 août 2022 en présence de représentants de l'Anses, du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, du Ministère des Solidarités et de la Santé, du Ministère de la Transition écologique et de l'ACTA. Cet échange a permis de présenter les travaux avant publication de ce rapport.

Deux échanges ont eu lieu avec les Instituts techniques agricoles. Le premier a eu lieu le 18 mars 2022 afin de présenter l'étude au groupe de travail des instituts techniques agricoles travaillant sur la protection intégrée des cultures et cibler avec eux les experts techniques à intégrer dans un comité. Ce dernier s'est ensuite réuni le 25 avril 2022 en présence de représentants d'Arvalis, de la FNAMS¹⁷, de l'ITB¹⁸, d'UNILET¹⁹ et Terres Inovia. Ces deux échanges ont permis de i) préciser les techniques de désherbage employées aujourd'hui sur les cultures pouvant recevoir du S-métolachlore, ii) préciser l'importance de chacune sur le territoire français, iii) comprendre plus finement les facteurs bloquant ou facilitant la mobilisation d'alternatives aux méthodes les plus répandues et iv) de prendre connaissance d'informations et documents complémentaires.

Des entretiens ont été réalisés avec six ingénieurs du réseau DEPHY. Ces échanges ont permis de préciser des situations relativement variées puisque chaque ingénieur accompagne un groupe d'une dizaine d'agriculteurs. Ces groupes sont disséminés en France et sont constitués de fermes en agriculture biologique ou conventionnelle, des fermes céréalières ou en polyculture-élevage, et ce, dans des conditions pédoclimatiques variées. Ces échanges ont permis i) d'affiner notre compréhension de la diversité des situations de production employant ou non le S-métolachlore, ii) de cibler des alternatives chimiques et non chimiques à cette molécule, et iii) de préciser la nature des facteurs bloquant ou facilitant la mobilisation de ces dernières.

Des contacts réguliers ont eu lieu avec l'Anses sur un certain nombre de questions techniques en lien avec la réglementation relative aux produits phytosanitaires et aux substances actives qui les composent. Comme expliqué précédemment, l'Anses nous a également fourni des données du type E-Phy plus complètes que celles téléchargeables directement sur internet.

Des échanges (par mails, visioconférences et téléphone) ont eu lieu avec des personnes travaillant dans les ministères luxembourgeois. Le S-métolachlore y est interdit depuis 2015 (sur l'ensemble du territoire national). Ces échanges ont permis d'enrichir ce rapport d'un cas d'étude basé sur la situation d'un Etat Membre – donc soumis au même cadre réglementaire

¹⁷ Fédération nationale des agriculteurs multiplicateurs de semences

¹⁸ Institut technique de la betterave

¹⁹ Union nationale interprofessionnelle des légumes transformés

communautaire concernant l'homologation des substances actives phytosanitaires – ayant fait face à une forte pollution de ses eaux par le S-métolachlore et ses métabolites et ayant fait le choix de l'interdire. Ces discussions ont permis de préciser le contexte de l'interdiction, les mesures prises face à la contamination des eaux (au-delà de l'interdiction de la molécule) et l'évolution de la situation agricole du Luxembourg depuis 2015 (incitation au désherbage mécanique et report sur d'autres substances actives), ainsi que de donner quelques éléments de bilan sept ans après l'interdiction de la molécule (absence de dérive potentielle de la flore adventice, bilan sur la qualité des eaux de surface et souterraines).

Enfin, de nombreuses interactions en interne à INRAE ainsi qu'avec un représentant de la cellule d'animation nationale du réseau Dephy, ont permis de nourrir ce travail, à la fois d'un point de vue méthodologique et d'un point de vue technique.

1.3.3. Définition du terme alternatives

Un point central pour réaliser ce travail est de définir ce qu'on entend par « alternative ». Ce terme est indirectement défini dans l'article 50 du règlement (CE) N° 1107/2009 (JOUE, 2009) : l'interdiction ou la restriction d'un ou des usages de la molécule étudiée ne peut se faire que s'il existe « un produit phytopharmaceutique autorisé ou une méthode non chimique de prévention ou de lutte » qui répondent aux critères détaillés dans la partie [1.2.2](#) (impacts sur la santé et l'environnement, impacts technico-économiques sur les exploitations, limitation des résistances, prise en compte des usages mineurs). Bien que dessinant les contours de ce qu'est une alternative à une substance active, ces critères n'en font pas une définition détaillée. Aussi nous proposons ici quelques éléments permettant de cadrer la manière dont nous l'avons appréhendée dans notre rapport.

En premier lieu, plusieurs notions entrent en jeu : le spectre d'action, l'efficacité et les conditions d'emploi. La meilleure alternative à une substance active correspondrait à une molécule s'employant dans les mêmes conditions (pré ou post-levée), ayant strictement le même spectre d'action et la même efficacité sur les cibles couvertes par ce spectre. Dans les faits, cette alternative parfaite n'existe pas. C'est pourquoi nous nous sommes appuyés sur la bibliographie et les retours du terrain afin d'identifier des molécules dont les spectres recouvrent au moins en partie celui du S-métolachlore, et dont l'efficacité sur les espèces ciblées s'en rapproche.

La nature de la flore présente et la pression de chacune des espèces la composant apparaît comme un critère important à prendre en compte pour définir ce qu'est une alternative. Dans le cas du S-métolachlore, nous avons d'abord considéré comme alternative une molécule efficace sur graminées (notamment les PSD, pour lesquelles est prisé le S-métolachlore). Néanmoins, nous avons considéré que dans des situations de faible pression en graminées, les alternatives possibles peuvent varier : elles peuvent alors correspondre à des molécules ayant certes une moindre efficacité sur graminées que le S-métolachlore, mais une action tout aussi efficace sur un certain nombre de dicotylédones.

D'autres critères peuvent entrer en jeu avant de considérer une substance active comme étant une alternative à une autre molécule. Il s'agit notamment de sa facilité d'emploi (*i.e.* contraintes techniques), son prix (*i.e.* contraintes économiques) et l'ensemble des critères explicités dans le règlement (CE) N° 1107/2009.

Par ailleurs, ce règlement indique que les alternatives peuvent également être des « méthode[s] non chimique[s] de prévention ou de lutte ». Ainsi, une alternative non chimique pourrait répondre aux mêmes critères que ceux explicités précédemment. Néanmoins, la comparaison implique notamment de savoir i) détailler les cibles sur lesquelles cette alternative permet d'agir (*i.e.* l'équivalent du spectre d'action) et ii) mesurer finement son efficacité sur chacune de ces cibles ; ce qui paraît moins aisé pour une intervention mécanique (*e.g.* un passage de bineuse), une mesure prophylactique (*e.g.* un allongement et une diversification des rotations) ou tout autre mesure qui n'est pas chimique.

Nous avons ainsi pu constater qu'un travail spécifique conduisant à définir précisément ce qu'est une alternative serait bénéfique et permettrait sans doute d'accroître le consensus autour de ce qu'on accepte de comparer.

1.4. Les grandes étapes de ce rapport

Le présent rapport se déroule en 7 parties dont une introduction (partie **1**) et une conclusion (partie **7**).

La partie **2** est consacrée à l'historique de l'utilisation du S-métolachlore en France, à ses caractéristiques générales, aux tonnages employés ces dernières années (de 2014 à 2020) en France en général et par culture. Nous y évoquons également une analyse de la presse grand public relative au S-métolachlore depuis 2017.

La partie **3** est consacrée à l'évaluation du degré de dépendance de l'agriculture au S-métolachlore. Nous y introduisons la notion de Quantité Maximale Consommable (QMC) que nous comparons aux quantités réellement achetées répertoriées dans la BNVD. Cette comparaison, réalisée à l'échelle de chaque code postal, permet d'évaluer le degré de dépendance que nous appellerons par la suite - la 'tension' - qu'il existe autour du S-métolachlore selon un grain géographique fin. Nous y présentons également une approche par modélisation visant à préciser le niveau de dépendance d'un territoire au S-métolachlore à partir d'un certain nombre de facteurs pédoclimatiques et agronomiques. Enfin, un paragraphe est consacré à la comparaison de la dépendance de l'agriculture au S-métolachlore relativement à d'autres substances actives.

La partie **4** présente quelques éléments relatifs à la pollution des eaux par le S-métolachlore en France. Cette pollution a conduit à un changement de réglementation fin 2021 avec une réduction des doses maximales de S-métolachlore autorisées sur maïs, sorgho, tournesol et soja. Nous avons cherché à établir les tonnages de S-métolachlore qui seraient employés annuellement à l'échelle de la France en considérant cette nouvelle réglementation. Nous avons également étudié les impacts sur les tonnages français en cas d'une restriction de

l'application du S-métolachlore sur le seul rang des cultures à large écartement. Pour chacun de ces deux scénarios, nous avons envisagé trois niveaux d'adoption par les agriculteurs.

La partie 5 est consacrée à l'utilisation du S-métolachlore. Nous présentons dans un premier temps le cas d'étude du Luxembourg et les alternatives mobilisées dans cet Etat membre à la suite de l'interdiction du S-métolachlore sur l'ensemble de son territoire en 2015. Dans un second temps, nous revenons sur les principales raisons de l'utilisation du S-métolachlore en France. Cette partie repose principalement sur les contributions des instituts techniques agricoles. Nous y amorçons également une discussion sur l'existence d'alternatives chimiques et non chimiques au S-métolachlore.

Néanmoins, c'est principalement dans la partie 6 de ce rapport que des exemples d'alternatives seront détaillés et discutés. Toute cette partie est consacrée aux alternatives chimiques et non chimiques au S-métolachlore et à l'impact technico-économique de leur mobilisation sur les exploitations agricoles. Des exemples d'itinéraires techniques mobilisant à la fois le S-métolachlore et des alternatives y sont aussi présentés ; ils proviennent des différents échanges que nous avons eus avec la profession agricole et les ingénieurs du réseau DEPHY, ainsi que de la littérature. Les analyses économiques proposées dans cette partie sont statistiques et elles s'appuient principalement sur l'ensemble des données du réseau DEPHY. Un paragraphe est dédié à une analyse permettant de quantifier la sensibilité de certains indicateurs économiques (marges réalisées sur les exploitations agricoles) à des variations conjoncturelles (variation des prix des récoltes ou d'un certain nombre de charges), que ce soit pour des exploitations employant du S-métolachlore, des alternatives chimiques ou des alternatives non chimiques.

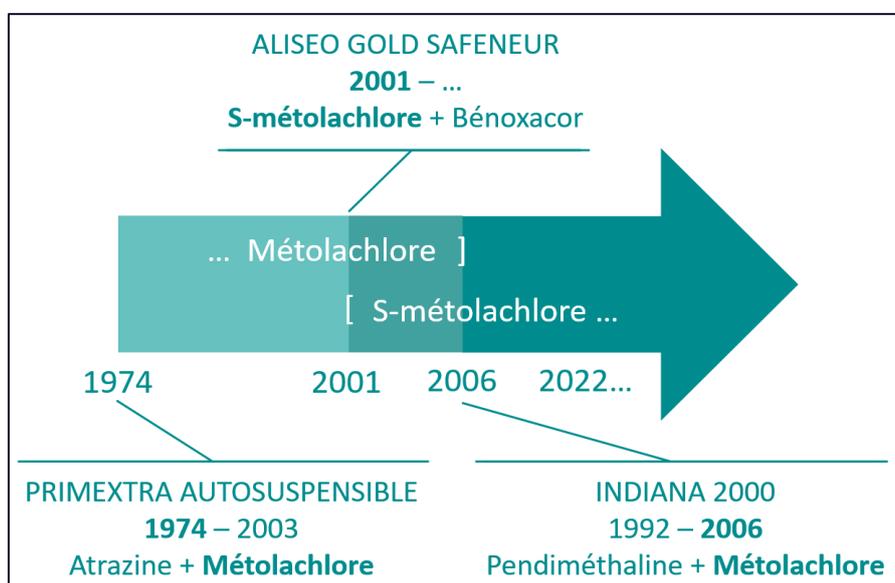
2. Caractéristiques du S-métolachlore, historique et tonnages employés

2.1. Chronologie générale²⁰

La commercialisation du S-métolachlore fait suite à celle du métolachlore (voir [Figure 3](#)). La première autorisation d'un produit commercial contenant du métolachlore remonte à 1974 pour le PRIMEXTRA AUTOSUSPENSIBLE (contenant du métolachlore et de l'atrazine). Son interdiction a été signifiée en 2003. Néanmoins le produit INDIANA 2000 (contenant de la pendiméthaline et du métolachlore) a été autorisé jusqu'en 2006. Selon l'historique des données E-Phy compilées par l'Anses, il s'agit là du dernier produit autorisé contenant du métolachlore.

Le S-métolachlore a fait son entrée sur le marché français en 2001 avec le produit commercial ALISEO GOLD SAFENEUR (contenant S-métolachlore et bénomaxacor, un phytoprotecteur assurant la sélectivité sur les cultures). En 2022, 12 produits commerciaux contenant du S-métolachlore sont encore autorisés.

Figure 3 : Chronologie du S-métolachlore en France



Source : Propre élaboration à partir des données E-Phy de l'Anses (fichier fourni par l'ANSES le 12 octobre 2021)

²⁰ Elaborée à partir du fichier E-Phy compilé fourni par l'Anses le 12/10/2021.

2.2. Caractéristiques générales

Le S-métolachlore est un herbicide de la famille des chloroacétamides.

Son mode d'action est systémique et son entrée dans les plantes se fait principalement *via* le système racinaire (Arvalis, 2014 ; Chambre d'Agriculture Alsace, 2021) et action par contact (Arvalis, 2014).

Ses usages ont peu varié au cours du temps. Il est autorisé à ce jour sur les cultures suivantes : ananas, betteraves industrielles et fourragères, canne à sucre, cultures porte-graine²¹, haricots et pois (écossés ou non) frais, maïs, maïs doux, soja, tournesol (data.gouv.fr, 2022). Selon le catalogue national des usages phytopharmaceutiques (DGAL/SDQSPV/2021-278, 2021), ces cultures correspondent à des « cultures de référence », ou groupes de cultures de référence, qui peuvent cibler un ensemble de cultures plus larges : on parle alors des « cultures rattachées » et des « cultures apparentées »²². Nous pouvons notamment souligner que la culture de référence « maïs » inclut d'autres céréales en C4 dont le sorgho, le millet et les mohas qui peuvent donc recevoir également du S-métolachlore²³.

Ce dernier est employé du pré-semis à la post-levée précoce de la culture (Chambre d'Agriculture Alsace, 2021 ; Chambre d'Agriculture Pays de la Loire, 2020). Sur maïs, tournesol et soja, le S-métolachlore est principalement utilisé en pré-levée de la culture et son pic d'usage se situe donc en avril-mai ; en betterave sucrière, il est utilisé en général un peu plus tôt, en mars-avril (Anses, 2021b).

Son spectre d'action est large par comparaison à d'autres molécules herbicides, avec une efficacité sur graminées et dicotylédones. Il est principalement utilisé pour lutter contre les graminées, notamment les graminées estivales telles que panic, sétaire, digitale, mais aussi vulpin et raygrass ; il permet de lutter contre ces dernières notamment dans certains cas de résistance à d'autres substances actives inhibitrices de l'ALS (Anses, 2021b) ou de l'ACCase (Vacher *et al.*, 2019). Il est également utilisé pour lutter contre certaines dicotylédones annuelles et son spectre d'action est plus large lorsqu'il est associé à d'autres molécules (voir partie 5.2).

Le S-métolachlore peut en effet être utilisé seul ou en association (data.gouv.fr, 2022). Lorsqu'il est la seule substance active d'un produit phytopharmaceutique, sa concentration est de 960 g/L. Il peut également être associé à un phytoprotecteur adjuvant, également appelé « safeneur » : le bénoxacore. Dans ce cas, le S-métolachlore a une concentration de 915 g/L tandis que le bénoxacore est concentré à 45 g/L. Enfin, certains produits commerciaux à l'instar

²¹ Le S-métolachlore est autorisé, en plus des cultures pouvant en recevoir pour un usage classique (maïs, tournesol, betterave, etc...), sur quelques potagères porte-graine : courgette, potiron et coloquinte.

²² Les définitions de cultures rattachées et cultures apparentées sont données dans l'annexe I du règlement (CE) n°396/2005

²³ La liste complète des cultures de référence et des cultures rattachées peut être trouvée ici : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000043401947/2021-04-22/>

du Camix sont composés à la fois de S-métolachlore (400 g/L), de bénoxacore (20 g/L) et de mésotrione (substance active concentrée à hauteur de 40 g/L).

Le choix du S-métolachlore seul ou de la formulation associant S-métolachlore et bénoxacore répond au risque encouru que la culture ciblée puisse montrer des symptômes de phytotoxicité plus ou moins transitoire. Le bénoxacore vient alors renforcer les capacités de la plante à bien supporter la présence de l'herbicide (Fuerst *et al.*, 1993).

En fonction de la concentration en S-métolachlore et des cultures, la dose maximale autorisée de produit commercial (en L/ha) varie. Un résumé des usages autorisés du S-métolachlore est proposé dans le [Tableau 2](#).

A ce jour, 12 produits commerciaux contenant du S-métolachlore bénéficient d'une autorisation de mise sur le marché et ainsi d'un numéro d'AMM (ou d'un permis de commerce parallèle et d'un numéro de permis pour les produits venant d'un autre Etat membre²⁴) : AMPLITEC (N° AMM : 2160781), BASAR (N° AMM : 2210203), CAMIX (N° AMM : 2060088), CAZOMERCANTO (N° PERMIS : 2140274 – Nom du produit d'origine : DUAL GOLD - Pays d'origine : Espagne), DEFLEXO S (N° AMM : 2190040), DELUGE 960 EC (N° AMM : 2180088), DUAL GOLD SAFENEUR (N° AMM : 9800259), MELANO GOLD (N° PERMIS : 2211135 – Nom du produit d'origine : DUAL GOLD 960 EC – Pays d'origine : Roumanie), MERCANTOR GOLD (N° AMM : 9800182), ORCAN (N° PERMIS : 2161063 – Nom du produit d'origine : DUAL GOLD – Pays d'origine : Italie), S-METOLASTAR (N° AMM : 2160479), S-METOLASTAR SAFENEUR (N° AMM : 2200519).

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons particulièrement mais pas exclusivement aux campagnes 2017 et 2020. En effet, nous verrons par la suite que ces années peuvent être communes à différentes bases de données sur lesquelles nous appuyons notre travail : notamment la dernière enquête disponible sur les pratiques culturales en grandes cultures ainsi que la base de données du réseau DEPHY.

Il est important de noter que les usages autorisés pour le S-métolachlore ont varié entre 2017 et 2022. Ainsi, entre 2017 et 2022 ([Tableau 2](#)), de nouveaux produits ont été autorisés à l'instar du DEFLEXO S et du DELUGE 960 EC. Depuis le 29 novembre 2021, ces changements s'accompagnent d'une réduction des doses maximales autorisées pour maïs, soja, sorgho et tournesol maintenant limitées à 1 000 g/ha/an (data.gouv.fr, 2022) alors qu'elles montaient jusqu'à 1 921,5 g/ha (2,1 L/ha * 915 g/L) pour maïs et 1 344 g/ha (1,4 L/ha * 960 g/L) pour soja, sorgho et tournesol. Afin de protéger les eaux de surfaces, la réglementation impose également de « respecter une zone non traitée de 20 mètres par rapport aux points d'eau comportant un dispositif végétalisé permanent non traité d'une largeur de 5 mètres en bordure des points d'eau pour les usages sur 'maïs', 'tournesol', 'soja' et 'betterave industrielle

²⁴ « Un produit phytopharmaceutique qui est autorisé dans un État membre (État membre d'origine) peut, sous réserve de l'octroi d'un permis de commerce parallèle, être introduit de cet État Membre en vue d'être mis sur le marché en France s'il est établi que la composition du produit phytopharmaceutique est identique à celle d'un produit phytopharmaceutique déjà autorisé en France, appelé produit de référence. » (Ephy Anses, 2022)

et fourragère' » et de « ne pas appliquer ce produit sur parcelle drainée en période d'écoulement des drains » quelle que soit la culture²⁵.

Un peu plus loin dans ce rapport, nous quantifions l'impact de tels changements réglementaires sur les volumes de S-métolachlore qui seront utilisés en France à l'avenir, en comparaison à la réglementation qui était en vigueur en 2017.

Tableau 2 : usages autorisés du S-métolachlore en février 2022, compositions et doses maximales autorisées des produits commerciaux

Produits commerciaux	Composition	Dose en 2017 (L/ha)	Dose en 2022 (L/ha)	Usages autorisés (culture de référence * désherbage)
CAMIX	S-métolachlore (400g/L) + Benoxacor (20g/L) + Mesotrione (40g/L)	3,75	2,5	Maïs
		3,75	3,75	Maïs doux Canne à sucre
DUAL GOLD SAFENEUR	S-métolachlore (915/L) + Benoxacor (45/L)	2,1	1,09	Maïs
ALISEO GOLD SAFENEUR *		2,1	2,1	Maïs doux
DOMANIS GOLD SAFENEUR *				
DEFLEXO S ** S-METOLASTAR SAFENEUR **				
AMPLITEC CAZOMERCANTO MERCANTOR GOLD ORCAN S-METOLASTAR BASAR ** DELUGE 960 EC ** MELANO GOLD **	S-métolachlore (960/L)	0,6	0,6	Betterave industrielle et fourragère
		2	1,04	Maïs
		1,4	1,04	Soja Tournesol Sorgho
		1,4	1,4	Haricots et Pois écosésés (ou non) frais Porte graine
		2	2	Ananas Canne à sucre

* Produit autorisé en 2017 mais interdit en 2022

** Produit autorisé en 2022 mais n'existant pas en 2017

Source : Propre élaboration à partir des données E-Phy de l'Anses (data.gouv.fr, 2022) et d'un fichier transmis par l'ANSES le 12 octobre 2021 compilant l'ensemble des usages (autorisés et retirés) depuis la date de première autorisation de chaque produit phytosanitaire²⁶.

²⁵ <https://ephy.anses.fr/substance/s-metolachlor>

²⁶ Nous avons complété ces informations à l'aide du site E-Phy de l'Anses à chaque fois que cela nous semblait nécessaire et pertinent, consulté en février 2022.

2.3. Caractéristiques chimiques

La formule moléculaire du S-métolachlore est $C_{15}H_{22}ClNO_2$.

La substance active S-métolachlore autorisée actuellement dans l'Union Européenne est « chimiquement équivalente à la substance métolachlore » (Anses, 2021a). La substance active S-métolachlore correspond à un « mélange technique enrichi en isomère S » en comparaison à la substance active métolachlore. La substance active S-métolachlore contient entre 80 et 100% d'isomère S (et donc 0 à 20% d'isomère R), pour 50% d'isomère S et 50% d'isomère R dans le métolachlore. L'isomère S a une activité herbicide « très supérieure à celle de l'isomère R » (Anses, 2021a). Le passage réglementaire du métolachlore au S-métolachlore était donc un moyen de garder l'activité herbicide intacte tout en réduisant la quantité de produit appliquée dans l'environnement. Cela a été rendu possible par la mise au point d'un procédé de production catalysé à l'iridium (Blaser *et al.*, 1999).

Comme évoqué en partie **1.2.3**, les codes des mentions de danger associés au S-métolachlore selon le règlement (CE) n°1272/2008 (JOUE, 2008) sont :

- H317 : peut provoquer une allergie cutanée ;
- H400 : très toxique pour les organismes aquatiques ;
- H410 : très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets à long terme.

Ces phrases de risque conduisent à classer le S-métolachlore dans la catégorie des produits soumis à une redevance pour pollution diffuse (RPD) de 3€ par kilogramme de matière active vendue²⁷.

2.4. Tendances des tonnages employés

La BNVD permet de connaître l'ensemble des achats des produits commerciaux et substances actives de 2013 à 2020 (BNVD Traçabilité, 2022).

En 2020, selon la BNVD, 1 917 634 kg de S-métolachlore ont été achetés par des exploitations agricoles localisées sur le territoire français, ce qui représente 3,5% de la quantité de substances actives totale achetée sur le territoire national cette même année. Pour cette même campagne, le S-métolachlore est la 6^{ème} substance active la plus achetée et 3^{ème} substance active herbicide achetée après le glyphosate (8 467 239 kg) et le prosulfocarbe (5 724 523 kg). La quantité de S-métolachlore achetée en 2020 représente 6,74% des quantités de substances actives herbicides (selon les données issues de la BNVD et du catalogue E-Phy de l'Anses).

La **Figure 4** présente l'évolution des quantités de S-métolachlore achetées sur le territoire français ces dernières années. On ne prend pas en compte l'année 2013 car elle correspond à

²⁷ Le montant de la RPD a été obtenu en croisant la liste des substances concernées, par catégorie, issue de l'arrêté du 19 novembre 2021 du Ministère de la Transition Ecologique, aux montants de RPD associés à chaque catégorie définis par l'article L. 213-10-8 du code de l'environnement.

la première année pour laquelle la BNVD Achats est mise en place et les achats n’y sont donc pas exhaustifs. On note une augmentation des achats en 2018 (+28% par rapport à 2017), suivie par une diminution en 2019 (-38% par rapport à 2018, -21% par rapport à 2017). La fluctuation constatée entre 2017 et 2019 résulte d’une part des anticipations d’achat avant l’augmentation de la taxe de redevance pour pollution diffuse au 1^{er} janvier 2019 et, d’autre part, à des particularités climatiques défavorables de la saison 2018 mais sans doute d’impact modéré sur le recours aux herbicides (MASA, 2021).

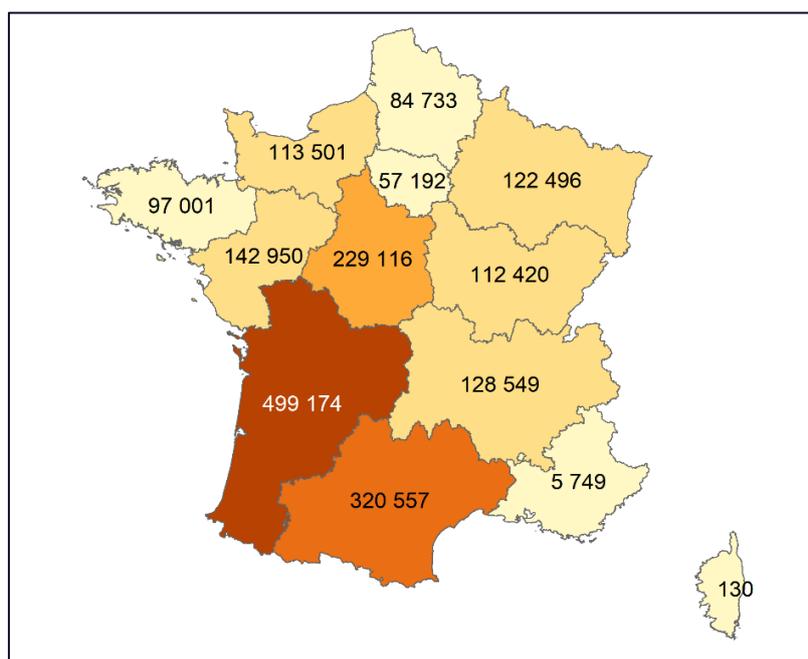
Figure 4 : Quantités de S-métolachlore achetées de 2014 à 2020 en France (tonnes)



Source : Propre élaboration à partir des données de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2022)

Dans la BNVD, les quantités achetées de substances actives sont agrégées à différents grains spatiaux, allant de la région au code postal. Les quantités de S-métolachlore achetées par région en 2020 sont présentées sur la [Figure 5](#).

Figure 5 : Quantités de S-métolachlore achetées en 2020 par région en France métropolitaine (en kg)



Source : Propre élaboration à partir des données de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2022)

La BNVD donne également les quantités de substances actives achetées par AMM. Le [Tableau 3](#) présente les quantités de S-métolachlore achetées par AMM en 2017 et en 2020.

Tableau 3 : Quantités de S-métolachlore achetées par AMM en 2017 et en 2020 (en kg) en France

AMM	Nom du produit	Quantités de S-métolachlore en 2017 (kg)	Quantités de S-métolachlore en 2020 (kg)
2 010 531	ALISEO GOLD SAFENEUR	88 730	63 091
2 060 088	CAMIX	892 875	864 741
2 160 479	S-METOLASTAR	30 210	135 052
2 160 781	AMPLITEC	65 714	125 292
9 800 182	MERCANTOR GOLD	443 306	343 168
9 800 258	DUAL GOLD	5	86
9 800 259	DUAL GOLD SAFENEUR	336 573	268 557
2 180 088	DELUGE 960 EC	0	53 922
2 190 040	DEFLEXO S	0	63 726
Total		1 857 413	1 917 634

Source : Propre élaboration à partir des données 2017 et 2020 de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2022)

Note : Le DUAL GOLD a été retiré en 2011 (n°AMM 9 800 258). On ne devrait donc pas retrouver de faibles quantités achetées dans le tableau.

Ainsi, 1 917 634 kg de S-métolachlore ont été achetés sur les AMM autorisées en 2020. Le CAMIX (n°AMM 2 060 088) arrive en tête avec un total de 864 741 kg de S-métolachlore achetés.

2.5. Répartition des usages

Les enquêtes Pratiques Culturelles (PK dans la suite du rapport) pour les grandes cultures recouvrent une partie des usages du S-métolachlore puisqu'on retrouve le tournesol, le maïs fourrage, le maïs grain, la betterave sucrière, le soja ainsi que la canne à sucre dans la liste des cultures enquêtées. Sont en revanche exclues des enquêtes le maïs doux, la betterave fourragère, les haricots et pois écosés, le sorgho, l'ananas ainsi que les cultures porte-graine. Le **Tableau 4** ci-dessous présente, pour l'année 2017 (dernière enquête PK Grandes cultures accessible au moment de la publication de ce rapport), une extrapolation à l'échelle du territoire français i) des surfaces traitées au S-métolachlore, ii) des surfaces traitées par au moins un herbicide, iii) des doses moyennes de S-métolachlore appliquées par hectare et iv) des doses maximales réglementaires pour chacune de ces cultures (betterave sucrière, maïs fourrage, maïs grain, soja, tournesol et canne à sucre). Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes concentrés sur les cultures de France métropolitaine (la canne à sucre apparaît néanmoins ponctuellement dans le **Tableau 4**, le **Tableau 5**

Le **Tableau 5** et le **Tableau 6** présentent ces chiffres pour les enquêtes PK précédentes, soit 2014 et 2011.

Tableau 5 et le **Tableau 6** puisqu'elle figure dans les enquêtes PK).

Tableau 4 : Surfaces traitées au S-métolachlore, doses moyennes et volumes employés par culture en France en 2017

2017	Surfaces traitées au Smoc				Surfaces traitées par au moins un herbicide				Dose moyenne de Smoc appliquée (kg/ha)		Réglementation : Dose de Smoc maximale autorisée en 2017 [et fin 2021] (kg/ha)
	PK		DEPHY		PK		DEPHY		PK	DEPHY	
	N	%	N	%	N	%	N	%			
Betterave sucrière	26	5%	13	14%	470	100%	90	100%	0,46	0,53	0,58
Maïs fourrage	348	29%	201	25%	1 187	97%	693	86%	1,23	0,89	1,92 [1]
Maïs grain	533	38%	284	40%	1 355	98%	611	87%	1,25	1,07	1,92 [1]
Soja	68	58%	60	30%	95	82%	119	59%	1,24	1,18	1,34 [1]
Tournesol	203	38%	58	19%	493	93%	248	81%	1,24	1,08	1,34 [1]
Canne à sucre	17	46%			36	98%			0,46		1,92

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY et de l'enquête pratiques culturelles grandes cultures de 2017.

Note : "Smoc" pour S-métolachlore. Pour les enquêtes PK, les surfaces sont extrapolées et sont exprimées en milliers d'hectares ; pour DEPHY, elles sont exprimées en nombre de parcelles. Ainsi N représente soit des milliers d'hectares (pour les colonnes relatives aux enquêtes PK), soit un nombre de parcelles (pour DEPHY).

Le **Tableau 5** et le **Tableau 6** présentent ces chiffres pour les enquêtes PK précédentes, soit 2014 et 2011.

Tableau 5 : Surfaces traitées au S-métolachlore, doses moyennes et volumes employés par culture en France en 2014

2014	Surfaces traitées au Smoc				Surfaces traitées par au moins un herbicide				Dose moyenne de Smoc appliquée (kg/ha)		Réglementation :
	PK		DEPHY		PK		DEPHY		PK	DEPHY	Dose de Smoc maximale autorisée en 2014 [et fin 2021] (kg/ha)
	N	%	N	%	N	%	N	%			
Betterave sucrière	16	4%	7	12%	384	100%	60	100%	0,44	0,58	0,58
Maïs fourrage	344	27%	22	10%	1 263	98%	206	90%	1,25	1,16	1,92 [1]
Maïs grain	657	38%	133	36%	1 704	98%	332	89%	1,27	1,04	1,92 [1]
Soja			2	11%			14	78%		1,3	1,34 [1]
Tournesol	217	35%	10	16%	591	95%	54	86%	1,25	1,28	1,34 [1]
Canne à sucre	10	38%			27	99%			0,44		1,92

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY et de l'enquête pratiques culturales grandes cultures de 2014 .

Note : "Smoc" pour S-métolachlore. Pour les enquêtes PK, les surfaces sont extrapolées et sont exprimées en milliers d'hectares ; pour DEPHY, elles sont exprimées en nombre de parcelles. Ainsi N représente soit des milliers d'hectares (pour les colonnes relatives aux enquêtes PK), soit un nombre de parcelles (pour DEPHY).

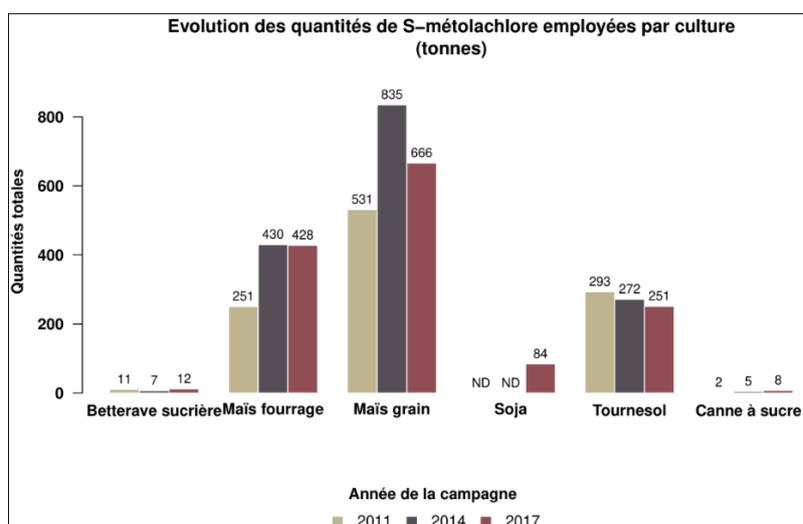
Tableau 6 : Surfaces traitées au S-métolachlore, doses moyennes et volumes employés par culture en France en 2011

2011	Surfaces traitées au Smoc				Surfaces traitées par au moins un herbicide				Dose moyenne de Smoc appliquée (kg/ha)		Réglementation : Dose de Smoc maximale autorisée en 2011 [et fin 2021] (kg/ha)
	PK		DEPHY		PK		DEPHY		PK	DEPHY	
	N	%	N	%	N	%	N	%			
Betterave sucrière	25	7%	10	21%	364	100%	48	100%	0,42	0,48	0,58
Maïs fourrage	206	19%	11	12%	1 033	97%	80	86%	1,22	1,29	1,92 [1]
Maïs grain	400	27%	95	28%	1 424	97%	321	95%	1,33	0,89	1,92 [1]
Soja			18	56%			25	78%		1,18	1,34 [1]
Tournesol	233	35%	36	26%	632	94%	123	94%	1,26	1,14	1,34 [1]
Canne à sucre	4	15%			27	97%			0,42		1,92

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY et de l'enquête pratiques culturales grandes cultures de 2011.

Note : "Smoc" pour S-métolachlore. Pour les enquêtes PK, les surfaces sont extrapolées et sont exprimées en milliers d'hectares ; pour DEPHY, elles sont exprimées en nombre de parcelles. Ainsi N représente soit des milliers d'hectares (pour les colonnes relatives aux enquêtes PK), soit un nombre de parcelles (pour DEPHY).

Les quantités de S-métolachlore employées par cultures en France (pour les cultures enquêtées dans les enquêtes PK) sont présentées **Figure 6**.

Figure 6 : Quantités de S-métolachlore employées par cultures en France en 2011, 2014 et 2017 (en tonnes)


Source : Enquêtes pratiques culturales grandes cultures 2011, 2014 et 2017.

Note : Le soja n'est présent dans les enquêtes que depuis 2017.

Notons que le soja n'est pas identifié dans les enquêtes PK de 2011 et 2014 car il n'était pas suivi. Parmi les tendances identifiables dans ces tableaux, on note une forte fluctuation des surfaces traitées au S-métolachlore en betterave sucrière : elles sont plus faibles en 2014 qu'en 2011 et 2017 (de 25 000 à 15 000 ha environ, sur une surface moyenne cultivée de betterave sucrière d'environ 400 000 ha), ainsi que l'absence de filière bio en 2017, expliquant le fait que la totalité des surfaces étaient traitées chimiquement. On remarque aussi que la part des surfaces traitées au S-métolachlore en maïs (grain et fourrage) a sensiblement augmenté entre 2011 et 2014 (+10 points environ), avant de se stabiliser en 2017. Cette forte progression est à rapprocher du retrait de l'acétochlore en 2014. La part des surfaces de canne à sucre traitées au S-métolachlore est en constante augmentation entre 2011 et 2017 dans les enquêtes PK ; cette culture n'est en revanche pas présente dans les données issues du réseau DEPHY. Les surfaces traitées de tournesol sont, elles, restées relativement stables sur la période.

2.6. Le S-métolachlore dans la presse grand public

Sur la période entre le 1^{er} janvier 2017 et mai 2022, quelques centaines d'articles de presse grand public évoquent directement, ou en reprenant un communiqué de l'AFP²⁸, le S-métolachlore en France. La plupart fait état de la découverte d'une pollution des eaux par cet herbicide ou ses métabolites tels que l'ESA métolachlore et l'OXA métolachlore, nécessitant une intervention pour préserver la potabilité de l'eau.

Dans certaines communes, la concentration de ces molécules a dépassé le seuil réglementaire de qualité dans les eaux destinées à la consommation humaine qui est fixée par la directive européenne 98/83/CE. Ces seuils (qui ne sont pas des seuils sanitaires²⁹) sont fixés à 0,1 µg/L par substance individuelle et 0,5 µg/L pour la somme de ces molécules (Anses, 2019).

Un certain nombre d'articles décrivent les solutions mobilisées suite à ce type de pollutions. Il peut s'agir de distribution de bouteilles d'eau dans des communes où l'eau du robinet ne serait momentanément plus potable, de la nécessité de mettre en place de nouveaux filtres à charbon, de construire de nouvelles unités de traitements des eaux, ou encore de réaliser des raccordements et mélanger des eaux pour faire baisser les concentrations en polluants.

De tels dépassements de la limite de qualité mènent parfois à des dérogations pour continuer à distribuer l'eau au robinet. C'est par exemple le cas pour l'eau du forage de la Veauce à Saint-Julien d'Armagnac (Landes) où le S-métolachlore était observé à des concentrations pouvant aller jusqu'à 3 µg/L depuis 2016 (Anses, 2021c).

L'Annexe 3 rassemble des citations prises dans un certain nombre d'articles grand public. Si nous ne nous appuyons pas sur la presse grand public comme nous le faisons pour la littérature scientifique, elle a néanmoins l'intérêt de rendre compte de la manière dont les journalistes présentent le S-métolachlore aux citoyens et donc comment ces derniers peuvent le percevoir.

²⁸ Agence France-Presse

²⁹ Selon l'avis de l'Anses du 2 janvier 2014 (Anses, 2014), la valeur sanitaire maximale dans les eaux destinées à la consommation humaine (« V_{max} ») est de 510 µg/L pour le métolachlore ESA et le métolachlore OXA.

3. Evaluation du degré de dépendance de l'agriculture au S-métolachlore

3.1. Utilisations du S-métolachlore d'après la BNVD au regard de l'assolement

3.1.1. Quantités achetées et quantités maximales consommables (QMC)

Les cultures pouvant recevoir une substance active (SA) donnée ne sont pas réparties de manière uniforme sur l'ensemble du territoire français. Ainsi, selon les données du Registre Parcellaire Graphique (RPG), la culture de maïs, l'une des principales cultures concernées par le S-métolachlore, présente un assolement bien plus élevé dans la région Pays de la Loire qu'en région PACA, par exemple. En conséquence, il est a priori logique de retrouver une plus grande quantité de S-métolachlore achetée dans la première. Aussi, les différences de quantités ne traduisent pas nécessairement une dépendance plus forte - que nous allons appeler par la suite « tension » - autour du S-métolachlore, mais peuvent résulter d'une simple différence d'assolement. De manière générale, on conclut que l'étude seule des quantités de SA achetées ou vendues, par le biais de la BNVD, ne constitue pas une mesure du niveau de tension autour de cette SA. Il est nécessaire de mettre les quantités achetées en regard d'une référence objective telle qu'une quantité maximale réglementaire, qui dépend de l'assolement.

Dans cette optique, nous avons développé un indice : la Quantité Maximale Consommable (QMC) qui donne, pour une zone géographique donnée, la limite supérieure réglementaire de SA utilisable. Pour chaque culture concernée par une SA et pour une zone géographique donnée, la QMC dépend de deux choses : d'une part de la dose maximale de SA autorisée par la réglementation pour cette culture, et d'autre part de la surface occupée par la culture pouvant recevoir la SA, dans la zone géographique. Par définition, le calcul de la QMC exclut donc les surfaces en agriculture biologique, ne pouvant pas être traitées.

Formellement, on définit la QMC (unité pouvant varier selon la SA, en kg pour le S-métolachlore), pour une zone géographique (z) et une SA (SA) donnée, comme :

$$QMC_{SA;z} = \sum_{i=CA} S_i \cdot Q_i,$$

avec :

- CA = Culture pouvant recevoir la SA
- S_i = Surface de la culture i pouvant recevoir la SA, calculée comme surface totale de la culture i à laquelle on retranche la surface en AB (en hectares).
- Q_i = Quantité maximale de SA autorisée sur la culture i par unité de surface (unité pouvant varier, en kg/ha pour le S-métolachlore)

Nous estimons la surface S_i par le biais du Registre Parcellaire Graphique³⁰ (RPG), et de sa version pour l'agriculture biologique (RPG AB) de l'Agence Bio³¹. Le RPG donne le contour et la position physique des parcelles (données géographiques) déclarées pour bénéficier des aides de la PAC, ainsi que la culture présente sur celles-ci. Le RPG AB fait de même pour les parcelles déclarées en AB. Notons que, par définition, les parcelles non déclarées à la PAC ne sont pas prises en compte. Pour les grandes cultures, telles que la majorité des cultures concernées par le S-métolachlore, la part des surfaces non déclarées pour la PAC est marginale. Cette dernière peut néanmoins s'avérer plus forte pour le maraîchage ou les prairies. A ce titre, le **Tableau 7** compare l'agrégation des surfaces nationales pour quelques cultures sur lesquelles le S-métolachlore est autorisé, au sein du RPG, et telles qu'estimées par la statistique agricole annuelle (SAA) de 2020 par Agreste. De la même manière, pour le RPG AB, l'Agence Bio indique que *ces données comprennent 80 à 85% du total des parcelles conduites selon le mode de production biologique, toutes les parcelles conduites en bio ne faisant pas l'objet d'une demande d'aide PAC*. Là encore, le bilan n'est pas le même pour les grandes cultures que pour le maraîchage ou la prairie. Le **Tableau 8** résume ces différences pour quelques cultures, et peut fournir une idée de la faible amplitude du biais que cela induit.

Tableau 7 : Différence entre les surfaces totales en France issues du RPG et de la SAA d'Agreste en 2020

Cultures	Surfaces (ha)		Couverture (%)
	RPG	SAA	
Maïs (grain + fourrage)	3 080 225	3 111 027	99,01
Soja	186 629	186 948	99,83
Tournesol	778 388	777 799	100,08
Maïs doux	22 952	22 429	102,33
Haricots (verts + secs)	35 731	38 358	93,15

Source : Registre parcellaire graphique et SAA d'Agreste³²

Note : La nomenclature des données de la SAA et celle du RPG ne coïncidant pas, seules les cultures facilement identifiables ont été représentées.

³⁰ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-culturels-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

³¹ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/616d6531c2951bbe8bd97771/>

³² <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2107/detail/>

Tableau 8 : Différences entre les surfaces en AB en France issues du RPG AB et des données de l'Agence Bio en 2020

Cultures	Surfaces (ha)		Couverture (%)
	RPG AB	Totales	
Maïs (grain + fourrage)	93 205	99 675	93,51
Soja	53 196	53 348	99,72
Tournesol	56 867	57 211	99,40
Maïs doux	1 299	1 527	85,07

Source : Registre parcellaire graphique pour l'agriculture biologique et Agence Bio³³

Note : La nomenclature des données communales et celle du RPG AB ne coïncidant pas, seules les cultures facilement identifiables ont été représentées.

Le calcul de la quantité maximale Q_i se fait en gardant la dose maximale de SA parmi tous les produits utilisables sur la culture i . Chaque produit dispose d'une dose maximale réglementaire, ainsi que d'une concentration en SA. La quantité maximale de SA sur la culture i , pour chaque produit, correspond au produit entre la dose maximale et la concentration (à condition que les unités concordent dans la base de données E-Phy). On définit ensuite Q_i comme le maximum des quantités maximales de chaque produit. Le schéma présenté en **Figure 7** résume l'approche pour le cas du S-métolachlore en maïs grain.

³³ Fichier détaillant les surfaces d'un grand nombre de cultures menées en AB à l'échelle de la commune, transmis par l'Agence Bio le 28 juillet 2022

Figure 7 : Calcul de la quantité maximale de S-métolachlore pour le maïs grain

Quantité maximale réglementaire en maïs

N° AMM	Concentration en S-métolachlore	Dose maximale		Quantités de S-métolachlore
2010531	915 g/L	2,1 L/ha	→	1921,5 g/ha
2010532	915 g/L	2,1 L/ha	→	1921,5 g/ha
2060088	400 g/L	3,75 L/ha	→	1500 g/ha
2140274	960 g/L	2 L/ha	→	1920 g/ha
2160479	960 g/L	2 L/ha	→	1920 g/ha
2160781	960 g/L	2 L/ha	→	1920 g/ha
2161063	960 g/L	2 L/ha	→	1920 g/ha
2180088	960 g/L	2 L/ha	→	1920 g/ha
2190040	915 g/L	2,1 L/ha	→	1921,5 g/ha
2200519	915 g/L	2,1 L/ha	→	1921,5 g/ha
9800182	960 g/L	2 L/ha	→	1920 g/ha
9800259	915 g/L	2,1 L/ha	→	1921,5 g/ha

Quantité maximale réglementaire = 1921,5 g/ha

Source : Propre élaboration à partir des données E-Phy transmises par l'Anses en octobre 2021.

Note : on se place ici dans le cadre réglementaire avant le changement de novembre 2021.

L'objectif est ensuite de mettre en parallèle les quantités vendues de SA, issues de la BNVD, avec la QMC, afin de cerner la mise en tension locale de la SA. Dans notre travail, la zone géographique de référence retenue est le code postal, puisqu'il constitue le grain spatial le plus fin au sein de la BNVD. Il est important à ce stade de noter une différence entre les données de la BNVD et celles du RPG. Les ventes de produits phytosanitaires sont en effet rattachées au code postal du siège de l'exploitation agricole, tandis que l'assolement, au sein du RPG (et RPG AB), est donné pour le code postal physique de la parcelle. Ce décalage entre code postal siège et code postal physique constitue un biais inévitable attaché à notre méthodologie. En l'absence d'information sur le code postal siège des parcelles du RPG, il ne nous est actuellement pas possible d'estimer l'impact de ce biais.

Deux approches sont employées afin de mettre en relation les quantités de SA achetée (BNVD) et la limite réglementaire 'achetable' (QMC). La première consiste en la modélisation du lien entre BNVD et QMC à l'aide d'un modèle linéaire simple (Freedman, 2009), sans terme constant³⁴ :

$$BNVD = \alpha \cdot QMC$$

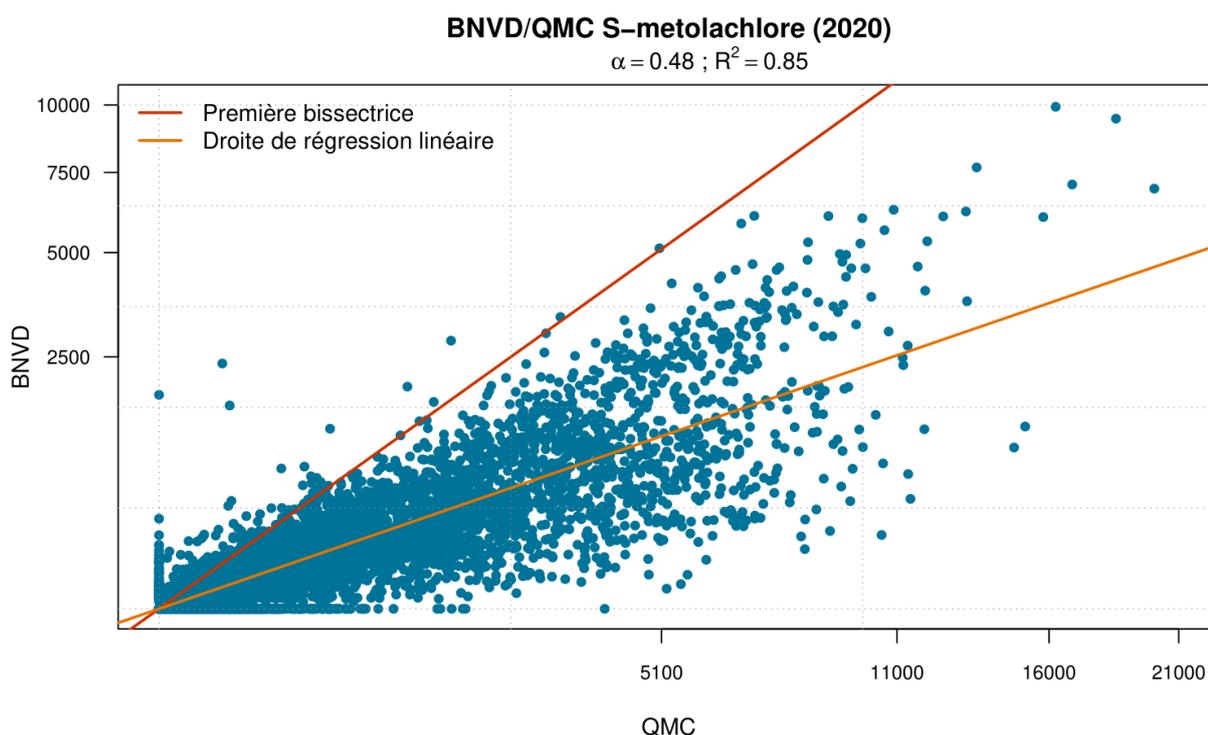
³⁴ S'il n'y a aucune culture susceptible de recevoir du S-métolachlore alors il ne devrait pas non plus y avoir d'achat. L'attendu est donc que la droite passe par l'origine en (0, 0).

Ici, α peut être interprété comme le ratio BNVD/QMC moyen, pour l'ensemble des codes postaux à disposition. Une valeur faible (par exemple, $\alpha = 0,1$) indique une faible dépendance globale (dans cet exemple fictif, les agriculteurs français n'achèteraient en moyenne que 10% des quantités qu'ils pourraient utiliser). A l'inverse, plus la valeur de α est proche de 1, plus les agriculteurs consomment de S-métolachlore au plus proche de la limite réglementaire. De plus, la régression linéaire permet de juger de l'homogénéité des situations à travers les codes postaux, en regardant la valeur du R^2 , comprise entre 0 et 1, qui donne une mesure de la dispersion autour de la régression. Plus cette valeur est proche de 1, plus la situation est homogène sur le territoire français, et inversement. Ainsi, cette approche permet à la fois de standardiser la quantification de la dépendance globale de l'agriculture française à une SA, mais aussi de juger de l'homogénéité de la situation au travers des différents codes postaux. On peut représenter graphiquement les résultats de l'analyse. En ce sens, la [Figure 8](#) présente les résultats obtenus pour le S-métolachlore en France en 2020. Sur ce graphique, la première bissectrice, en rouge, représente le ratio BNVD/QMC = 1, soit la limite réglementaire. La pente de la droite de régression linéaire, en orange, donne le degré de dépendance globale au S-métolachlore, tandis que l'étalement des points autour de la droite de régression, quantifié par le R^2 , renseigne sur l'homogénéité de la situation. A noter qu'afin de respecter les hypothèses du modèle linéaire, une transformation racine carrée a été appliquée sur les données ; l'équation devient donc :

$$\sqrt{BNVD} = \alpha \cdot \sqrt{QMC}$$

En conséquence, la valeur de α présentée dans le graphique est à l'échelle de la transformation, et doit donc être mise au carré pour obtenir sa véritable valeur.

Figure 8: Analyse de la QMC pour le S-métolachlore en France en 2020



Source : Propre élaboration à partir des données 2020 du RPG et RPG AB³⁵, de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2022) et E-Phy (fichier fournis par l'Anses).

Les résultats témoignent d'un usage plutôt homogène en France ($R^2 = 0.85$), avec un degré de dépendance globale entre moyen et fort ($\alpha = 0.48$). De manière globale, les agriculteurs français achètent environ 23% (α^2) du S-métolachlore qu'ils pourraient utiliser au vu de la réglementation. Si ce chiffre peut sembler faible, il est à mettre en perspective des pratiques pour d'autres herbicides d'une part, et de la méthodologie de calcul de la QMC de l'autre, qui tend à surévaluer la limite réglementaire en retenant la dose du produit ayant le plus fort grammage applicable à l'hectare. A titre d'exemple, en ce qui concerne le maïs, la dose maximale retenue pour le calcul de la QMC est celle de DUAL GOLD SAFENEUR (soit 1921.5 g/ha) alors que, selon un échange avec Arvalis, 67% des hectares de maïs recevant du S-métolachlore le reçoivent sous forme de CAMIX homologué à 3.75 L/ha jusqu'en 2020 (1500 g/ha de S-métolachlore) puis 2.5 L/ha depuis 2021 (1000 g/ha) et que la dose moyenne utilisée depuis 10 ans est plutôt de l'ordre de 2.8 L/ha (soit un peu 1100 g/ha). Les points situés au-dessus de la première bissectrice correspondent à des codes postaux achetant plus de S-métolachlore qu'ils ne peuvent en utiliser une année donnée. Deux catégories principales de territoires sont concernées :

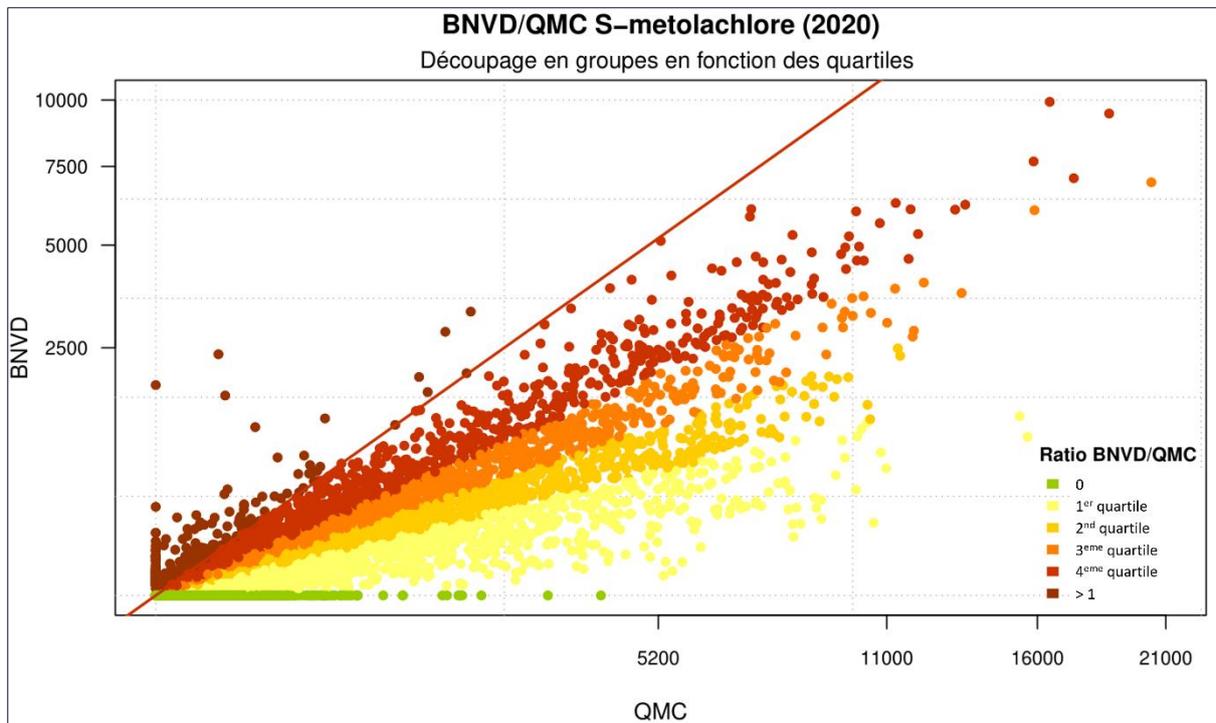
³⁵ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/> et <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/616d6531c2951bbe8bd97771/>

- Des territoires ayant une QMC très faible, dans lesquels il devient impossible d’acheter moins que la limite réglementaire (compte tenu du packaging, il peut par exemple, devenir impossible pour un agriculteur d’acheter ½ litre de produit seulement).
- Des territoires « centraux », et notamment des villes, qui centralisent les achats. En effet, les achats de SA dans la BNVD sont reliés au code postal du siège de l’acheteur.

3.1.2. Mise en évidence des hétérogénéités géographiques

Dans un second temps, nous avons calculé puis représenté graphiquement le ratio BNVD/QMC. L’objectif ici est de dépasser le cadre global, et de distinguer les zones locales de forte et de faible tension autour du S-métolachlore. En effet, si l’on a constaté une relative homogénéité dans le paragraphe précédent, cela ne signifie pas que la situation est équivalente partout. Dans l’optique de projeter nos résultats sur un fond de carte, nous avons regroupé les codes postaux selon leur appartenance aux quartiles du ratio BNVD/QMC. Nous avons de plus distingué spécifiquement les codes postaux ayant un ratio à 0, ou un ratio supérieur à 1. La **Figure 9** illustre ce découpage.

Figure 9 : Répartition des codes postaux selon les quartiles du ratio BNVD/QMC

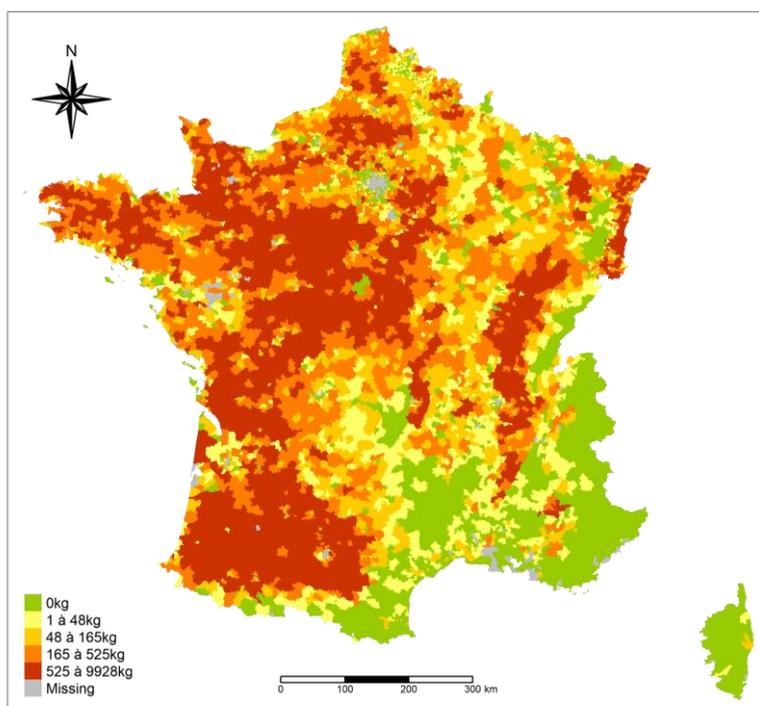


Source : Propre élaboration à partir des données 2020 du RPG et RPG AB³⁶, de la BNVD et E-Phy.

La projection du ratio BNVD/QMC sur un fond de carte, ainsi que sa comparaison avec la projection des achats de la BNVD, sont présentées respectivement au sein des **Figure 10** et **Figure 11**. On peut constater que si, dans certains cas, la BNVD suffit à se faire une idée de la tension autour du S-métolachlore, comme dans le Sud-Ouest, elle s'en écarte aussi parfois. C'est particulièrement le cas pour la Bretagne ou la Normandie, qui achètent de larges quantités de S-métolachlore, mais qui sont encore bien en deçà de leur limite réglementaire. Les codes postaux grisés sont ceux pour lesquels l'assolement n'était pas disponible au sein du RPG.

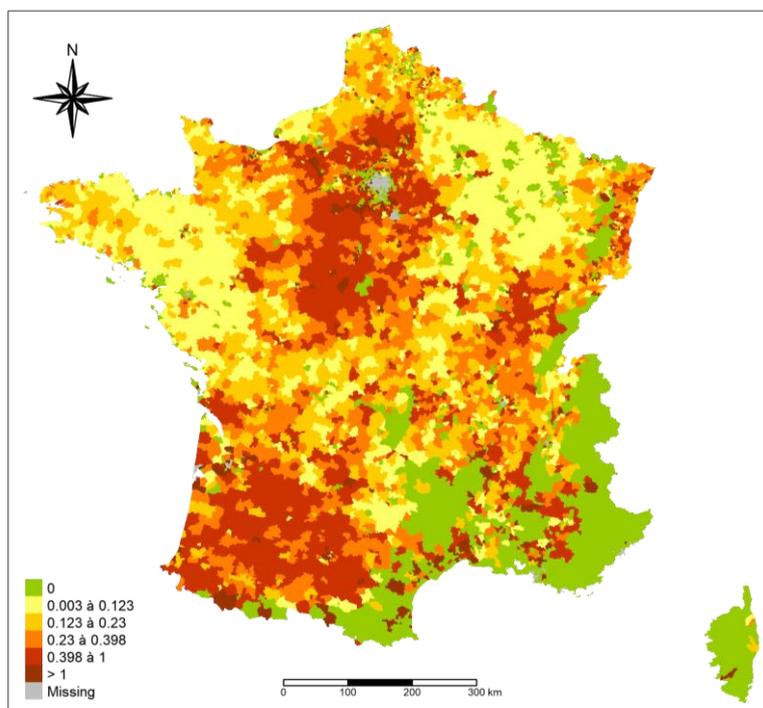
³⁶ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/> et <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/616d6531c2951bbe8bd97771/>

Figure 10 : Quantités de S-métolachlore vendues par code postal en 2020



Source : Propre élaboration à partir des données de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2022)

Figure 11 : Ratio BNVD/QMC par code postal en 2020



Source : Propre élaboration à partir des données de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2022), du catalogue E-Phy, et du RPG et RPG AB.

La projection du ratio BNVD/QMC à l'échelle des codes postaux français met en évidence de larges bassins de production particulièrement en tension : le Sud-Ouest (territoires autour du Tarn et de la Garonne ainsi que le Gers, les Landes et les Pyrénées-Atlantiques ; maïs (dont doux), soja et tournesol principalement) et le bassin parisien (Ile-de-France et Centre-Val-de-Loire ; haricots, maïs et sorgho principalement). Dans une moindre mesure, on identifie l'Alsace (Haut et Bas-Rhin ; maïs) et la Bourgogne-Franche-Comté (principalement le long de la Saône ; soja et maïs).

A l'inverse, on constate que la Bretagne et l'est de la Normandie présentent une tension relativement limitée, malgré de larges quantités achetées. Ces régions sont majoritairement dominées par des cultures fourragères, telles que le maïs ensilage, ou la betterave fourragère. L'indicateur BNVD/QMC diffère du NODU³⁷ (Méthodologie de calcul du NODU, 2017), indicateur usuel utilisé pour le pilotage du plan Ecophyto, de deux manières principales. Tout d'abord, par définition, le NODU est calculé à partir des doses de références des produits contenant la SA à la date du calcul, même si ce dernier couvre une période antérieure. L'avantage est évidemment la comparaison de différentes années sur une base commune. En revanche, le NODU ne renseigne donc pas sur le niveau de tension réel d'une année passée, ce que permet la QMC. De plus, le calcul de la dose unité (DU) repose sur la moyenne des doses maximales de chaque culture, pondérée par la SAU de ces cultures, là où la QMC correspond à la somme pondérée de ces doses maximales. En cela, la QMC est une véritable borne réglementaire supérieure. Un avantage majeur de cette propriété est que l'on peut utiliser la QMC afin d'estimer les tonnages de S-métolachlore (achetés ou vendus) en fonction de scénarios réglementaires, qui, par définition, modifieront la QMC. Cet aspect est abordé en partie [4.2](#)

³⁷ Nombre de doses unités

3.1.3. Facteurs de tension

Au cours de notre travail, nous avons donc été amenés à construire un indicateur, le ratio BNVD/QMC, permettant de mesurer de manière plus juste le degré de tension autour d'une SA quelconque. Nous avons utilisé ce ratio afin de quantifier la dépendance de l'agriculture française au S-métolachlore, à une échelle géographique fine, le code postal. Toutefois, à ce stade, nous n'avons pas encore caractérisé cette dépendance. En d'autres termes, nous n'avons fait qu'exposer la situation du S-métolachlore, sans la mettre en regard des facteurs explicatifs de cette dernière. Des éléments (pression des adventices, humidité/quantité de matière organique des sols...) sont ressortis des discussions avec les Instituts Techniques Agricoles (ITA), sans que l'on puisse, à ce stade, étayer leur importance respective par l'analyse des bases de données existantes.

Pour aller plus loin dans l'objectivation, nous avons donc entrepris de modéliser le ratio BNVD/QMC en fonction de différents facteurs externes susceptibles de moduler la tension autour du S-métolachlore. L'idée est la suivante : si l'on est capable de prédire correctement le ratio BNVD/QMC à partir de facteurs externes facilement identifiables, alors nous serions en mesure d'identifier des situations-types, correspondant à telle ou telle combinaison de facteurs, et associés à un niveau plus ou moins haut de tension autour d'une SA. L'intérêt d'une telle démarche est double : ordonner les facteurs de tension autour d'une SA d'une part, et classifier les territoires français en fonction d'un potentiel de tension (et non plus la tension observée) dépendant de facteurs externes, de l'autre. Ce second point est particulièrement intéressant afin d'identifier des territoires potentiellement dans une situation délicate, ou au contraire, ceux qui présentent une tension beaucoup moins forte que ce à quoi on devrait s'attendre selon la classification.

Au vu des retours du terrain, et notamment des ITA, dont nous avons bénéficié, un certain nombre de ces facteurs externes potentiels sont facilement identifiables. Il s'agit de variables relatives à la flore adventice présente, aux caractéristiques du sol, et à celles du climat. De plus, on sait à ce stade que la question des résistances des adventices aux différentes SA est centrale dans l'utilisation du S-métolachlore, puisqu'il n'existe pas à ce jour de résistance à ce dernier. Nous prenons en compte des variables climatiques – issues du modèle SAFRAN de Météo-France (Durand *et al.*, 1993), des caractéristiques physiques et chimiques des sols issues de l'ESDAC (Ballabio *et al.*, 2016 ; Ballabio *et al.*, 2019). En ce qui concerne la flore, il n'existe pas de base de données recensant de manière fine l'infestation des parcelles par des flores spécifiques. Nous avons en revanche eu accès à un recensement des cas de résistance des adventices, pour les plantes présentes dans les cultures concernées par le S-métolachlore, effectué par le réseau R4P d'INRAE. De plus, nous savons que les cultures en production de semences sont très dépendantes au S-métolachlore. Pour cela, nous avons introduit les surfaces en production de semences dans l'analyse, rendues disponibles par département et par culture par la FNAMS. Enfin, les surfaces en AB des cultures concernées par le S-métolachlore sont un indicateur d'intérêt. En effet, la présence de larges surfaces en AB pour une culture donnée, indique de manière générale un environnement favorable à celle-ci. Il est

également probable qu'il existe sur le même territoire des exploitations en conventionnel à fort objectif de rendement ayant un recours élevé à la protection phytosanitaire dont le S-métolachlore, ce qui implique une hausse de la tension.

Reste à définir l'échelle de l'analyse. Idéalement, on souhaite se placer au niveau le plus fin possible, et donc au code postal, qui est le grain initial de l'analyse BNVD/QMC. Toutefois, certaines variables ne sont disponibles qu'à l'échelle départementale, telles que les surfaces en semences et les résistances des adventices.

En conséquence, nous n'avons pas eu d'autre choix que de travailler à l'échelle du département. Ce point est particulièrement important dans la mesure où le nombre de départements, et donc le nombre d'observations pour la modélisation, reste faible (inférieur à 100). En conséquence, il est impossible de mettre en place efficacement les techniques d'apprentissage machine classiques (découpage des données en un jeu d'apprentissage et un jeu de test, validation croisée, optimisation des hyperparamètres...), et les résultats ne sont probablement pas généralisables. Nous décidons tout de même de présenter cette approche, car nous voyons en elle un intérêt majeur, et nous espérons par-là inciter à rendre publiques les données auxquelles nous n'avons pour l'heure pas accès au grain nécessaire. Les différentes étapes de cette analyse sont décrites dans le [Tableau 9](#). Les illustrations sont données à titre d'indication, et ne constituent pas des résultats interprétables en l'absence de données plus détaillées.

On notera seulement que les variables introduites dans la modélisation sont bien retenues à au moins un niveau de la classification mais on se gardera d'interpréter une corrélation en une causalité du fait des nombreux effets confondants possibles avec si peu de points pour assoir l'analyse.

Tableau 9 : Différentes étapes de la modélisation du ratio BNVD/QMC

Etape	Méthode	Illustration																																																																																										
Sélection de variables	Régression linéaire.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>term</th> <th>estimate</th> <th>std.error</th> <th>statistic</th> <th>p.value</th> <th>signif</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>sol_AWC</td><td>12,2272309</td><td>2,77251473</td><td>4,41015904</td><td>3,2668E-05</td><td>****</td></tr> <tr><td>sol_CaCO3</td><td>-0,00112972</td><td>0,00042877</td><td>-2,634788</td><td>0,01015116</td><td>*</td></tr> <tr><td>sol_Sand</td><td>0,02179195</td><td>0,00426373</td><td>5,11101123</td><td>2,2247E-06</td><td>****</td></tr> <tr><td>sol_Silt</td><td>0,02283733</td><td>0,00442616</td><td>5,15962802</td><td>1,8342E-06</td><td>****</td></tr> <tr><td>semence_Mais.Sorgho</td><td>1,6022E-05</td><td>6,1038E-06</td><td>2,62497832</td><td>0,0104233</td><td>*</td></tr> <tr><td>semence_Betterave</td><td>0,00012803</td><td>4,6829E-05</td><td>2,73400931</td><td>0,00773967</td><td>**</td></tr> <tr><td>semence_Fibres</td><td>-4,0355E-05</td><td>1,5362E-05</td><td>-2,62687402</td><td>0,0103702</td><td>*</td></tr> <tr><td>bio_mais_grain</td><td>-7,6986E-05</td><td>3,7046E-05</td><td>-2,07812423</td><td>0,0409871</td><td>*</td></tr> <tr><td>bio_betterave</td><td>-0,00263092</td><td>0,00098146</td><td>-2,68062318</td><td>0,00896307</td><td>**</td></tr> <tr><td>meteo_tinf_h_q</td><td>0,07207242</td><td>0,01262619</td><td>5,70816652</td><td>1,9747E-07</td><td>****</td></tr> <tr><td>meteo_ssi_q</td><td>-0,00049662</td><td>0,00016956</td><td>-2,9288676</td><td>0,00445846</td><td>**</td></tr> <tr><td>meteo_hu_q</td><td>-0,03350247</td><td>0,00494855</td><td>-6,77015256</td><td>2,1494E-09</td><td>****</td></tr> <tr><td>res_ivraie</td><td>0,02935408</td><td>0,00880152</td><td>3,33511655</td><td>0,00130717</td><td>**</td></tr> <tr><td>res_panic</td><td>-0,05207291</td><td>0,01267412</td><td>-4,10860179</td><td>9,7476E-05</td><td>****</td></tr> </tbody> </table>	term	estimate	std.error	statistic	p.value	signif	sol_AWC	12,2272309	2,77251473	4,41015904	3,2668E-05	****	sol_CaCO3	-0,00112972	0,00042877	-2,634788	0,01015116	*	sol_Sand	0,02179195	0,00426373	5,11101123	2,2247E-06	****	sol_Silt	0,02283733	0,00442616	5,15962802	1,8342E-06	****	semence_Mais.Sorgho	1,6022E-05	6,1038E-06	2,62497832	0,0104233	*	semence_Betterave	0,00012803	4,6829E-05	2,73400931	0,00773967	**	semence_Fibres	-4,0355E-05	1,5362E-05	-2,62687402	0,0103702	*	bio_mais_grain	-7,6986E-05	3,7046E-05	-2,07812423	0,0409871	*	bio_betterave	-0,00263092	0,00098146	-2,68062318	0,00896307	**	meteo_tinf_h_q	0,07207242	0,01262619	5,70816652	1,9747E-07	****	meteo_ssi_q	-0,00049662	0,00016956	-2,9288676	0,00445846	**	meteo_hu_q	-0,03350247	0,00494855	-6,77015256	2,1494E-09	****	res_ivraie	0,02935408	0,00880152	3,33511655	0,00130717	**	res_panic	-0,05207291	0,01267412	-4,10860179	9,7476E-05	****
	term	estimate	std.error	statistic	p.value	signif																																																																																						
sol_AWC	12,2272309	2,77251473	4,41015904	3,2668E-05	****																																																																																							
sol_CaCO3	-0,00112972	0,00042877	-2,634788	0,01015116	*																																																																																							
sol_Sand	0,02179195	0,00426373	5,11101123	2,2247E-06	****																																																																																							
sol_Silt	0,02283733	0,00442616	5,15962802	1,8342E-06	****																																																																																							
semence_Mais.Sorgho	1,6022E-05	6,1038E-06	2,62497832	0,0104233	*																																																																																							
semence_Betterave	0,00012803	4,6829E-05	2,73400931	0,00773967	**																																																																																							
semence_Fibres	-4,0355E-05	1,5362E-05	-2,62687402	0,0103702	*																																																																																							
bio_mais_grain	-7,6986E-05	3,7046E-05	-2,07812423	0,0409871	*																																																																																							
bio_betterave	-0,00263092	0,00098146	-2,68062318	0,00896307	**																																																																																							
meteo_tinf_h_q	0,07207242	0,01262619	5,70816652	1,9747E-07	****																																																																																							
meteo_ssi_q	-0,00049662	0,00016956	-2,9288676	0,00445846	**																																																																																							
meteo_hu_q	-0,03350247	0,00494855	-6,77015256	2,1494E-09	****																																																																																							
res_ivraie	0,02935408	0,00880152	3,33511655	0,00130717	**																																																																																							
res_panic	-0,05207291	0,01267412	-4,10860179	9,7476E-05	****																																																																																							
Modélisation du ratio BNVD/QMC	Unique arbre de décision (très grande interprétabilité des règles de décision pour l'étape suivante).																																																																																											
	Optimisation des hyperparamètres par validation croisée.																																																																																											
Construction de situations-types	Utilisation des règles de l'arbre de décision. Cartographie des territoires français selon ces situations.	<p>Ratio BNVD/QMC en fonction de 'situations de production' identifiées par l'arbre de décision</p>																																																																																										

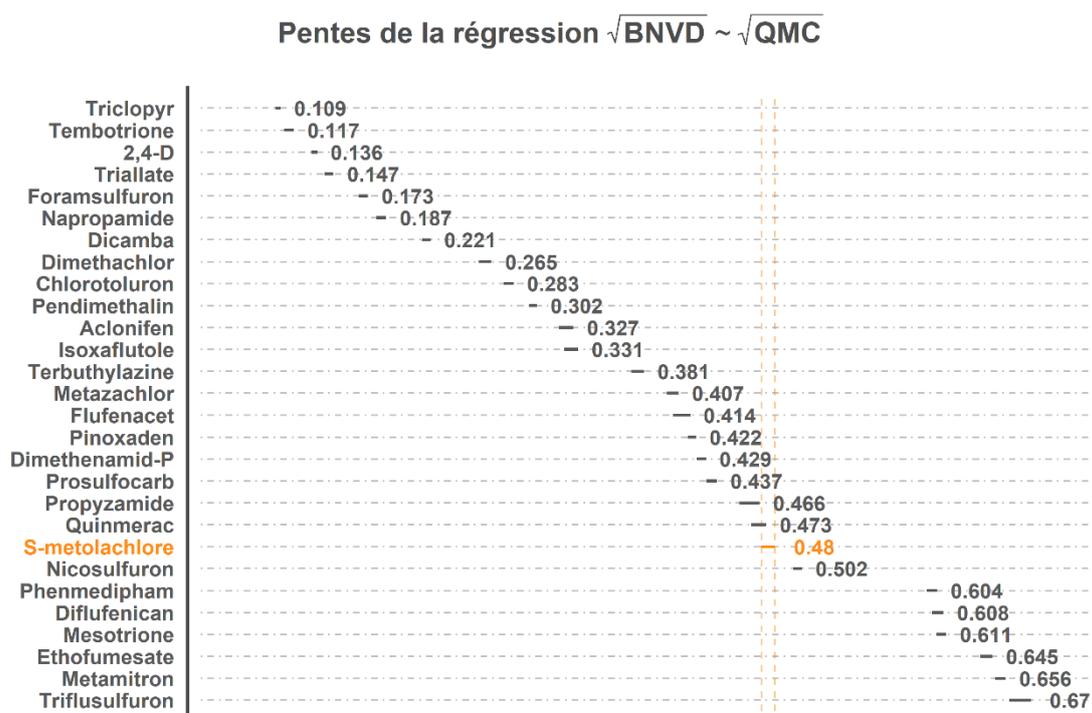
Note : Cette figure est donnée à titre d'indication et ne constitue pas des résultats interprétables en l'absence de données plus détaillées.

3.2. Utilisations du S-métolachlore par rapport à d'autres substances actives

A ce stade, nous avons quantifié le degré de dépendance de l'agriculture française au S-métolachlore, aux échelles globales et locales. Nous avons de plus établi une méthodologie afin d'identifier les facteurs explicatifs de cette dépendance, bien qu'imparfaite en raison du manque de données à disposition. En l'état, nous pensons toutefois que ces résultats manquent de nuance, dans la mesure où nous ne les avons pas mis en perspective des situations d'autres herbicides couramment utilisés en France.

Nous avons ainsi souhaité comparer la situation du S-métolachlore à celle d'autres SA herbicides, en utilisant la méthodologie d'analyse de la QMC présentée en partie 3.1 afin de comparer les pentes α respectives du S-métolachlore à celles d'autres SA. Puisqu'une valeur de α proche de 1 indique une forte tension autour de la SA, et inversement pour une valeur de α proche de 0, une molécule sera considérée d'autant plus incontournable qu'elle présente une pente élevée comparativement à d'autres références. Nous avons ainsi calculé et comparé les valeurs de α pour une trentaine de molécules herbicides. Ces molécules sont soit des herbicides autorisés sur des cultures similaires au S-métolachlore, soit des herbicides parmi les plus achetés en France en 2020.

Figure 12 : Valeurs de α pour différentes SA en 2020

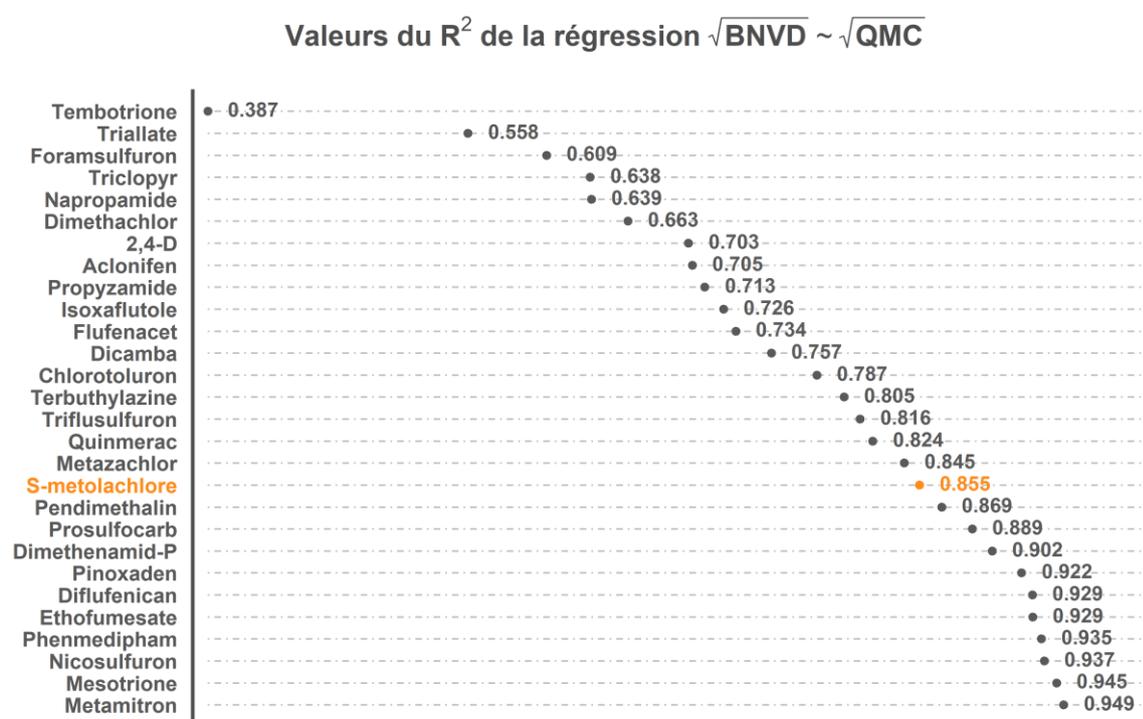


La Figure 12 présente le résultat de ces comparaisons et met en évidence la situation du S-métolachlore. Sur ce graphique, les valeurs de α sont représentées pour chaque SA, avec un

intervalle de confiance à 95%, incarné par les barres horizontales noires de taille variable. On constate que le S-métolachlore fait partie d'un groupe de molécules (avec le nicosulfuron et le quinmérac) ayant des valeurs de α proche et toutes situées dans le troisième quartile de l'ensemble des valeurs de α . On en déduit que l'agriculture française présente un degré de dépendance relativement élevé au S-métolachlore et on retrouve le fait, établi précédemment, que cette dépendance est plus élevée que la moyenne.

Nous avons effectué le même travail de comparaison pour les valeurs des R^2 de chaque SA en 2020, renseignant sur l'homogénéité de la situation sur le territoire français. On y constate également que le S-métolachlore se situe dans le troisième quartile de l'ensemble des valeurs de R^2 , suggérant une assez forte homogénéité territoriale dans les usages du S-métolachlore, légèrement au-dessus de la médiane des SA considérées.

Figure 13 : Valeurs de R^2 pour différentes SA en 2020



On pourra clore cette partie en soulignant l'intérêt que nous voyons à une comparaison étendue entre un nombre élevé de molécules. Cela apporte une évaluation objective et sans a priori du degré de dépendance à une molécule.

4. Qualité de l'eau et scénarios de baisse des doses

4.1. Impacts sur la qualité de l'eau et changement de réglementation

Le S-métolachlore est ainsi un herbicide largement utilisé et particulièrement en tension. En parallèle, nous avons vu en partie 1.2.3 que le S-métolachlore et ses métabolites sont régulièrement détectés dans les eaux de surfaces et dans les eaux souterraines. De surcroît, deux de ses métabolites (ESA métolachlore et NOA métolachlore) sont considérés par l'Anses comme pertinents pour les EDCH, ce qui signifie qu'ils représentent un risque potentiel pour la santé (Anses, 2021b).

La conjonction entre sa forte utilisation, ses caractéristiques physiques (dont la grande solubilité de ses métabolites) et le fait que ces derniers soient pertinents pour les EDCH fait du S-métolachlore l'une des sources principales de non-conformité des EDCH aux limites de qualité (DGS, 2021). Plus précisément, deux valeurs seuils sont distinguées pour la détection des pesticides : la limite de qualité, fixée à 0,1 µg/L pour le S-métolachlore et à 0,5 µg/L pour le total des pesticides, et la « valeur sanitaire maximale » V_{max} , fixée à 510 µg/L pour les métabolites du S-métolachlore (Anses, 2014). A noter que la limite de qualité n'est pas un seuil sanitaire, et que son dépassement n'entraîne pas, en l'état actuel des connaissances, de dangers pour la santé. En revanche, la V_{max} est un seuil sanitaire : la population doit alors être informée de « ne pas utiliser l'eau distribuée pour la boisson et la préparation des aliments, y compris la cuisson (hormis le lavage des aliments) » (DGS, 2021).

La DGS distingue de plus quatre situations de pollution de l'eau par un pesticide :

- C : concentrations inférieures à la LQ en permanence
- NC0 : concentrations supérieures à la LQ durant moins de 30 jours annuels ; inférieures à la V_{max} en permanence
- NC1 : concentrations supérieures à la LQ durant plus de 30 jours annuels ; inférieures à la V_{max} en permanence
- NC2 : au moins un dépassement de la V_{max} , quelle que soit sa durée

Ainsi, selon le bilan annuel de la DGS en 2020 (DGS, 2021), le métabolite ESA du S-métolachlore était à l'origine du classement en situation NC1 ou NC2 de 446 unités de distribution de l'eau (UDI)³⁸, soit plus de la moitié des UDI en France classées dans ces situations. Cette contamination des EDCH concernait alors plus de 1,6 millions de personnes, soit plus de 75% de la population recevant une eau en situation NC1 ou NC2, positionnant le

³⁸ Réseau ou partie de réseau de distribution délivrant une eau de qualité homogène (DGS, 2021)

S-métolachlore très largement comme la première source de pollution des EDCH par un pesticide. Le **Tableau 10**, tiré du bilan annuel de la DGS, résume cela.

Tableau 10 : Pesticides à l'origine de classement en situation NC1 ou NC2 en 2020

Molécules à l'origine du classement en situation NC1 ou NC2 de plus d'une UDI en 2020	En situation NC1 ou NC2 en 2020			
	Nombre d'UDI	Pourcentage des UDI en situation NC1 ou NC2 (*)	Population (en hab.)	Pourcentage de la population en situation NC1 ou NC2 (**)
ESA metolachlore	446	51,5%	1 640 318	75,4%
Atrazine déséthyl	176	20,3%	214 175	9,8%
Atrazine déséthyl déisopropyl	143	16,5%	217 992	10,0%
ESA metazachlore	90	10,4%	179 622	8,3%
OXA metolachlore	60	6,9%	172 229	7,9%
ESA alachlore	32	3,7%	31 828	1,5%
CGA 369873 dimétachlore	23	2,7%	9 290	0,4%
Métolachlore	21	2,4%	75 610	3,5%
Bentazone	21	2,4%	18 624	0,9%
Métolachlor NOA	18	2,1%	126 761	5,8%
Atrazine	15	1,7%	8 443	0,4%

Source : Bilan annuel de la qualité de l'eau au robinet du consommateur vis-à-vis des pesticides de la DGS (DGS, 2021)

En lien avec ce constat, le S-métolachlore a été soumis en novembre 2021 à un changement de réglementation, modifiant les doses maximales utilisables pour certaines cultures. Ainsi, les cultures de maïs (hors maïs doux), de sorgho, de soja et de tournesol ne peuvent recevoir plus d'un kilogramme de substance active par hectare et par an. Le **Tableau 11** résume les effets du changement de réglementation sur les quantités maximales de S-métolachlore utilisables sur les cultures sur lesquelles ce dernier est autorisé. La réduction des doses s'accompagne de restrictions sur l'application des produits en période d'écoulement des drains, ou aux abords des points d'eau.

Tableau 11 : Effet de la réglementation de novembre 2021 sur les quantités maximales de S-métolachlore

Culture	Ancienne réglementation (g/ha)	Nouvelle réglementation (g/ha)	Baisse (g/ha)	Baisse (%)
Maïs doux	1921,5	1921,5	0	0
Maïs	1921,5	1000	921,5	47,96
Betterave industrielle et fourragère	576	576	0	0
Canne à sucre	1920	1920	0	0
Soja	1344	1000	344	25,6
Sorgho	1344	1000	344	25,6
Tournesol	1344	1000	344	25,6
Porte graine	1344	1344	0	0
Haricots et pois non écosés frais	1344	1344	0	0
Ananas	1920	1920	0	0
Haricots et Pois écosés frais	1344	1344	0	0
Haricots écosés frais	1344	1344	0	0

Source : propre élaboration à partir du catalogue E-Phy fourni par l'Anses en octobre 2021

4.2. Scénarios de baisse des doses : quelles options pour la réglementation ?

Nous avons utilisé les données de la BNVD ainsi que la définition de la QMC afin de réaliser des projections des tonnages de S-métolachlore achetés en fonction de différents scénarios réglementaires. L'objectif est d'évaluer à quel point un changement de réglementation sur le S-métolachlore devrait avoir un effet sur la baisse des tonnages effectivement employés. Pour chacun des scénarios étudiés, nous avons effectué trois projections de baisse des tonnages employés différentes : des bornes inférieure et supérieure, ainsi qu'une projection intermédiaire.

4.2.1. Scénarios étudiés

Borne supérieure :

Cette projection correspond à une situation dans laquelle une baisse de la quantité maximale autorisée entraînerait une baisse des quantités achetées du même ordre de grandeur. Dans cette projection, tous les agriculteurs, y compris ceux étant déjà en dessous de la nouvelle quantité maximale autorisée, réduisent leur usage dans les mêmes proportions que la réglementation. Concrètement, cela revient à dire que le ratio BNVD/QMC de chaque code postal reste le même après le changement de réglementation. Ainsi, un changement de

réglementation entraîne une baisse de la QMC, et on calcule la borne supérieure (B_{sup}) des tonnages achetés comme :

$$B_{sup} = QMC_{new} \cdot R_{old},$$

où QMC_{new} représente la QMC post-changement de réglementation, et R_{old} correspond au ratio BNVD/QMC pré-changement de réglementation.

Borne inférieure :

Dans cette projection, seuls les agriculteurs se retrouvant au-dessus de la nouvelle réglementation changent leurs pratiques, et réduisent leur utilisation de S-métolachlore au minimum afin de respecter cette réglementation. Formellement, pour chaque code postal, on calcule la borne inférieure (B_{inf}) comme :

$$B_{inf} = \begin{cases} BNVD_{old} & (si\ BNVD_{old} < QMC_{new}) \\ QMC_{new} & (si\ BNVD_{old} > QMC_{new}) \end{cases},$$

où QMC_{new} représente la QMC post-changement de réglementation, et $BNVD_{old}$ correspond aux volumes achetés pré-changement de réglementation.

Projection intermédiaire :

Enfin, dans cette dernière projection, on considère encore une fois que seuls les agriculteurs se retrouvant au-dessus de la nouvelle réglementation réduisent leur utilisation de S-métolachlore. En revanche, on considère qu'ils vont s'aligner sur les pratiques de ceux qui sont déjà en dessous (et donc potentiellement faire plus que le strict minimum). Formellement, on réalise cela en redistribuant les codes postaux au-dessus de la nouvelle réglementation en-dessous, selon la distribution de probabilité de ceux qui y sont déjà. Le calcul de la projection intermédiaire (P_I) donne :

$$P_I = \begin{cases} BNVD_{old} & (si\ BNVD_{old} < QMC_{new}) \\ S & (si\ BNVD_{old} > QMC_{new}) \end{cases},$$

où QMC_{new} représente la QMC post-changement de réglementation, $BNVD_{old}$ correspond aux volumes achetés pré-changement de réglementation, et S est le résultat d'un tirage aléatoire sur les valeurs de la BNVD située entre le minimum (0) et la nouvelle valeur réglementaire maximale (QMC_{new} ; différente pour chaque code postal). Les probabilités associées au tirage aléatoire sont issues de la densité de la BNVD sur cet intervalle $[0; QMC_{new}]$.

4.2.2. Résultats

Nous avons donc effectué les projections décrites dans le cas de scénarios de changement de réglementation. Nous avons envisagé deux scénarios différents.

Changement de réglementation de novembre 2021 :

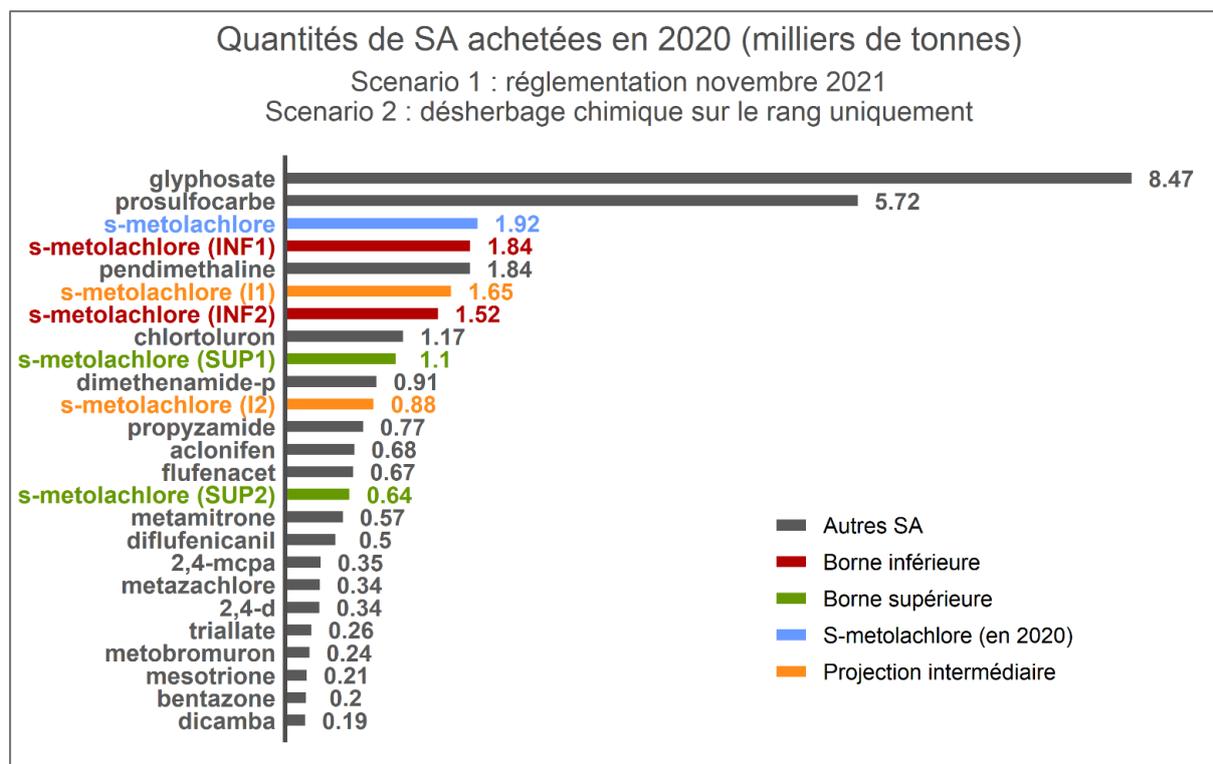
Ce scénario n'en est en réalité pas un, puisqu'il décrit un changement de réglementation ayant déjà été acté. En novembre 2021, de nouvelles conditions d'emploi ont été fixées par l'Anses, limitant la dose maximale de S-métolachlore sur certaines grandes cultures à 1kg par hectare et par an. Les effets de cette nouvelle réglementation sur les quantités maximales sont détaillés dans le [Tableau 11](#). Il reste toutefois intéressant d'effectuer les projections car, le changement étant récent, les données de la BNVD ne couvrent pas encore la période post-changement. Les données de la BNVD les plus récentes dont nous disposons sont celles relatives à l'année 2020.

Autorisation du S-métolachlore sur le rang uniquement :

Nous avons ensuite émis l'hypothèse d'une autorisation du S-métolachlore sur le rang uniquement, avec un désherbage alternatif (chimique ou non) sur l'inter-rang. Pour une culture de plante sarclée, comme le maïs ou le tournesol, le rang occupe près d'un tiers de la parcelle. Dans ce cas, cette nouvelle réglementation correspondrait donc à une baisse des deux tiers de la quantité maximale autorisée. Par souci de simplification, nous avons appliqué cette baisse à toutes les cultures concernées par le S-métolachlore. Ça et là, nous avons trouvé des valeurs un peu différentes sur la part de surface que représente le rang. Certains retiennent une diminution de moitié de la surface en plein et notre généralisation est alors un peu optimiste ou bien elle intègre déjà des marges d'amélioration. Nous avons appliqué cette baisse à la réglementation pré-2021, puisque l'année la plus récente enregistrée pour le RPG est 2020.

Nous avons donc calculé les bornes supérieure (SUP), inférieure (INF) et la projection intermédiaire (I) pour les deux scénarios présentés, ce qui nous permet d'obtenir la quantité de S-métolachlore achetée selon chacune des six combinaisons de scénarios et projections. Nous avons ensuite replacé les quantités achetées respectives projetées dans le classement des substances herbicides les plus achetées de 2020. Les résultats sont synthétisés dans la [Figure 14](#), au sein de laquelle le scénario 1 correspond à la réglementation de fin 2021, et le scénario 2 au scénario d'un usage sur le rang seulement. Ainsi, le résultat SUP1, en vert, correspond à la borne supérieure pour la réglementation de 2021, et le scénario I2 correspond à la projection intermédiaire d'une autorisation sur le rang uniquement.

Figure 14 : Résultats des projections d'achats de S-métolachlore en fonction de différents scénarios d'évolution



Note : INF correspond à la baisse minimale des tonnages estimée selon le scénario concerné, et inversement pour SUP.

On constate que, dans trois de nos six combinaisons, le S-métolachlore reste dans le top 4 des herbicides les plus achetés, avec plus de 1 500 tonnes achetées. La borne inférieure pour la réglementation de novembre 2021 (INF1) montre même une baisse de tonnage très faible. Pour ce scénario, la borne supérieure ne fait descendre le S-métolachlore qu'à la cinquième place des herbicides les plus achetés, avec toujours plus de 1 000 tonnes achetées. La raison à cela est que l'utilisation moyenne du S-métolachlore était déjà bien en deçà du maximum réglementaire, avant le changement de 2021. Par exemple, pour le maïs grain, la limite était de 1921,5g/ha, mais la moyenne d'utilisation courante était plus proche des 1200g/ha, en 2017, selon l'enquête Pratiques Culturelles en grandes cultures de la même année. Le changement de réglementation ne concerne donc pas immédiatement la majorité des agriculteurs. Dit autrement, l'évolution réglementaire de 2021 entérine une situation déjà assez couramment pratiquée, bien qu'elle soit contraignante pour des producteurs qui utilisaient de fortes doses en raison de leur flore.

Ainsi, ces résultats suggèrent que seule une règle très restrictive vis-à-vis des doses maximales de S-métolachlore serait susceptible d'entraîner une baisse significative des achats. En revanche, il est essentiel de ne pas seulement envisager une baisse linéaire des quantités maximales autorisées, puisque celle-ci n'aurait que peu de sens : en-dessous d'une certaine dose, l'application d'une substance active ne permet plus d'atteindre les effets de désherbage

recherchés. Il est donc essentiel, dans l’hypothèse d’une réglementation restrictive sur le S-métolachlore, de répartir cette baisse, soit spatialement, soit temporellement.

L’exemple de notre deuxième scénario illustre la répartition spatiale : il ne s’agit pas de baisser linéairement les doses maximales de deux tiers, mais d’autoriser la SA sur le rang uniquement, soit un tiers des surfaces, à pleine dose, afin de maintenir son efficacité. De la même manière, il est possible d’envisager une autorisation de la SA pour un traitement en plein et à pleine dose, mais une campagne sur trois uniquement (par exemple), et une interdiction totale d’usage le reste du temps. Nous n’avons pas étudié les impacts techniques et économiques d’une telle réglementation dans le cas du S-métolachlore.

4.3. Desserrer la dépendance de l’agriculture au S-métolachlore

Si l’agriculteur reste le maître des décisions dans la conduite de son exploitation et le choix de ses pratiques tout en respectant le cadre réglementaire, il n’est pas le seul concerné lorsqu’il s’agit de réduire la dépendance à une molécule donnée.

Dans le tableau qui suit, nous proposons une synthèse de tous ces éléments qui vont à un moment ou un autre entrer en ligne de compte pour diminuer le recours au S-métolachlore. Il vient souligner une responsabilité partagée entre différents types d’acteurs. Le tableau tente de donner un pas de temps pour opérer le changement ciblé.

Tableau 12 : Synthèse des actions contribuant à réduire le recours au S-métolachlore

Qui	Action	Type d'action	Pas de temps
Semenciers	Proposition de couverts végétaux destinés à un usage en inter-rang	Nouveau levier	Court à moyen
	Rehausser le degré de tolérance des lignées parentales à certaines familles chimiques pour élargir la palette des programmes herbicides	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à moyen
R&D	Travaux sur la conduite en strip-till, le test de paillages à valeur d'amendement, les nouveaux matériaux de couverture des sols, le travail différencié du rang et de l'inter-rang	Nouvelles conduites et amélioration de l'existant	Court à long
Agroéquipementiers	Innovation différenciant la gestion du rang et de l'inter-rang du type Roll n'sem, broyage des inter-rangs	Nouvelle conduite	Moyen à long

	Robotique de désherbage (localisé)	Nouveau levier	Moyen
ETAs et CUMAs	Offre de service ou équipement de pulvérisation sur le rang	Nouvelle conduite	Court
Agence de l'eau	Contractualisation étendue avec les agriculteurs sur une réduction significative des doses appliquées en échange d'une prise en charge des traitements localisés sur le seul rang en plus des mesures préventives	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à moyen
Pouvoir public en région	Transparence du contenu des cahiers des charges applicables sur leurs territoires et inscription dans les projets alimentaires territoriaux	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
	Inscription de l'origine locale dans les projets alimentaires territoriaux propice à la diversification des assolements	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
	Aide à l'achat d'équipements permettant la préservation des ressources	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
Europe	Synthèse sur l'ensemble des Etats Membres des distances à respecter en bordure de l'eau puis harmonisation éventuelle ou justification du maintien d'une différence, inscription dans la PAC de mesures soutenant la moindre dépendance aux herbicides	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
Collecte	Offre d'une collecte diversifiée facilitant la diversité des rotations	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
Etat	Poursuite de la promotion de l'AB	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à moyen
	Instruction ou ré-instruction d'une MAE « système sans herbicide »	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à long

	Instruction d'un passage à la classe de RPD directement supérieure pour les molécules donnant lieu à pollution récurrente	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
	Sollicitation explicite de la R&D pour des travaux sur la mise au point de systèmes sans herbicide ni travail du sol	Nouveau levier	Moyen
	Evaluation (territorialisée) des surcoûts du maintien de la potabilité de l'eau liée aux pesticides ou externalités de l'agriculture	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
Chambres d'agriculture	Amplification des travaux sur des conduites sans herbicide	Nouvelle conduite / amélioration de l'existant	Court à moyen
Phytopharmacie	Synthèse du statut d'autorisation de mise en marché et modalité(s) des usages d'un produit commercial à travers les différents pays du monde	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
Consommateur	Choix alimentaires	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à long
Entreprises de transformation	Inscription des pratiques vertueuses des adhérents dans leur RSE	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
Actionnaire des entreprises d'amont et d'aval	Transparence et pertinence du contenu du RSE des entreprises (semence, agroéquipement, alimentation animale, transformation, approvisionnement...)	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court à moyen

5. L'utilisation du S-métolachlore au Luxembourg et en France

5.1. Cas du Luxembourg

L'utilisation de S-métolachlore est interdite au Luxembourg depuis 2015. Bien que les agricultures française et Luxembourgeoise aient leurs propres spécificités et des contextes économiques différents, nous avons souhaité étudier cette situation, assez unique en Europe, afin de profiter du retour d'expérience de cet Etat Membre. Des contacts ont pu être pris et des échanges organisés avec des représentants du Luxembourg³⁹. Les éléments présentés dans ce sous-chapitre sont basés sur ces discussions et sur les documents qui nous ont été conseillés à ces occasions, ainsi que sur quelques éléments disponibles en ligne. Les sources sont explicitées dès que possible ; certains éléments ne font pas référence à une source précise quand ils proviennent d'échanges avec nos contacts des ministères luxembourgeois.

5.1.1. Contexte

Le Luxembourg a fait face à une contamination du principal lac de barrage de la Haute-Sûre lors d'un déversement accidentel de produits phytopharmaceutiques le 17 septembre 2014⁴⁰. Près de la moitié de l'eau potable du Luxembourg provient de ce lac qui alimente environ 70% de la population du pays⁴¹. Cet évènement a accéléré la réalisation d'un certain nombre de campagnes d'analyses courant octobre 2014 afin de mesurer la teneur en certains pesticides et leurs métabolites dans les eaux souterraines et les eaux destinées à la consommation humaine fournies par les réseaux publics de distribution⁴². Le métolachlore et le métolachlore-ESA font partie des 16 molécules analysées. Les résultats des analyses des eaux souterraines sont présentés **Figure 15**. Le métolachlore-ESA est alors la deuxième molécule la plus détectée derrière le métazachlore-ESA et sa concentration dépasse dans environ 18% des cas la valeur seuil de 0,1 µg/L fixée par la directive européenne 98/83/CE (Administration de la gestion de l'eau du Luxembourg, 2014).

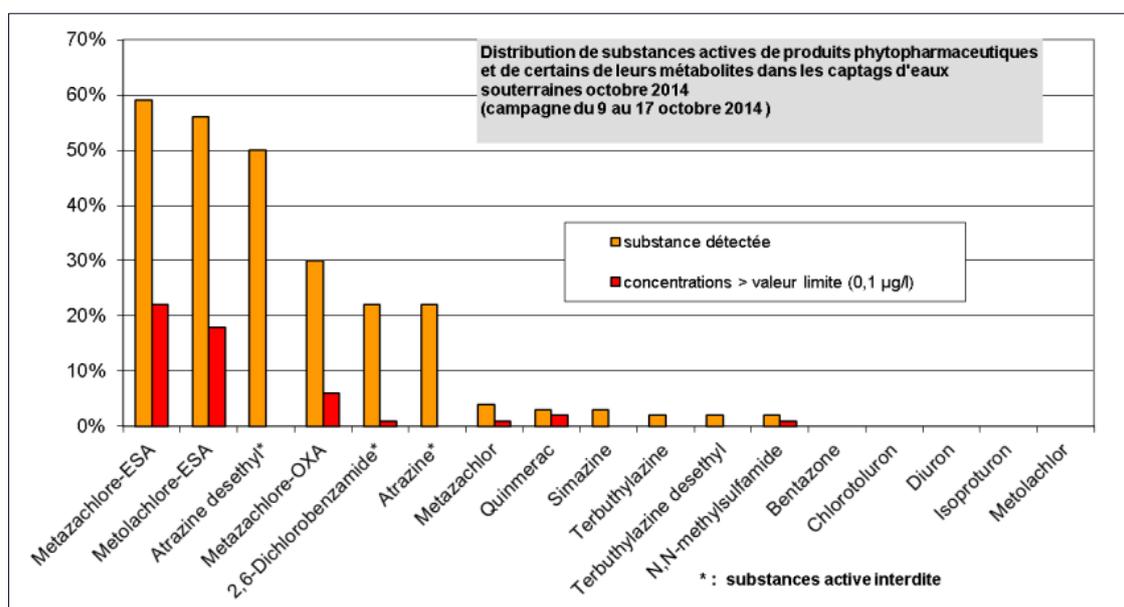
³⁹ Julien Farlin travaille au ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable du Luxembourg, et Jacques Engel travaille au Service de la protection des végétaux de l'Administration des services Techniques de l'Agriculture

⁴⁰ https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiqués/2014/09-septembre/26-pollution-stausei.html

⁴¹ https://environnement.public.lu/fr/actualites/2019/07/zones_de_protection_lac_haute_sure.html

⁴² https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiqués/2014/11-novembre/04-pesticides.html

Figure 15 : Résultat de la campagne d'analyses des eaux souterraines du 9 au 17 octobre 2014 au Luxembourg



Source : Administration de la gestion de l'eau du Luxembourg, 2014.

Ces analyses ont montré l'étendue de l'atteinte à la qualité des eaux du fait des résidus de pesticides et ceci bien avant et bien au-delà de l'accident ponctuel.

5.1.2. Mesures prises face à la contamination des eaux

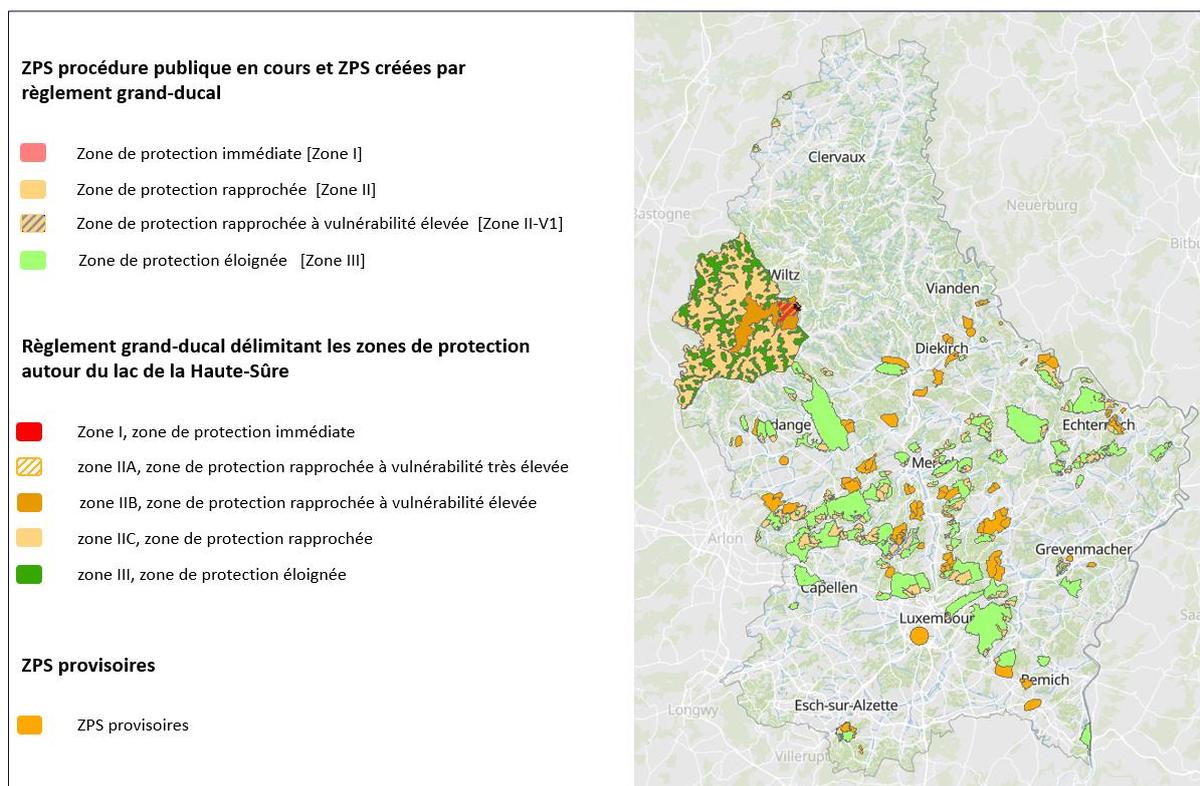
Différentes mesures ont été prises suite aux résultats obtenus telles que la mise hors service de captages dans 9 communes, le mélange de différentes ressources en eau dans 3 communes, et des dérogations autorisant de manière temporaire un dépassement de la limite de 0,1 µg/L pour une quarantaine de communes (*a minima* une partie de leur réseau de distribution d'eau potable). De telles dérogations ne sont autorisées « *que si le fournisseur n'a pas d'autre alternative raisonnable pour approvisionner la population en eau potable* »⁴³. Elles ne peuvent excéder 3 ans, la Commission européenne doit en être informée et un plan d'action comprenant des mesures techniques visant à remédier à ce dépassement doit lui être communiqué. Ces différentes mesures sont d'ailleurs également mobilisées en France lors d'épisodes de contamination des eaux destinées à la consommation humaine ; certaines sont d'ailleurs évoquées dans la presse grand public (voir Annexe 3).

Si les mesures citées précédemment ont permis de réagir à court terme, le Luxembourg a également réagi en mettant en place des actions s'inscrivant dans la durée. Pour ce faire, le Luxembourg a mis en place une « task force » interministérielle afin « *d'élaborer un "plan d'action national pesticides" ambitieux et de veiller à des mesures strictes de prévention dans*

⁴³ https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiqués/2014/11-novembre/04-pesticides.html

les zones de protection de l'eau »⁴⁴. La mise en place de ces premières zones remonte à fin 2014. En février 2022, 240 captages sont protégés par de telles zones de protection⁴⁵, des procédures sont en cours pour 50 autres captages, et 50 captages supplémentaires sont également à l'étude. Aujourd'hui, ces zones représentent 10% de la surface du Luxembourg. Elles sont localisables sur le Géoportail du Luxembourg⁴⁶. Une copie est présentée ci-dessous en **Figure 16**.

Figure 16 : Cartographie des zones de protection de l'eau du Luxembourg début 2022



Source : Géoportail du Luxembourg, Gouvernement du Grand-Duché du Luxembourg.

Ces zones sont définies autour des captages d'eau potable afin de limiter les pollutions d'origines biologiques ou chimiques tels que « les produits de dégradation de pesticides, d'herbicides, et d'autres substances utilisées sur les terres arables »⁴⁷. Quatre types de zones existent ; elles sont représentées **Figure 17** (photo mise en ligne sur le site internet du gouvernement du Luxembourg⁴⁸).

⁴⁴ https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiqués/2014/11-novembre/04-pesticides.html

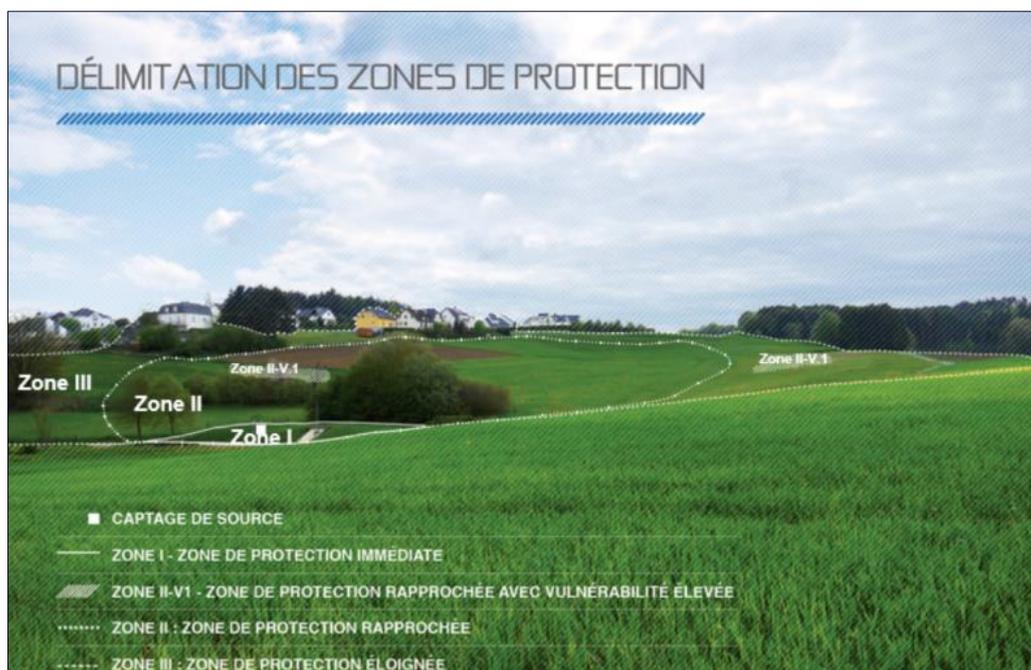
⁴⁵ https://eau.gouvernement.lu/fr/ressources-en-eau/eaux-souterraines/zone_protection.html

⁴⁶ https://map.geoportail.lu/theme/agriculture?layers=214-664-1464-573-559&zoom=9&lang=fr&version=3&X=534029&Y=6420738&opacities=1-1-1-1-0.75&bgLayer=basemap_2015_global&rotation=0&crosshair=false

⁴⁷ https://eau.gouvernement.lu/fr/ressources-en-eau/eaux-souterraines/zone_protection.html

⁴⁸ https://eau.gouvernement.lu/fr/ressources-en-eau/eaux-souterraines/zone_protection.html

Figure 17 : Différentes zones de protection d'un captage d'eau potable au Luxembourg



Source : site du gouvernement du Luxembourg, Administration de la gestion de l'eau

En Zone I (zone de protection immédiate), seuls l'exploitation et l'entretien du captage sont autorisés. La Zone II (zone de protection rapprochée) a pour rôle de protéger le captage des polluants microbiologiques ; dans cette zone, le temps de transfert des eaux souterraines et de toute substance dans l'aquifère ne dépasse pas 50 jours. La Zone II-V1 (zone de protection rapprochée à vulnérabilité élevée) existe à l'endroit où sont identifiées des zones d'infiltrations préférentielles et rapides des eaux de surface dans les eaux souterraines du captage. La Zone III (zone de protection éloignée) correspond au reste de l'aire d'alimentation du captage.

L'utilisation de certaines substances actives est limitée voire interdite dans une partie de ces zones. Par exemple, en 2015, en parallèle de l'interdiction immédiate et définitive du S-métolachlore sur tout le territoire du Luxembourg, l'utilisation du Métazachlore est interdite dans ces mêmes zones de protection et limitée à 0,75 kg/ha tous les quatre ans sur une même surface hors de ces zones⁴⁹.

Un zonage similaire a été établi autour du captage d'eau de surface du lac de la Haute-Sûre (voir [Figure 16](#) ci-dessus). Il est établi dans règlement grand-ducal du 16 avril 2021⁵⁰ dont l'article 24 encadre l'utilisation des pesticides selon les différentes zones de protection. L'utilisation de pesticides est interdite en zone I. Seul un certain nombre de produits phytosanitaires prédéfinis sont autorisés sur les autres zones de protection.

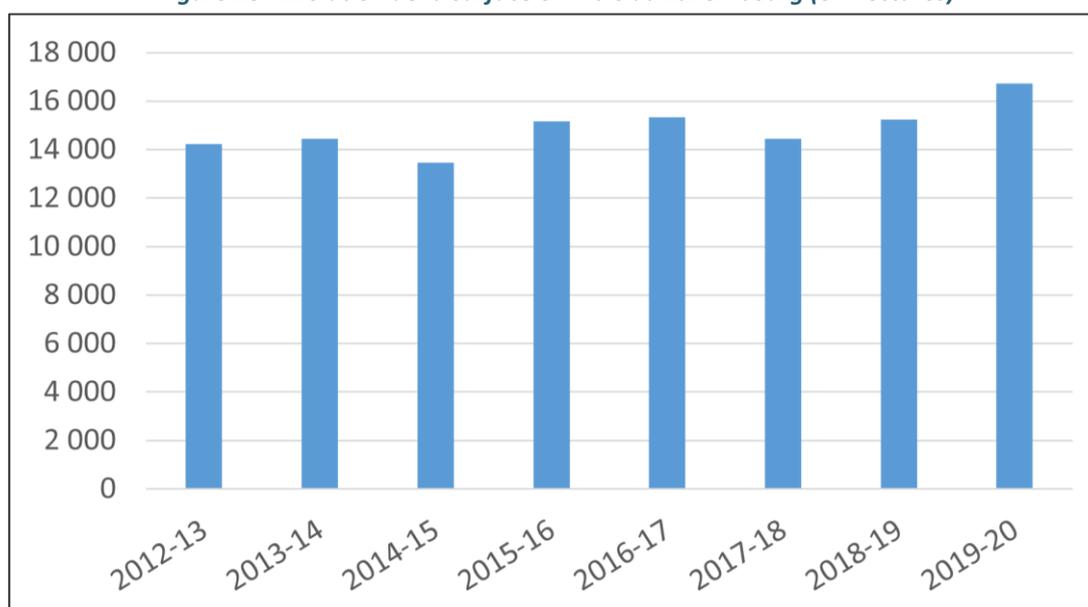
⁴⁹ https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/articles/2015/02-fevrier/12-qualite-eau.html

⁵⁰ <https://legilux.public.lu/eli/etat/leg/rgd/2021/04/16/a316/jo>

5.1.3. Évolution de la situation après 2015 : désherbage mécanique et report sur d'autres substances actives

Parmi les usages autorisés en France pour le S-métolachlore, c'est principalement la culture de maïs⁵¹ qui était concernée par l'utilisation de cette molécule au Luxembourg. Ce paragraphe est donc principalement consacré à cette culture. La culture de tournesol est également concernée, mais dans une moindre mesure : elle y est très peu cultivée, bien que la tendance soit à l'augmentation. Des suivis annuels des surfaces cultivées (ici, en maïs) et des molécules utilisées sont réalisés par le réseau d'information comptable agricole du SER⁵² du Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural du Luxembourg. Un certain nombre de grandes tendances se dégagent depuis 2015. Tout d'abord, les agriculteurs maintiennent la culture de maïs à environ 15 000 hectares (voir [Figure 18](#) ci-dessous) même après l'interdiction du S-métolachlore.

Figure 18 : Evolution de la surface en maïs au Luxembourg (en hectares)



Source : réseau d'information comptable agricole du service de comptabilité du Service d'économie rurale du ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural du Luxembourg

De plus, il n'y a pas eu de conversion marquée en Agriculture Biologique, celle-ci variant entre 3,23% en 2015 et 4,42% en 2019 et plafonnant à environ 5% (toutes cultures confondues) (Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural, 2021).

Par ailleurs, la Chambre d'agriculture du Luxembourg a encouragé et accompagné les agriculteurs luxembourgeois afin qu'ils aient plus systématiquement recours au désherbage

⁵¹ Cultivée au Luxembourg à destination de l'alimentation animale

⁵² Service d'économie rurale

mécanique, que celui-ci soit couplé ou non à du désherbage localisé (*i.e.* sur le rang). Les agriculteurs peuvent bénéficier de facilités à travers une prise en charge des coûts et un système d'assurance. Ces équipements de précision ont principalement été achetés par les producteurs d'eau (syndicats de communes par exemple) et, de manière minoritaire, par des prestataires de service. Ces aides sont prioritairement destinées aux utilisations en zones de protection de l'eau. Dans le cas du recours à un prestataire de service, l'agriculteur a deux possibilités : i) soit il ne paie que le produit phytosanitaire et le producteur d'eau couvre les autres frais (ceux de la prestation de service) et propose une compensation en cas de perte de récolte ou diminution du rendement (dépend du producteur d'eau), ii) soit l'agriculteur contractualise l'option 3 du programme agroenvironnemental et reçoit 175€/ha (Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural, Service d'économie rural, 2014-2020), mais sans compensation en cas de perte de récolte ou diminution des rendements. Ces mesures sont aujourd'hui toujours en place ; néanmoins, il reste difficile de connaître leur niveau d'adoption et le montant de l'enveloppe financière totale ou annuelle dédiée.

Enfin, la conduite de la culture du maïs s'est reportée sur d'autres molécules herbicides. Le **Tableau 13** ci-dessous souligne ces changements opérés au Luxembourg suite à l'interdiction du S-métolachlore en 2015. Les cases en orange mettent en avant des substances actives dont l'utilisation a drastiquement chuté en 2015 ; les cases en vert mettent en avant des substances actives dont l'utilisation a fortement augmenté à partir de 2015.

Tableau 13 : Utilisation d'herbicides sur le maïs au Luxembourg (en kg de substances actives)

Année	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Surface maïs (ha)	14 228	14 445	13 467	15 165	15 325	14 452	15 248	16 730
Substances actives (kg)	15 095	16 040	15 745	17 510	16 015	14 925	15 980	16 795
"Big movers" (kg de SA*)	7 005	8 150	6 430	7 640	6 525	5 590	6 185	5 760
Herbicides défanants et agents antimousse (kg)	15 065	16 040	15 665	17 435	16 005	14 910	15 950	16 780
2,4-DB	0	0	0	40	0	0	0	0
MCPB	0	0	0	0	0	0	0	95
TERBUTHYLAZINE	4 700	4 795	5 165	5 030	4 850	4 975	5 055	5 575
DIMETHENAMID-P	540	515	1 785	2 325	2 295	2 165	2 395	2 300
PETHOXAMIDE	300	575	630	850	670	770	850	1 070
x FLUFENACET	700	945	1 620	1 470	1 285	1 490	1 555	1 880
x S-METOLACHLOR	2 015	2 210	85	65	50	40	35	40
x PENDIMETHALIN	360	255	765	770	755	460	725	895
FORAMSULFURON	75	50	70	155	155	145	185	205
x NICOSULFURON	260	205	120	185	140	115	105	165
TRITOSULFURON	20	0	50	10	15	30	15	20
DICAMBA	105	70	175	50	75	135	75	90
PYRIDATE	0		0	0	90	0	0	0
x ACLONIFEN	0	0	0	25	0	10	0	0
ISOXAFLUTOLE	20	15	15	15	15	15	60	60
BROMOXYNIL	100	115	165	135	60	40	40	105
x GLYPHOSATE	3 580	4 520	3 185	4 385	3 715	2 950	3 320	2 735
CLOPYRALID	5	5	0	0	0	0	0	0
FLUROXYPYR	245	250	290	275	295	175	185	250
TRICLOPYR	0	0	0	0	0	5	0	15
BENTAZONE	965	425	60	10	20	20	0	70
THIENCARBAZONE		5	5	35	40	45	75	85
MESOTRIONE	865	890	685	745	770	725	775	1 005
x SULCOTRIONE	90	15	645	730	575	510	425	30
TEBOTRIONE	120	115	150	130	130	90	75	90

Source : réseau d'information comptable agricole du service de comptabilité du Service d'économie rural du Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural du Luxembourg

Note : « SA » pour substance active

Avec le changement de réglementation en 2015, l'utilisation du S-métolachlore a chuté de plus de 2000 kg⁵³. L'utilisation de bentazone chute aussi drastiquement selon le même calendrier

⁵³ Les années suivant 2015 n'affichent pas des quantités tout à fait nulles : il pourrait s'agir soit d'erreur de saisie, soit cela est lié au fait que bien que l'utilisation de S-métolachlore est interdite au Luxembourg, sa mise sur le marché et son stockage sont autorisés après déclaration (par exemple par des agriculteurs qui auraient des terres à l'extérieur des frontières luxembourgeoises)

que le S-métolachlore. Cette molécule fait partie de la liste des herbicides interdits dans les zones de protection de l'eau autour du lac de la Haute-Sûre comme indiqué dans l'article 24 du Règlement grand-ducal du 16 avril 2021⁵⁴, mais également dans les autres zones de protection de l'eau du Luxembourg (interdiction antérieure) comme précisé dans l'annexe II du Règlement grand-ducal du 9 juillet 2013 (Journal Officiel du Grand-Duché de Luxembourg, 2013). Par ailleurs, les cultures de céréales ont été supprimées des AMM contenant de la bentazone dans l'Etat membre de référence (Belgique) ; ceci a donc aussi contribué à la réduction de l'utilisation de la molécule au Luxembourg.

En parallèle de ces diminutions, le Luxembourg connaît une utilisation croissante d'un certain nombre de substances actives :

- Une multiplication par 4 du recours au diméthénamide-P qui passe de 500 kg environ de substance active à des quantités excédant 2100 kg cinq années sur six ;
- Une multiplication par 3 du recours à la pendiméthaline pour quatre années sur six ;
- Un recours plus important au thiencarbazon-méthyl (de 5 kg avant interdiction du S-métolachlore à 85 kg en 2019-20) ;
- Un recours plus important à la sulcotrione (de moins de 100 kg à plus de 500 kg quatre années sur six) ;
- Une augmentation d'environ 50% de l'utilisation du flufenacet entre les campagnes 2013-14 et 2019-20 (à noter que cet herbicide a été interdit sur maïs en France depuis le 31 janvier 2022)⁵⁵ ;
- Une augmentation substantielle du foramsulfuron qui double d'une valeur initiale autour de 75 kg (il s'agit d'une molécule qui s'utilise à faible grammage à l'hectare) à 150 kg dès la campagne 2015-16.

On n'observe pas d'évolution tendancielle nette concernant les volumes globaux d'herbicides utilisés avant et après 2015.

5.1.4. Evolution des préconisations pour les programmes de désherbage

Les variations décrites précédemment pour les molécules herbicides du maïs dont l'utilisation change autour de 2015 peuvent s'expliquer notamment par l'évolution des programmes de désherbage ces dernières années, suite à l'interdiction du S-métolachlore. Des documents^{56,57} édités annuellement synthétisent les éléments de réglementation sur l'autorisation (ou non) des substances actives selon les zones, les doses maximales utilisables, le nombre maximal d'applications par an, le délai à respecter avant une nouvelle utilisation (souvent deux ans, parfois jusqu'à cinq ans), le précédent cultural. Dans le cas de la culture du maïs, les

⁵⁴ <https://legilux.public.lu/eli/etat/leg/rgd/2021/04/16/a316/jo>

⁵⁵ Selon les données E-Phy disponibles : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-ouvertes-du-catalogue-e-phy-des-produits-phytopharmaceutiques-matieres-fertilisantes-et-supports-de-culture-adjuvants-produits-mixtes-et-melanges/>

⁵⁶ <https://www.lwk.lu/newsblog/artikel/2021/06/pflanzenschutzstrategie-herbizide-mais-2021>

⁵⁷ <https://www.lwk.lu/newsblog/artikel/2022/05/unkraut-ungrasbekämpfung-im-nachauflauf-beim-mais-2022>

préconisations de programmes de désherbage types combinent soit i) un traitement de prélevée du maïs à des rattrapages de post-levée du maïs, soit ii) une combinaison de traitements de post-levée du maïs, et tout particulièrement les années de printemps sec. Dans les consignes, les conditions d'humidité minimale du sol à respecter pour avoir des traitements efficaces en prélevée sont en effet rappelées. Par ailleurs, les solutions décrites sont modulées par le type de flore présente ou attendue dans les parcelles concernées.

Nous détaillons ci-dessous quelques exemples de matières actives et mélanges préconisés dans les programmes de désherbage du maïs au Luxembourg. La préoccupation principale qui sous-tend ces préconisations reste le respect de la qualité de l'eau, ainsi elles tiennent compte des restrictions imposées par les zonages de protection de l'eau.

En prenant 2021 comme situation illustrative, les mélanges préconisés en prélevée sur maïs impliquent les matières actives suivantes : pendiméthaline, péthoxamide, thiencazone-méthyl et diméthénamide-p. Ces molécules font partie des substances dont l'utilisation augmente depuis l'interdiction du S-métolachlore (voir [Tableau 13](#)). La terbuthylazine et l'isoxaflutole sont également utilisables en prélevée au Luxembourg⁵⁸, bien que la quantité de terbuthylazine reste stable aux alentours de 5000 kg/an ces dernières années, et l'isoxaflutole est utilisé en petite quantité en comparaison aux autres molécules du [Tableau 13](#) (avec tout de même une multiplication par 4 des quantités utilisées entre 2017 et 2018). Les préconisations pour un désherbage en post levée et en tenant compte des flores plus ou moins difficiles ciblent les substances actives suivantes : florasulame et thiencazone-méthyl, diméthénamide-P.

On peut constater que ces préconisations pour une campagne particulière ne reprennent pas l'ensemble des solutions chimiques autorisées. D'autres années et contextes pourront, par exemple, avoir repris l'usage de la mésotrione ou de la tembotrione.

Parmi les molécules de report, certaines sont dans la liste des substances actives que l'on retrouve plus souvent dans les parcelles de maïs n'ayant pas reçu de S-métolachlore en France (selon l'enquête PK Grandes cultures 2017). C'est par exemple le cas du diméthénamide-P, de la pendiméthaline et du thiencazone-méthyl. Ces molécules ont au moins une partie de leur action racinaire, visent la gestion des graminées estivales et peuvent s'utiliser en prélevée du maïs. Ainsi les agriculteurs essaient de retrouver ce qui constitue les particularités et atouts du S-métolachlore. Le diméthénamide-P est d'ailleurs la substance active principale ciblée par les instituts techniques agricoles français⁵⁹ comme étant une alternative possible au S-métolachlore.

Comme évoqué précédemment, le Luxembourg interdit l'utilisation de certaines molécules sur certaines zones. C'est notamment le cas de la terbuthylazine, du diméthénamide-P et du péthoxamide. La terbuthylazine est interdite dans une des zones de protection autour du lac

⁵⁸ La terbuthylazine n'est pas autorisée en pré-levée en France

⁵⁹ Echanges organisés avec des représentants des instituts techniques agricoles français à l'occasion du travail sur ce rapport

de la Haute-Sûre (la zone IIB *i.e.* la zone de protection rapprochée à vulnérabilité élevée) ; le péthoxamide est interdit plus largement dans les zones II (zone de protection rapprochée) et III (zone de protection éloignée). A ces zonages s'ajoutent également des règles limitant les épandages de produits phytosanitaires à proximité des cours d'eau. Par exemple, dans la majorité des cas, la terbuthylazine ne peut pas être appliquée à moins de 20 mètres d'un cours d'eau, même si des buses antidérive sont utilisées. L'isoxaflutole peut être appliqué jusqu'à 10 mètres. Par ailleurs, des restrictions temporelles existent aussi : certaines molécules ne peuvent pas être utilisées deux années de suite. C'est par exemple le cas du diméthénamide-P ou du péthoxamide dont l'utilisation est limitée à une année sur deux, quand ils ne sont pas complètement interdits sur certaines zones. Quand une molécule est autorisée sur plusieurs cultures de la rotation, ce type de restriction temporelle peut être appliquée sur l'ensemble de la rotation (*i.e.* la molécule reste autorisée qu'une année sur deux, peu importe la culture de la rotation qui la reçoit cette année-ci). C'est illustré par le cas du péthoxamide qui est autorisé sur maïs et colza.

On notera aussi que le Luxembourg préconise d'enherber les inter-rangs du maïs. Cela peut s'avérer complémentaire des pratiques de désherbage chimique localisé sur le rang.

En ce qui concerne le tournesol, la préconisation pour l'année 2021 cerne un unique programme combinant le prosulfocarbe à l'aclonifen en prélevée, suivi ou non d'un traitement en post levée avec l'antigraminée propaquizafop. On retrouve d'ailleurs l'aclonifen en France parmi les molécules utilisées plus souvent dans les parcelles de tournesol n'ayant pas reçu de S-métolachlore (selon l'enquête PK Grandes cultures 2017). Ceci n'est applicable que dans les zones non soumises à la protection de l'eau. Dans les zones soumises à protection de l'eau, seule la lutte mécanique contre les adventices est autorisée sur la culture du tournesol.

5.1.5. Eléments de bilan sept ans après l'interdiction

Les agriculteurs et la chambre d'agriculture du Luxembourg ne notent pas de dérive de la flore avec une augmentation d'espèces qu'il serait de plus en plus difficile de gérer avec le panel des solutions disponibles et préconisées aujourd'hui. Aussi ces dernières semblent à même de permettre une gestion de la situation. Il y a toutefois, comme en France, des flores plus ou moins complexes et des espèces qui nécessitent une attention toute particulière. En premier lieu les préconisations font la distinction entre les situations avec un fort potentiel d'infestation par les graminées estivales panic, digitale et séttaire par opposition aux autres situations. Viennent ensuite deux préoccupations plus ponctuelles autour de la gestion du géranium sanguin d'une part et du vulpin de l'autre.

Pour conclure, si les eaux de surfaces ont montré une claire amélioration, l'aquifère profond évolue très lentement. Des dépassements des concentrations seuils sont encore constatés aujourd'hui. Sur la base de simulations, de mesures et d'expérimentations complémentaires, ainsi que sur la base de l'historique pour l'atrazine, la division de la gestion de l'eau du Luxembourg estime que la décrue significative de ces pollutions devrait se situer aux alentours

de 2030. En effet, certaines masses d'eau ne transfèrent que sur quelques dizaines de mètres par an. Cette inertie joue en défaveur d'un effet rapidement visible de l'interdiction. Pour aller plus loin, il serait intéressant de documenter le ressenti des agriculteurs luxembourgeois face au recours obligatoire aux alternatives chimiques et non-chimiques au S-métolachlore auxquelles ils ont eu accès et aux impacts techniques et économiques de leur mobilisation sur les exploitations depuis ces évolutions majeures réglementaires de 2015.

5.2. Remontées du terrain en France : raisons de l'utilisation du S-métolachlore et discussion autour des alternatives

Cette partie 5.2 repose principalement sur des éléments présentés par les instituts techniques agricoles à l'occasion des échanges organisés le 18 mars 2022 et le 25 avril 2022 ainsi que sur des éléments écrits qui nous ont été transmis ultérieurement par certains participants. Nous précisons les sources (de préférence en accès libre) quand nous ajoutons des éléments en complément des retours des instituts techniques. Il existe aussi une littérature relativement abondante et accessible sur internet émanant des instituts techniques agricoles, des chambres d'agriculture et autres organisations professionnelles agricoles. Le site internet Ecophytopic⁶⁰ recense de son côté un certain nombre de pratiques et résultats du réseau DEPHY.

Nous visons ici à donner les éléments clés du dossier et retranscrire l'esprit des échanges que nous avons eus avec les instituts techniques et certains ingénieurs du réseau Dephy. Ces échanges ont principalement porté sur les raisons pour lesquelles le S-métolachlore est employé aujourd'hui : ce sera donc un point assez central de ce chapitre. Par ailleurs, les instituts techniques nous ont également apporté des éléments sur des pistes possibles pour des alternatives chimiques et non chimiques au S-métolachlore, ainsi que des éléments susceptibles d'être des facteurs bloquant ou facilitant leur mobilisation. Nous aborderons cette discussion en fin de cette partie 5.2. Les alternatives chimiques et non chimiques seront ensuite présentées plus finement dans la partie 6.1 où nous détaillons quelques exemples d'itinéraires techniques possibles avec et sans S-métolachlore avant de traiter la comparaison d'ordre économique.

5.2.1. Eléments de contexte

Nous avons vu précédemment que le S-métolachlore est employé sur un certain nombre de cultures de printemps. Ces dernières représentent en 2020 42,8% de la SAU en grandes cultures (Agreste, 2021). Cette molécule est le troisième herbicide le plus utilisé en France après le glyphosate et le prosulfocarbe (en kg de matière active). Le S-métolachlore est connu pour établir la base d'un désherbage de pré-levée par une action racinaire sur certaines

⁶⁰ <https://ecophytopic.fr/>

espèces adventices majeures, ce qui permet de garantir une absence de germination de ces espèces pendant la phase d'installation des cultures.

Le **Tableau 14** ci-dessous (réalisé à partir des enquêtes PK 2017) rappelle, pour chaque culture et pour l'année 2017, le pourcentage de surfaces traitées avec (au moins) un herbicide chimique, le pourcentage de surfaces traitées au S-métolachlore, et la part des surfaces traitées au S-métolachlore parmi les surfaces traitées par (au moins) un herbicide chimique. Cette molécule couvre des situations très différentes selon les cultures : plus de la moitié des surfaces de soja reçoivent du S-métolachlore, ce qui représente environ 70% des surfaces en soja désherbées chimiquement. La situation en maïs grain et tournesol est similaire avec environ 40% des surfaces traitées au S-métolachlore (sachant qu'en 2017, plus de 90% des surfaces de chacune de ces cultures étaient désherbées chimiquement). L'utilisation est moindre sur maïs fourrage avec environ 30% des surfaces qui reçoivent du S-métolachlore. Par ailleurs, seules 5% des surfaces cultivées en betterave sucrière reçoivent du S-métolachlore (sachant que 100% de ces dernières étaient désherbées chimiquement en 2017, la filière de betterave bio n'ayant vu le jour que plus récemment, en 2019⁶¹).

Tableau 14 : Part des surfaces traitées par au moins un herbicide chimique et celles traitées au S-métolachlore en 2017 par cultures

	Maïs grain	Maïs fourrage	Tournesol	Soja	Betterave
Part de surfaces traitées avec au moins un herbicide (A)	98%	97%	93%	82%	100%
Part de surfaces traitées au S-métolachlore (B)	38%	29%	38%	58%	5%
Part du S-métolachlore dans les traitements herbicides chimiques (B/A)	39%	30%	41%	71%	5%

Source : Propre élaboration à partir de l'enquête pratiques culturales grandes cultures 2017

Avec environ 40% des surfaces en maïs grain traitées au S-métolachlore en 2017, c'est cette culture qui mobilise les plus gros volumes de S-métolachlore utilisés en France (environ 650 tonnes) devant le maïs fourrage (environ 400 tonnes). C'est une des raisons pour lesquelles nous discutons beaucoup de ces cultures dans cette partie **5.2** ; les instituts techniques ayant fourni un certain nombre d'informations relatives à la culture de maïs, sans distinguer grain et fourrage car à la date où le S-métolachlore est utilisé, on ne connaît pas obligatoirement la destination de la culture.

Avec 5% de surfaces traitées au S-métolachlore, la betterave en reçoit un peu plus de 10 tonnes en 2017. Néanmoins, les instituts techniques soulignent que cette faible proportion et ces tonnages moindres ne sont pas les garanties d'une sortie aisée du S-métolachlore pour les

⁶¹ <https://www.agencebio.org/2021/07/01/le-sucre-bio-etat-des-lieux/>

agriculteurs qui le mobilisent aujourd’hui, tout particulièrement dans les situations de résistance des adventices à différentes familles herbicides.

Par ailleurs, le cas des cultures porte-graines a été mis en avant par les instituts techniques : si ces cultures représentent une faible part de la SAU française, certaines reçoivent du S-métolachlore sur presque l’intégralité des surfaces concernées. C’est le cas du maïs semence avec environ 83 000 ha cultivés en 2020/2021 ; il en va de même pour le tournesol avec environ 16 500 ha en 2020/2021⁶². Les instituts techniques mettent également en avant l’absence d’alternatives pour d’autres cultures mineures et soulignent l’exemple des courgettes, potirons et coloquintes porte-gaines dont la totalité des surfaces est traitée au S-métolachlore, soit environ 200 ha concernés (voir paragraphe 5.2.2.5 pour le cas des cultures porte-graines).

5.2.2. Raisons de l’utilisation du S-métolachlore

5.2.2.1. *Spectre d’action relativement large*

Le S-métolachlore est reconnu pour son efficacité contre les graminées estivales, notamment panics, sétaires et digitaires (dites « PSD »). Ces familles botaniques sont proches du maïs (graminées en C4) : dans une logique de désherbage chimique, il est donc nécessaire d’avoir recours à des substances actives à la fois efficaces sur les adventices visées et sélectives du maïs. De plus, ces graminées estivales sont compétitives très tôt, puisqu’elles lèvent en même temps que la culture, et dommageables dès de faibles densités. Elles sont donc généralement très suivies des agriculteurs qui cherchent à les contrôler quand elles sont présentes, mais également à anticiper de potentielles survenues dans les parcelles. D’autres graminées telles que les pâturins ou le ray-grass (résistants à d’autres herbicides – cf. paragraphe 5.2.2.3 ci-dessous) sont également ciblées dans les stratégies de désherbage de ces cultures de printemps.

Le spectre du S-métolachlore est large puisqu’il permet également de lutter contre certaines dicotylédones annuelles (voir [Tableau 16](#) pour la partie PSD du spectre et voir Annexe 4 pour le spectre complet). Son utilisation contre les dicotylédones reste souvent plus vue comme ‘un bonus’ par l’appui technique ; en effet, ce ne sont pas les adventices les mieux contrôlées par cette molécule et il existe plusieurs autres options chimiques efficaces. Néanmoins, le retrait de l’autorisation du Bromoxynil en septembre 2021 a pu accroître la pression sur les alternatives chimiques existantes pour lutter contre des dicotylédones parfois

⁶² <https://www.semae.fr/etudes-donnees-statistiques-semences/>

problématiques⁶³. Selon des essais réalisés par Arvalis sur maïs de 2000 à 2019⁶⁴, combiner une application de S-métolachlore entre 1000 et 1500 g/ha (en pré-levée) à une tricétone à demi dose de sa dose homologuée (en foliaire) permet d'augmenter de 33 points le taux de parcelles avec une efficacité satisfaisante sur les dicotylédones les plus difficiles⁶⁵. Il s'agit des ambrosies à feuille d'armoise, du datura stramoine, des mercuriales annuelles, des renouées des oiseaux et renouées liseron. Par ailleurs, Arvalis indique également qu'associer le S-métolachlore à une autre molécule telle que le diméthénamide-P, le thiencarbazone-méthyl, l'isoxaflutole, la pendiméthaline ou la mésotrione permet de renforcer l'efficacité de la lutte contre les graminées estivales et d'élargir le spectre d'action sur les dicotylédones annuelles à levée précoce. Le paragraphe [5.2.3.1](#) aborde le cas du diméthénamide-P et de la pendiméthaline ; la suite du rapport aborde également, et à titre d'exemple, le cas de la sulcotrione, molécule dont l'utilisation a fortement augmenté au Luxembourg suite à l'interdiction ou la restriction sur les 'big movers' (voir [Tableau 13](#)).

5.2.2.2. Action antigerminative et rémanence dans le sol

L'action antigerminative du S-métolachlore permet d'agir avant la levée des adventices et, en tant qu'herbicide racinaire, sa rémanence permet de garantir une absence de levée d'adventices au début de la phase d'installation des cultures. Les levées d'adventices sont alors retardées et se font de manière plus synchronisée, ce qui accroît l'efficacité d'un potentiel désherbage de post-levée avec un herbicide foliaire ou l'emploi d'un outil superficiel de type bineuse, herse ou bien houe. Néanmoins, en maïs, un traitement de pré-levée au S-métolachlore est parfois suffisant pour gérer la flore adventice ; à défaut (notamment depuis la nouvelle réglementation limitant sa dose à 1 kg/ha), il est complété par un deuxième passage (en post-levée), voire un troisième en production de semences. Selon des données Arvalis⁶⁶, en 2019-2021, 20% des surfaces en maïs désherbées chimiquement sont traitées en pré-levée, environ 30% sont traitées en pré-levée puis en post-levée, et environ 50% sont traitées uniquement en post-levée. L'emploi du S-métolachlore en pré-levée est régulièrement comparé à des systèmes construits sur le seul recours à des désherbages chimiques de post levée (du maïs) et donne souvent satisfaction.

⁶³ Le Bromoxynil n'a pas été réapprouvé au niveau européen et la date limite d'utilisation de la molécule s'arrêtait en septembre 2021. La campagne 2022 s'est donc faite sans Bromoxynil alors que cette molécule était assez prisée pour renforcer l'efficacité des tricétone et sulfonilurées dans la lutte contre des dicotylédones jugées difficiles. Les cibles prioritaires du Bromoxynil étaient la mercuriale annuelle, la renouée liseron ou la renouée des oiseaux ainsi que d'autres adventices plus communes du blé maïs 'débordant' régulièrement dans la culture du maïs (gaillet, pensée, véronique) (Arvalis, 2021).

⁶⁴ Note du 25 mai 2022 transmis par Arvalis à INRAE suite aux échanges organisés le 25 avril 2022 dans le cadre de l'évaluation comparative menée par INRAE sur le S-métolachlore.

⁶⁵ On passe de 20% des parcelles avec une efficacité satisfaisante sur les dicotylédones les plus difficiles pour une tricétone seule à demi-dose, à 53% des parcelles quand ce traitement est associé à un passage de S-métolachlore en pré-levée.

⁶⁶ Note Arvalis du 25 mai 2022 sur la culture de maïs.

En culture de maïs doux pour lesquelles moins de solutions de désherbage chimique de post-levée sont homologuées, la quasi-totalité des parcelles reçoivent un traitement de pré-levée. Il en est de même pour les cultures de maïs semences pour lesquelles des raisons supplémentaires expliquent sa forte mobilisation ; nous développons ces raisons dans le paragraphe 5.2.2.5 ci-dessous.

5.2.2.3. *Pas de résistance connue ce jour en France*

Aujourd'hui, trois familles d'herbicides sont utilisées pour lutter contre les graminées estivales. Il s'agit des chloroacétamides (action antigerminative) dont fait partie le S-métolachlore, des sulfonilurées et des tricétones (toutes deux à action foliaire). Selon Arvalis, ces deux dernières familles ne sont pas aussi efficaces que les chloroacétamides : les produits disponibles actuellement sur le marché ne disposent pas d'un spectre d'action assez large ou d'une efficacité suffisante pour lutter contre l'ensemble des graminées estivales présentes dans le maïs.

Par ailleurs, les sulfonilurées connaissent une progression des résistances des espèces adventices à leur rencontre. De manière plus générale, les inhibiteurs de l'ALS (dont font partie les sulfonilurées) sont les plus exposés à ce phénomène dans le monde depuis les années 1990 (Délye *et al.*, 2021). En France, les résistances aux inhibiteurs de l'ALS concernaient au départ principalement les adventices des cultures d'hiver (notamment vulpins et ivraies) ; elles concernent désormais également certaines adventices des cultures estivales telles que les PSD (Délye *et al.*, 2015). A titre d'exemple, Arvalis remarque l'apparition et le développement de résistances parmi les graminées estivales à l'encontre du nicosulfuron (principale molécule à action foliaire utilisée en post-levée et appartenant à la famille des sulfonilurées, inhibiteur de l'ALS). Des résistances existent également à l'encontre de la famille des Fops et Dimes (antigraminées inhibiteurs de l'ACCase). Ainsi, aujourd'hui environ 70% des maïs désherbés chimiquement sont traités avec un herbicide de la famille des chloroacétamides⁶⁷ et, à ce jour, on ne connaît pas d'espèce d'adventices ayant développé en France de populations résistantes au S-métolachlore⁶⁸. Les instituts techniques soulignent également le fait que ces résistances (notamment ray-grass et vulpin) sont problématiques pour les cultures de betteraves, de soja, de tournesol et de semences pour lesquelles le S-métolachlore apparaît comme une substance « pivot » ; la recherche d'alternatives chimiques s'avère décevante. Les cas de résistances de la flore adventice limitent d'autant le recours au désherbage localisé en post-levée. De plus, la possibilité d'utiliser du S-métolachlore sur les cultures de printemps est souvent un élément décisif pour rompre une rotation de cultures d'hiver sur lesquelles seuls les inhibiteurs d'ALS sont utilisés contre les graminées (ray-grass et vulpins) résistantes à cette famille d'herbicides. De ce point de vue, si l'on applique strictement l'article 50 du Règlement (CE) N° 1107/2009 cadrant l'évaluation comparative, il est donc pertinent de souligner l'importance portée par

⁶⁷ Note Arvalis du 25 mai 2022 sur la culture de maïs.

⁶⁸ Premières exceptions dues à des résistances croisées ; voir par exemple (Strom *et al.*, 2020).

les professionnels sur l'intérêt de maintenir cette molécule i) dans la gestion globale des résistances aux herbicides et ii) pour gérer en différé d'autres problèmes émergents au sein des rotations qui peinent à contenir le vulpin, le ray-grass ou d'autres graminées estivales, mais aussi à freiner l'extension de l'ambrosie. Mais on peut se demander dans quelle mesure la présence du S-métolachlore n'a pas servi des pratiques à risque vis-à-vis de la résistance en permettant une bonne efficacité curative là où des actions préventives et non chimiques auraient eu toute leur place.

5.2.2.4. Interdiction progressive d'autres herbicides racinaires

Par ailleurs, la famille des chloroacétamides est à présent peu diversifiée et, avec le retrait d'un certain nombre de substances actives qui la composent, le S-métolachlore a progressivement pris le statut de pierre angulaire de l'installation réussie des cultures de printemps. L'alachlore est interdit d'utilisation en France depuis 2008 tandis que l'acétochlore est interdit depuis 2013. Ainsi, parmi les 70% des surfaces de maïs recevant un chloroacétamide, 60% sont traités au S-métolachlore et les 40% restants reçoivent majoritairement du diméthénamide-P (encore appelé « dmta-P »)⁶⁹. Nous verrons un peu plus loin dans la partie [5.2.3.1](#) que cette substance active, le dmta-P, fait partie des alternatives chimiques au S-métolachlore évoquées et testées par l'encadrement technique. Pour rappel, dans la partie [5.1](#) traitant du Luxembourg, nous avons pu constater que le dmta-P faisait partie des molécules dont l'utilisation a fortement augmenté suite à l'interdiction du S-métolachlore sur l'ensemble du territoire luxembourgeois à partir de 2015 (multiplication par 4 des quantités dès la campagne 2015-2016 par rapport à la campagne 2013-2014).

5.2.2.5. Le cas des cultures porte-graines

Nous avons évoqué précédemment le fait que la quasi-totalité des surfaces en maïs semence reçoivent un traitement de pré-levée. Un certain nombre d'éléments expliquent cette forte mobilisation.

Tout d'abord, de par une vigueur souvent plus faible (ce ne sont pas des hybrides) et un itinéraire technique particulier (semis impliquant des rangs mâles et des rangs femelles, dates de semis multiples sur la parcelle - souvent trois - afin d'assurer une concordance de la floraison, écimage des femelles à floraison, broyage des mâles), le maïs semence est particulièrement sensible à la compétition des adventices en phase d'installation⁷⁰. De plus, cet itinéraire technique rend le recours au désherbage mécanique précoce plus complexe à mettre en œuvre.

⁶⁹ Campagne 2019-2021, note Arvalis du 25 mai 2022 sur la culture de maïs.

⁷⁰ Ce paragraphe se concentre principalement sur le cas du maïs semence. Ce problème de vigueur est néanmoins aussi une réalité dans le cas de la production de tournesol semence.

Par ailleurs, les lignées parentales sont de manière générale moins tolérantes aux herbicides que les hybrides qui en sont issus. En conséquence, la liste des herbicides réellement utilisables sur les lignées parentales est restreinte, que ce soit en pré-levée comme en post-levée. En France, les lignées parentales sont très diversifiées avec environ 2000 variétés produites. Or, seul l'obteneur connaît les sensibilités de ses lignées et dresse, pour chaque lignée, la liste des substances actives qu'il autorise. Ces dernières sont définies contractuellement. La production de semences impliquant une lignée mâle et une lignée femelle sur la même parcelle, ces deux lignées doivent être tolérantes à la (ou les) substance(s) active(s) employée(s). Ces dernières doivent également être suffisamment sélectives au vu des différents stades de cultures présents sur la parcelle au moment du traitement. Ces différents éléments imposent l'emploi de produits très sélectifs ; l'association d'un phytoprotecteur avec la (ou les) substance(s) active(s) du produit peut être une réponse.

Ces différents éléments expliquent ainsi que de nombreuses molécules utilisées sur maïs grain ou maïs fourrage ne le sont pas sur maïs semence. Par une association avec un phytoprotecteur, le bénomaxore, le S-métolachlore acquiert une sélectivité suffisante pour être utilisé sur maïs semence. A cela s'ajoute son efficacité satisfaisante sur les adventices ciblées. Ces éléments expliquent en grande partie le taux d'usage supérieur du S-métolachlore sur maïs semence comparativement aux cultures de maïs grain et maïs fourrage, et comparativement à d'autres substances actives. A titre d'exemple, le diméthénamide-P n'est pas doté de phytoprotecteur, le péthoxamide n'est pas jugé suffisamment sélectif, la pendiméthaline n'est pas aussi efficace que le S-métolachlore sur graminées estivales et sa sélectivité n'est pas garantie, etc.

Pour conclure, le S-métolachlore est devenu incontournable en production de maïs semence ; c'est également le cas du tournesol semence. Il est aussi très utilisé pour certaines cultures en production de semences potagères⁷¹. Il est notamment employé sur la quasi-intégralité des surfaces cultivées en courgette porte-graine, potiron porte-graine, et coloquinte porte-graine car il n'existe pas d'autre alternative chimique sélective homologuée. Cela ne concerne qu'environ 200 ha mais sur lesquels le S-métolachlore est dans une situation orpheline. Il est également employé sur environ la moitié des surfaces de haricot porte-graine (soit 1000 ha), *via* les usages autorisés en cultures de consommation, par absence de substitution possible. La quasi-totalité des surfaces cultivées en maïs doux porte-graine reçoivent également du S-métolachlore (soit environ 500 ha) pour des raisons similaires à celles exposées précédemment dans ce paragraphe pour les cultures de maïs porte-graine. En betterave industrielle et fourragère porte-graine, c'est environ la moitié des surfaces qui reçoivent du S-métolachlore (soit 3000 ha concernés) ; l'utilisation d'éthofumésate associé à des antigraminées pourrait lui être substituée.

Le recours au désherbage mécanique est possible sur ces cultures porte-graine, avec toutes les limites et difficultés évoquées dans ce document.

⁷¹ Données fournies par la FNAMS suite aux échanges du 25 avril 2022 avec les instituts techniques agricoles

5.2.2.6. *Quelques avantages réglementaires*

L'utilisation de buses anti-dérives homologuées autorise à réduire la Zone de Non Traitement (ZNT) de 20 mètres à 5 mètres à condition de respecter un Dispositif Végétalisé Permanent (DVP) de 5 mètres (Arvalis, 2022). En effet, sans ces buses, les spécialités commerciales contenant du S-métolachlore sont soumises à la phrase SPe3 « *Pour protéger les eaux de surface, respecter une zone non traitée de 20 mètres par rapport aux points d'eau comportant un dispositif végétalisé permanent non traité d'une largeur de 5 mètres en bordure des points d'eau pour les usages sur [les cultures concernées par la spécialité commerciale]* » (visible sur le catalogue en ligne E-Phy). Par ailleurs, le S-métolachlore n'a pas de restriction d'emploi en mélange. Il ne pose pas non plus de problème sur les ZNT riverain.

5.2.3. Retours du terrain sur les alternatives au S-métolachlore

5.2.3.1. *Alternatives chimiques présentées par les instituts techniques*

Les instituts techniques ciblent principalement le dmta-P comme alternative chimique ou complément d'action au S-métolachlore. La pendiméthaline peut aussi être employée pour lutter contre certaines graminées (voire spectres d'action en Annexe 4), pour les cultures sur lesquelles elle est autorisées (Annexe 5) et si les conditions les permettent (notamment taux d'humidité suffisant). Les usages autorisés pour chacune de ces trois molécules sont présentés dans le **Tableau 15** ci-dessous (usages partagés avec le S-métolachlore, voir Annexe 5 pour l'ensemble des usages). Le dmta-P partage un certain nombre d'usages principaux du S-métolachlore : betterave industrielle et fourragère⁷², maïs (et sorgho), maïs doux et tournesol. Il ne peut en revanche pas être substitué au S-métolachlore pour ananas, canne à sucre, haricots et pois, cucurbitacées porte-graine et soja.

La pendiméthaline partage également un certain nombre d'usages avec le S-métolachlore. Néanmoins, les instituts techniques émettent des réserves quant au caractère substituable du S-métolachlore par la pendiméthaline dont le spectre diffère de celui du S-métolachlore et l'efficacité par adventices cibles est globalement moindre relativement à celle du S-métolachlore (notamment sur ray-grass). Par ailleurs, Arvalis (2021) rappelle qu'elle est phytotoxique pour le maïs et le sorgho si elle vient au contact de leurs racines. En revanche, associée à une dose de 1 kg/ha de S-métolachlore, la pendiméthaline permet, si les conditions sont favorables, d'améliorer le niveau d'efficacité du désherbage et de compléter le spectre sur certaines dicotylédones précoces telles que les Véroniques ou les Renouées des oiseaux. Concernant son utilisation en culture de soja, la pendiméthaline peut avoir des résultats satisfaisants sur graminées estivales en situation de rotations assez classiques ; à titre

⁷² Le dmta-P n'a cependant pas d'homologation en pré-levée en betterave

d'exemple, le produit ATIC-AQUA contenant de la pendiméthaline peut être associé au produit PROMAN contenant du métobromuron (Duroueix et Micheneau, 2022). Néanmoins, employée sur soja sur sols filtrants, la pendiméthaline a une sélectivité jugée globalement insuffisante. A noter que l'avenir de la pendiméthaline reste à ce jour incertain tant que l'approbation de la substance active n'est pas renouvelée (échéance d'approbation le 30 novembre 2024) et ce, en raison de son classement comme SA candidate à substitution.

Tableau 15 : Usages autorisés du S-métolachlore, du diméthénamide-P et de la pendiméthaline fin 2021

	S-métolachlore	Diméthénamide-P	Pendiméthaline
Ananas	x		
Betterave industrielle et fourragère	x	x	
Canne à sucre	x		x
Haricots écosés frais	x		
Haricots et Pois écosés frais	x		(x)
Haricots et pois non écosés frais	x		(x)
Maïs	x	x	x
Maïs doux	x	x	
Porte graine	x		x
Soja	x		x
Sorgho	x	x	x
Tournesol	x	x	x

Source : Propre élaboration à partir du fichier transmis par l'ANSES le 12 octobre 2021 compilant l'ensemble des usages (autorisés et retirés) depuis la date de première autorisation de chaque produit phytosanitaire

Note : Ce tableau se concentre uniquement sur les cultures pour lesquelles le S-métolachlore est autorisé. Les usages autorisés correspondent tous à du désherbage. Un tableau plus complet est présenté en Annexe 5 ; il précise également les usages pour lesquels le diméthénamide-P ou la pendiméthaline sont autorisés mais pour lesquels le S-métolachlore ne l'est pas. Il semble qu'un dossier ait été déposé en 2021 pour une demande d'usage du diméthénamide-P sur haricot et pois.

Note : l'autorisation de la pendiméthaline sur haricot est possible via l'assimilation de l'usage avec les pois, mais, de fait, ne se pratique pas pour des raisons de manque de sélectivité

Par ailleurs, au-delà des aspects réglementaires⁷³, le type de flore adventice présente ou suspectée sur la parcelle demeure un critère de tout premier ordre pour l'agriculteur quand il choisit le programme de désherbage auquel il va avoir recours. Dans le cadre d'un désherbage chimique, l'agriculteur doit choisir la ou les molécules qui lui semble(nt) à la fois être efficace(s) pour lutter contre les adventices présentes dans sa parcelle (visibles ou à l'état de stock de semences) et adéquate(s) par rapport à un ensemble de critères (ex : les conditions pédoclimatiques, le prix, la facilité d'emploi ou la régularité du résultat). Pour cela, il peut se référer aux spectres d'action des substances actives (ou, dans la pratique, aux spectres des spécialités commerciales envisagées) et avoir aussi ses préférences issues de ses expériences

⁷³ On peut ajouter le fait que certaines zones de captages prioritaires font l'objet de restrictions sur un certain nombre de produits phytosanitaires, certaines molécules sont interdites aux abords des cours d'eau, etc.

passées. Le **Tableau 16** présente une partie des spectres d'action du S-métolachlore du diméthénamide-P et de la pendiméthaline. Par souci de clarté, seules les efficacités sur PSD sont renseignées dans ce tableau. Un tableau plus complet se trouve en Annexe 4 : il rassemble les efficacités comparées des trois molécules ainsi que quelques autres sur un panel d'adventices élargi relativement à celui présenté ci-dessous.

Tableau 16 : Une partie des spectres d'action du S-métolachlore, du diméthénamide-P et de la pendiméthaline

Adventice	S-métolachlore (+bénoxacore)	Diméthénamide-P	Pendiméthaline
Digitaires : D. sanguine*, D. ischème	1,8	2	2
Panic à inflorescence dichotome	2,5	2,5	
Panic capillaire	2	2	2,5
Panic faux-millet*	4	4	2
Panic pied de coq*	1,8	2	2
Sétaires : S. glauque*, S. verte*, S. verticillée	1,8	2	2

Source : Propre élaboration à partir des données par cultures tiré de Mamarot et Rodriguez (2003).

Note : les couleurs classent les efficacités de bonnes (vert) à insuffisantes (rouge) en passant par des notes moyennes (jaune et orange).

Les notes sont la moyenne des efficacités sur chaque culture sur lesquelles la SA est autorisée.

Ceci vient illustrer ce qui oriente les choix d'un désherbage chimique. Les instituts et chambres publient régulièrement dans un recueil de préconisation des programmes de désherbages chimiques ou mixtes (croisant chimique et mécanique) adaptés aux situations rencontrées et souvent appuyées par des résultats d'essais⁷⁴. On renverra le lecteur à la consultation de ces documents bien plus complets que ce que l'on peut synthétiser ici.

Le S-métolachlore ressort comme une molécule particulièrement efficace pour lutter contre PSD, ray-grass et vulpin. Cela oriente largement la manière de raisonner les programmes de désherbage en clarifiant dans un premier temps le statut des PSD puis en triant dans un second temps parmi les molécules les plus efficaces selon les autres adventices à gérer. L'application d'un programme mixant pré et post levée est donné comme apportant la meilleure fiabilité, la post-levée pouvant être ajustée « à vue » en adaptant le programme herbicide aux adventices présentes ou en ayant recours à un ou plusieurs binages si les conditions requises sont réunies. De manière générale, le choix du type de désherbage, et de la (ou les) substance active dans le cas d'un désherbage chimique, dépend aussi d'autres facteurs plus ou moins tangibles. Comme nous avons vu précédemment, rentrent en jeu des critères réglementaires vis-à-vis des distances à respecter pour protéger la ressource en eau et des limites éventuelles d'application dans le temps de la rotation. D'autres facteurs tels que le coût (pour assurer un rapport coût/efficacité acceptable), le type de sol (teneur en matière organique, composition

⁷⁴ A titre d'exemple : https://www.arvalis-infos.fr/file/galleryelement/pj/80/e1/b9/98/guide_preco_mais_centre_iledefrance_1861283664729572283.pdf

minéralogique, etc.) ou les conditions météorologiques peuvent également jouer sur la régularité du résultat et moduler le processus de décision de l'agriculteur. Des facteurs moins tangibles tels que l'expérience de l'agriculteur, son parc matériel, le conseil auquel il peut éventuellement avoir accès, sa connaissance des risques propres à chaque molécule (voir [Tableau 31](#)), etc. ont probablement un impact sur ses choix. Ces facteurs plus qualitatifs restent toutefois plus délicats à intégrer.

Des échanges avec les professionnels de terrain ainsi qu'à la lecture des documents de préconisations délivrées aux agriculteurs, on peut suspecter qu'un durcissement de la réglementation sur le S-métolachlore au-delà des évolutions réglementaires retenues fin 2021, pourrait conduire à un possible report en masse et à court terme vers le dmta-P. Ce ne sera néanmoins pas le cas en maïs semences : l'absence de phytoprotecteur en association avec le dmta-P complique considérablement la substitution (expérimentations Arvalis en cours) ce qui constitue une menace assez directe sur cette production. On note la même situation en maïs doux.

5.2.3.2. Exemples d'alternatives mixtes ou non chimiques

Désherbage mécanique ou désherbinage :

Si le désherbage mécanique du maïs s'est un peu développé ces dernières années (94% des surfaces cultivées en maïs sont désherbées chimiquement entre 2019 et 2021 contre 98% en 2010-2012⁷⁵), il ne s'est pas imposé comme solution unique et reste presque exclusivement combiné à un traitement chimique de pré-levée en dehors de la labellisation en AB.

Par exemple, il est possible de combiner une application de S-métolachlore sur maïs en plein en pré-levée puis de compléter par un ou plusieurs binages. Il est également possible de distinguer la gestion des adventices sur le rang et sur l'inter-rang en employant du S-métolachlore en pré-levée uniquement de manière localisée sur le rang de maïs, puis en désherbant mécaniquement l'inter-rang. Selon 12 essais menés par Arvalis entre 2019 et 2021, un désherbage chimique de pré-levée sur le rang suivi de deux binages sur l'inter-rang présente une performance tout à fait comparable à un traitement de pré-levée en plein⁷⁶. Les instituts techniques insistent toutefois sur le fait que cela n'est possible que si les conditions pédoclimatiques sont favorables à ces interventions mécaniques. Par ailleurs, les débits de chantier plus faibles en désherbage mécanique peuvent se heurter au temps de travail des agriculteurs, souvent incompressible sans reconception profonde des systèmes, et être également un frein au déploiement de telles pratiques. Bien que le pilotage de précision (RTK, caméra, etc.) permette une amélioration des débits de chantier, ceux-ci restent très inférieurs à ceux d'une pulvérisation.

⁷⁵ Note Arvalis du 25 mai 2022 sur la culture de maïs.

⁷⁶ Note Arvalis du 25 mai 2022 sur la culture de maïs.

Les contraintes relatives au désherbage mécanique sont diverses. Tout d'abord, le nombre de jours favorables au binage est très généralement plus limité que pour un désherbage chimique, et ce, dans la quasi-totalité des régions de France. En revanche, à l'échelle d'une journée, les contraintes sont moins importantes et la fenêtre d'action est plus large pour un binage que pour un désherbage chimique. En effet, un désherbage chimique requiert un bon taux d'humidité, pas de vent trop fort ni de chaleur excessive ; tandis que le vent ou des fortes températures ne limitent pas les interventions mécaniques en journée. Par ailleurs, le désherbage mécanique est fortement conditionné par le type de sol, la charge en cailloux, le type de travail du sol (labour ou TCS⁷⁷), etc. Les praticiens soulignent aussi que le résultat du désherbage mécanique par binage peut être satisfaisant mais i) il peut favoriser le développement et l'étalement de vivaces dans les parcelles et ii) il permet plus facilement de contrôler les dicotylédones que les graminées estivales. Il a néanmoins l'avantage de ne pas être sélectif vis-à-vis de ces dernières. Enfin, les instituts mettent en garde quant aux coûts générés par les techniques mixtes (distinguant gestion du rang et de l'inter-rang) ou entièrement mécaniques, ainsi qu'au risque d'érosion des sols qu'elles peuvent engendrer. En effet, pour améliorer les débits de chantier, désherber chimiquement le rang nécessite du matériel de géolocalisation de précision dont les coûts sont encore importants. Des passages répétés de binage peuvent également coûter cher, en particulier dans le contexte économique avec des énergies fossiles à coût élevé.

Des contraintes viennent s'ajouter dans le cas du désherbinage (pratique qui consiste à désherber le rang chimiquement et l'inter-rang mécaniquement en un seul passage) : les poussières soulevées par le binage peuvent boucher les buses et la fenêtre d'action est restreinte pour bénéficier de conditions météorologiques adéquates à cette combinaison d'interventions mécaniques et chimiques. En effet, comme vu précédemment, les conditions pédoclimatiques idéales pour réussir un désherbage chimique du rang diffèrent généralement des conditions idéales pour un désherbage mécanique de l'inter-rang. C'est pourquoi le désherbinage peut parfois nécessiter des actions différées : on repasse donc sur un système tel que décrit précédemment (un système mixte de désherbage chimique du rang et désherbage mécanique de l'inter-rang, mais en différé).

Un des avantages d'un traitement chimique localisé sur le rang est de permettre de maintenir l'efficacité de certains herbicides dont la dose est contrainte. En ne traitant que le rang il est plus facile de se conformer à la réglementation sans perte d'efficacité. Selon les cultures, l'écartement des rangs et la largeur traitée, on considère qu'un traitement réduit au seul rang représente de 30 à 50% de la surface de la parcelle.

⁷⁷ Techniques culturales simplifiées

Couverts végétaux :

Les couverts végétaux sont souvent évoqués comme pouvant assurer une barrière aux adventices. Ils sont d'ailleurs préconisés au Luxembourg dans l'entre-rang sous un maïs développé. Toutefois, la pratique n'apparaît pas encore suffisamment fiable et mature pour différentes raisons. Tout d'abord, il est nécessaire que la parcelle soit propre, notamment sur le rang, avant l'installation du couvert : il est en effet actuellement impossible de contrôler tardivement les adventices en restant sélectif du couvert. Les 'bons couverts' mobilisables pour cet usage ne sont sans doute pas encore au point : les PSD sont assez agressifs et compétitifs et se développent au détriment des couverts généralement proposés, notamment de légumineuses qui pourraient être employées comme plantes compagnes. Des couverts de type luzerne seraient peut-être envisageables à terme, en conduite des cultures sous mulch vivant, grâce à leur croissance lente favorable à l'installation des cultures. Néanmoins, les instituts techniques soulignent le fait que leur capacité à empêcher le développement des PSD restera rapidement limitée et il peut être difficile de freiner un couvert implanté pour qu'il ne pénalise pas la culture. Il nous semble qu'il y a un réservoir important de travaux expérimentaux à conduire pour mieux être en mesure de mobiliser ce registre offrant une certaine potentialité.

5.3. Pratiques générales pour réduire l'utilisation des herbicides

5.3.1. Le recours au désherbage mixte

La pratique du désherbage mixte permet de diminuer le recours au désherbage chimique (Gayraud *et al.*, 2017 ; Chambre d'Agriculture de l'Oise, 2013).

Hors cahier des charges de l'AB, il demeure rare que le désherbage non chimique soit retenu comme seul périmètre des options de gestion de la flore adventice en système conventionnel, comme le montrent les tableaux de la partie 2.5. Un désherbage mécanique réalisé dans de bonnes conditions est considéré comme une réelle alternative à un traitement avec un herbicide de contact, la destruction des plantules sur l'entre-rang pouvant avoisiner les 100% (Fontaine *et al.*, 2013). Dès lors et pour peu d'être équipé, de nombreux agriculteurs peuvent être tentés par la mise en place d'un programme mixte couplant le chimique et le mécanique. Le désherbage mécanique peut être mobilisé précocement (il est néanmoins peu mobilisé sur sol argileux au risque de détruire le lit des semences). La réalisation de faux semis adossé à un recul du semis véritable est souvent mentionnée (Estorgues *et al.*, 2012 ; Pierre *et al.*, 2012 ; Chambre d'Agriculture d'Alsace, 2018). Il se raisonne en fonction des objectifs de rendement potentiel local, de facilité à entrer dans les parcelles à bon escient, d'absence d'incompatibilité entre les chantiers à mener de front durant la même période. Quand il est pratiqué, il est

vraisemblable qu'il n'affecte pas le potentiel de rendement *via* une réduction de la réserve en eau mais plutôt *via* la durée totale de croissance de la culture. Il décalera le semis de la culture mais celle-ci pourra alors se retrouver dans des conditions optimales de levée avec un sol réchauffé à 10-12 °C (jusqu'aux environs de mi-mai pour le Maïs en Bretagne par exemple) (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2022).

Le désherbage mécanique peut surtout être utilisé après l'application d'un désherbage chimique. Si celui-ci a bien fonctionné et que les niveaux d'infestations demeurent réduits, alors une intervention mécanique peut suffire à entretenir la propreté de la parcelle jusqu'à la fermeture de la végétation. Cela peut nécessiter d'un à quatre passages avec des outils adaptés au contexte, à la flore, et à la culture. A titre d'illustration, on évitera le passage d'une houe rotative dans un sol pas suffisamment ressuyé. De même la bineuse se pratique en général après les interventions avec une herse étrille ou une houe rotative (Chambres d'agriculture de Bretagne, 2021). Un conseil souvent prodigué est de semer des variétés à démarrage vigoureux un peu plus profond et à une densité légèrement accrue pour compenser la perte de quelques pieds de la culture lors du désherbage mécanique. Ce risque peut être réduit avec le recours à des moyens de géolocalisation de précision si l'équipement s'y prête. La prévision d'une intervention mécanique à conduire dans la saison aura aussi comme implication qu'il peut figer la largeur de travail de tous les outils et ce n'est donc pas un choix anodin que l'on peut faire au dernier moment. Désherber avec une bineuse quatre rangs imposera de tout faire en multiple de ce passage de base.

Les instituts techniques consultés, les chambres d'agriculture et certains groupes d'agriculteurs que cette question intéresse, mènent très régulièrement des essais comparatifs et souvent de manière pluriannuelle pour bien intégrer l'impact potentiel de fluctuations saisonnières. Sur l'efficacité du désherbage, ces systèmes mixtes réalisés dans de bonnes conditions de préparation du sol ne décrochent pas ou peu des témoins conduits avec un programme de désherbage entièrement chimique (Fontaine *et al.*, 2013 ; Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Atlantiques, 2017). Il y a généralement moins d'information sur la valeur de la comparaison économique. Ils font au mieux jeu égal, voire sont un peu pénalisés (Arvalis, 2010).

Le principal élément bloquant concerne la crainte de ne pouvoir intervenir dans les bonnes conditions et de devoir laisser progressivement dériver le système vers des niveaux d'infestation plus difficiles à gérer⁷⁸. Evidemment, le travail mécanique est proscrit en technique de conservation des sols mais appliqué en techniques culturales simplifiées.

Tout est loin d'avoir été exploré ; des groupements d'intérêt économique et environnemental (GIEE) expérimentent avec un certain succès et produisent des références potentiellement mobilisables par d'autres. A titre d'illustration un GIEE de la Somme avance qu'*en betteraves, un passage de bineuse en remplacement d'un désherbage chimique permet une baisse d'IFT*

⁷⁸ https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/2b/3b/93/75/384_4559296769512780813.pdf

(Indice de fréquence de traitement) de 25 % en moyenne et en haricots une baisse moyenne de 30 %. Un passage de herse étrille peut éliminer jusqu'à 70 % des adventices au stade filament⁷⁹. Ceci paraît très en phase avec d'autres résultats d'expérimentations.

L'utilisation du désherbage mécanique en saison fait l'objet de nombreuses fiches de présentation de la pratique et notamment sur le site GECO qui apporte quelques références. Ainsi la fiche « Pratiquer le désherbage mécanique en plein – Herse étrille⁸⁰ » détaille l'efficacité de la herse étrille selon les espèces adventices ciblées et leur stade. De même la fiche « Pratiquer le désherbage mécanique sur l'inter-rang - Binage⁸¹ » précise les conditions et note les performances sur différentes flores. Elle renvoie aussi sur différentes sources dont celles qui émanent des instituts. On pourrait multiplier les exemples.

5.3.2. Autres pistes envisagées

La gestion de la flore adventice reste considérée comme une difficulté majeure de la conduite des cultures. Le nombre de molécules herbicides disponibles est passé par un pic en 2002 (Chauvel *et al.*, 2012) pour entamer depuis une réduction importante avec des retraits non compensés. La mobilisation du travail du sol demeure une base des itinéraires agronomiques mais il favorise l'érosion tout comme le tassement des sols. Il contribue aux émissions de GES et consomme des énergies fossiles. Les temps de chantiers sont aussi en général plus lents. Avec des exploitations de grande taille, l'agriculteur se retrouve facilement contraint par une multiplication d'interventions arrivant toutes au même moment. Dans les zones où la réserve utile en eau du sol est rapidement limitée, cela conduit à privilégier des cultures d'hiver et il est alors fréquent que les chantiers se bousculent à l'automne.

Actuellement, il n'y a pas beaucoup d'alternatives majeures déployées qui ne soient ni chimiques ni mécaniques pour gérer la flore adventice, peut-être aussi parce que cette éventualité n'a pas été vraiment travaillée. Les pistes les plus sérieuses, même si elles demandent encore toutes un travail conséquent, concernent :

- Les voies de destruction ni chimique ni par travail du sol des adventices. Il s'agit de méthodes physiques de destruction avec un arc électrique par exemple, et cela peut se décliner dans une approche ultra localisée et automatisée (à titre d'exemple, voir fiche « Pratiquer le désherbage électrique sur le site GECO⁸²). Dans cette catégorie, on considère aussi l'ajout d'obstacles physiques à l'émergence des adventices (bâches ou paillis), mais il reste difficile d'imaginer pouvoir déployer cela sur des surfaces importantes. Les coûts sont souvent prohibitifs même si on trouve quelques articles qui concluent que la pratique peut être économiquement rentable pour l'agriculteur. La pose d'une bâche permet d'éviter un désherbage, accroît l'efficacité de l'eau et

⁷⁹ <https://www.action-agricole-picarde.com/le-desherbage-mecanique-un-outil-agronomique-de-pointe>

⁸⁰ https://geco.ecophytopic.fr/geco/Concept/Pratiquer_Le_Desherbage_Mecanique_-_Herse_Etrille

⁸¹ https://geco.ecophytopic.fr/geco/Concept/Pratiquer_Le_Desherbage_Mecanique_-_Binage

⁸² https://geco.ecophytopic.fr/geco/Concept/Pratiquer_Le_Desherbage_Electrique

surtout accélère la croissance des végétaux. Des progrès ont aussi été réalisés pour mécaniser la pose et dépose de ces éléments. La question se pose de l'impact environnemental de la production et l'utilisation de ces éléments ; une filière de recyclage des bâches plastiques s'est ainsi développée. A titre d'exemple, BASF a annoncé en 2016 la production de films de paillage biodégradables⁸³ ; leur coût s'élève alors à plusieurs centaines d'euros par hectares.

- L'occupation du sol par un couvert végétal qui doit permettre d'installer une culture tout en empêchant l'installation des adventices. La marge de manœuvre est étroite. Certains agriculteurs réussissent à conduire la production d'une culture annuelle dans une parcelle de luzerne. Une version de cette approche s'appuie sur l'utilisation de plantes compagnes au moment du semis de la culture (à titre d'exemple, voir les essais de la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire sur maïs ensilage (Chambre d'Agriculture Pays de la Loire, 2019)). Une autre consiste à cultiver des associations de différentes cultures pour occuper tout l'espace sans maîtrise de ce qui sera présent à la récolte.
- La mobilisation d'un ensemble de techniques à effet partiel et à portée préventive qui doivent limiter fortement les besoins d'interventions sur la flore adventice. On peut jouer sur tous les stades de la plante adventice pour contrecarrer son cycle. Parmi les plus souvent citées : rendre le milieu plus imprévisible en rallongeant et diversifiant les rotations, faire germer le stock à un moment inapproprié pour lui, accroître la mortalité des semences dans le sol, intercepter les semences avant leur retour au sol via le broyage ou la récolte des menues pailles ou la mobilisation d'écimeuses, accroître la prédation sur les plantules, etc. Les systèmes deviennent vite complexes et il y a peu de chance que ce qui marche quelque part soit facilement transposable à un autre endroit ou même à une autre saison. Une adaptation 'sur mesure' plutôt qu'un itinéraire 'passe partout' réduit sa diffusion et sa mobilisation. Aussi ces techniques font-elles partie des 'bonnes pratiques prophylactiques' et peu de systèmes s'appuieront uniquement sur elles. Elles seront d'autant moins mises en pratique que des solutions curatives *via* la chimie seront programmées.
- Des pistes aujourd'hui plus marginales qui imaginent de cultiver d'autres plantes comme des céréales pérennes ou de systématiser l'inter-pénétration d'une culture dans une autre en semant la suivante dans celle déjà en place.

Comme on le voit, toutes ces pistes sont soit peu mobilisées, soit relèvent du champ de la recherche. Dans tous les cas, elles ne se développeront que dans une logique d'exploitation repensée dans sa dimension de système et à condition que l'ensemble des acteurs concernés se mobilisent (R&D, collecte, appui des pouvoirs public, etc. comme évoqué en partie 4.3). Elles dépassent donc le cadre d'alternative de substitution. Dans une approche d'évaluation par usage et non molécule par molécule, ce besoin de reconception en profondeur serait sollicité.

⁸³ <https://www.cultivar.fr/nouveautes/le-paillage-ecovio-sur-mais>

5.3.3. L'appui au désherbage en grandes cultures validé dans les CEPPs

Les avancées qui sont déjà disponibles actuellement tout en étant diversement mobilisées ont pu faire l'objet de dépôt d'un dossier de reconnaissance via les Certificats d'Economie de Produit Phytosanitaire (CEPP). Ce dispositif attribue une valeur d'économie d'usage de produits phytosanitaires rattachée à l'achat ou l'utilisation d'un produit ou d'une pratique pour laquelle on peut apporter un élément de preuve de sa mobilisation. Ainsi, l'achat d'une herse étrille est-il porteur d'une économie d'herbicide, le recours à un outil d'aide à la décision est favorable à un ajustement des interventions, l'achat d'agents de biocontrôle (comme des trichogrammes) est la signature d'une substitution à un traitement insecticide, etc.

Nous avons pu consulter le dernier catalogue des CEPPs et extraire les fiches qui concernent la gestion des adventices en contexte de grande culture. Ceci est reproduit dans le tableau ci-dessous. On retrouve logiquement en premier lieu ce qui permet de réaliser un désherbage mécanique. L'optimisation du désherbage chimique y trouve aussi sa place.

Tableau 17 : Extrait du catalogue des CEPPs

Titre officiel du CEPP	Levier	Référence	Valeur CEPP publiée	Culture concernée	Exemples de matériels éligibles	Valeur en CEPP	Unité	Code fiche finale
Désherber les cultures en rang au moyen d'un outil de désherbage mécanique, Mettre en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation	Agroéquipement, Prestation	Bineuses inter-rang	22,5	Betteraves, Soja, Tournesols, Maïs	Bineuses des marques suivantes : Algritec, Bednar, Carre, Franquet, Garford, Gaspardo, Kongskilde, Quivogne, Razol, Sicama, Stekete, Einbock, Hatzenbichler, Agronomic, Monosem	0,45	Ha	2017-030, 2021-086
Désherber les cultures au moyen d'un outil de désherbage mécanique autonome	Agroéquipement	Désherbage autonome Dino	39	Carottes, Haricots, Vignes, Choux, Artichaut, Céléris, Chicorées, Epinards, Laitues, Oignons, Poireaux, Tomates	Marque NAIO modèle DINO	1,3	Ha	2019-060
Désherber les cultures au moyen d'un outil de désherbage mécanique autonome	Agroéquipement	Désherbage autonome Oz	10,4	Carottes, Haricots, Choux, Artichaut, Céléris, Chicorées, Epinards, Laitues, Oignons, Poireaux, Tomates	Marque NAIO modèle OZ	1,3	Ha	2019-060
Réduire les doses d'herbicides au moyen d'agroéquipements permettant l'application localisée sur le rang, Mettre en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation	Agroéquipement, Prestation	Désherbineuse	30,75	Betteraves, Soja, Tournesols, Maïs	Agronomic Desherbineus Carre Desherbineuse Monosem Desherbineuse	1,23	Ha	2017-031, 2021-086
Désherber les cultures en rang au moyen d'un outil de désherbage mécanique, Mettre	Agroéquipement, Prestation	Herse étrille avec réglage des	35	Betteraves, Soja, Tournesols, Maïs, Céréales	Treffler Herse étrille avec réglage des dents par ressort	0,7	Ha	2017-030, 2021-086

en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation		dents par ressort						
Désherber les cultures en rang au moyen d'un outil de désherbage mécanique, Mettre en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation	Agroéquipement, Prestation	Houe rotative	35	Betteraves	Yetter Houe rotative, Carre Houe rotative, Hatzenbichler Houe rotative	0,7	Ha	2017-030, 2021-086
Désherber les cultures en rang au moyen d'un outil de désherbage mécanique, Mettre en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation	Agroéquipement, Prestation	Moulinets de désherbage sur le rang	35	Betteraves	Kress lot de moulinets pour bineuse, Steketee lot de moulinets pour bineuse	0,7	Ha	2017-030, 2021-086
Réduire les doses d'herbicides au moyen d'agroéquipements permettant l'application localisée sur le rang, Mettre en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation	Agroéquipement, Prestation	Rampe de localisation	19,5	Betteraves, Soja, Tournesols, Maïs	Marechal Rampe de localisation, Sopema Rampe de localisation	0,78	Ha	2017-031, 2021-086
Désherber les cultures en rang au moyen d'un outil de désherbage mécanique, Mettre en œuvre un matériel de désherbage mécanique loué ou via à une prestation	Agroéquipement, Prestation	Rotoétrille	35	Betteraves	Annaburger Rotoétrille, Einbock Rotoétrille	0,7	Ha	2017-030,2021-086

Note : Un CEPP équivaut à l'économie d'un IFT.

La valeur CEPP publiée est donnée à l'échelle de l'équipement dans les arrêtés. La valeur en CEPP d'un équipement est calculée par le produit de l'économie de produits phytopharmaceutiques à l'hectare et du débit de chantier de ce dernier.

6. Alternatives au S-métolachlore et impacts technico-économiques de leur mobilisation sur les exploitations agricoles

6.1. Utilisations du S-métolachlore, exemples d’alternatives et impacts technico-économiques de leur mobilisation

Afin d’évaluer les marges de manœuvre pour la mobilisation d’alternatives au S-métolachlore, nous commençons par caractériser son utilisation pour les principales cultures concernées, à savoir le maïs grain, le maïs fourrage, le soja, et le tournesol. Nous faisons ce travail en deux temps : le premier consiste à décrire les pratiques mises en œuvre dans ces cultures, à détailler des itinéraires techniques types, ainsi qu’à identifier les potentielles alternatives, qu’elles soient chimiques ou non. Ceci fait, l’objectif devient la quantification de l’impact technico-économique de la mobilisation du S-métolachlore sur ces cultures, par rapport aux alternatives. Le recours à cette molécule induit en effet des pratiques différentes, et nous nous attachons à mettre en évidence la présence (ou non) d’avantages pour les agriculteurs, en termes techniques ou économiques, à l’utilisation de la molécule relativement à ses alternatives. Pour cela, nous avons recours à l’analyse statistique de la base de données issue du système d’information Agrosyst et du réseau DEPHY. Le réseau DEPHY, initié dans le cadre du plan Ecophyto, rassemble quelques 2 000 exploitations agricoles volontaires mettant en place une réduction progressive de l’utilisation des produits phytosanitaires.

Ce réseau présente un double avantage. D’une part, il capture de fait le phénomène que nous souhaitons estimer : les agriculteurs qui le composent s’engageant volontairement dans une démarche de réduction des produits phytosanitaires, DEPHY contient quantité d’exemples d’alternatives chimiques et non-chimique au S-métolachlore. D’autre part, les bases de données issues de DEPHY contiennent un nombre élevé d’indicateurs, techniques et économiques, directement disponibles à différentes échelles d’agrégation (du passage d’un intrant à l’échelle du système de culture entier), qui ne sont pas nécessairement disponibles dans d’autres bases de données agricoles (telles que les données issues des enquêtes Pratiques Culturelles).

Notre approche a pour objectif d’être en mesure de déterminer l’existence, ou non, d’avantages technico-économiques à l’utilisation du S-métolachlore, par rapport i) à un désherbage chimique sans S-métolachlore (face aux solutions chimiques, donc), et ii) à des pratiques culturelles se passant de pesticides (face aux solutions non-chimiques), pour chacune des cultures disponibles dans DEPHY. Pour ce faire, nous commençons par prendre en compte toutes les données de DEPHY quelle que soit la campagne (de 2009 à 2021), à l’échelle de la parcelle. Nous effectuons ensuite un tirage aléatoire, afin de ne garder au maximum qu’une

seule parcelle d'une même exploitation, pour chaque campagne. Cela signifie qu'une même parcelle peut être présente plusieurs fois dans l'analyse pour des campagnes différentes, mais que deux parcelles de la même exploitation ne peuvent être considérées ensemble pour une même campagne. L'objectif de cette démarche est de ne pas donner un poids trop fort à une exploitation atypique ayant un grand nombre de parcelles enquêtées. Nous séparons enfin les parcelles restantes en 4 groupes, selon leurs pratiques de désherbage. La définition de ces quatre groupes est donnée par le **Tableau 18**.

Ainsi, pour la comparaison aux solutions chimiques, nous comparons le groupe 1 au groupe 2. En pratique, le groupe 3 (pas de désherbage chimique, mais présence d'autres pesticides) n'apparaît que très rarement, et ne sera généralement pas inclus dans l'analyse. Il reste conceptuellement intéressant, en ce qu'il représente les agriculteurs se passant du désherbage chimique, tout en restant dans une logique conventionnelle et sans pour autant bénéficier des avantages de prix attachés au label AB. Nous avons ainsi été amenés à comparer des parcelles appartenant à des systèmes conventionnels mobilisant du S-métolachlore (groupe 1), à des parcelles appartenant à des systèmes en agriculture biologique (groupe 4), pour la comparaison aux solutions non-chimiques. Ces systèmes diffèrent par leurs successions culturales, travail du sol, longueur de la rotation, etc.

Tableau 18 : Groupes utilisés pour l'analyse statistique de DEPHY

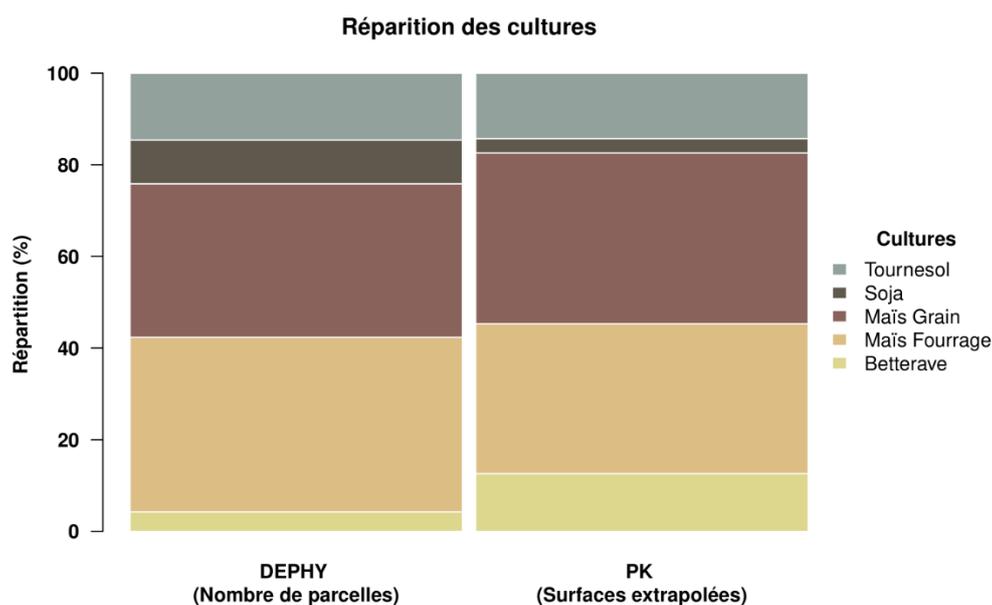
	Description	IFT Herbicides	IFT Total
Groupe 1	Ceux qui utilisent le S-métolachlore	> 0	> 0
Groupe 2	Ceux qui ont des cultures sur lesquelles le S-métolachlore est autorisé mais qui n'en utilisent pas → Utilisent un (ou des) autre(s) herbicide(s)	> 0	> 0
Groupe 3	Ceux qui n'utilisent pas d'herbicides mais utilisent d'autres pesticides → Utilisent des alternatives non chimiques pour le désherbage	= 0	> 0
Groupe 4	Ceux qui n'utilisent aucun pesticide chimique → Inclut ceux en AB	= 0	= 0

Notons dès à présent que la définition de nos groupes englobe mais n'est pas strictement limitée aux alternatives au S-métolachlore telles que nous les avons définies en partie **1.3.3** : ainsi, les parcelles du groupe 2 peuvent mobiliser différentes solutions de désherbages chimiques, dépassant potentiellement le cadre du substitut le plus similaire (identifié dans les retours du terrain comme étant le diméthénamide-P). Le cas du dmta-P, ainsi que de quelques autres herbicides, est abordé plus précisément en partie **6.4**.

Si DEPHY a ses avantages, il n'est toutefois pas possible d'y trouver certaines informations pourtant importantes pour la comparaison des performances économiques, dont notamment

le montant des aides touchées par les agriculteurs, mais aussi la flore présente sur chaque parcelle. Au-delà de l'aspect économique, DEPHY soulève une interrogation légitime : puisque les agriculteurs le composant réduisent volontairement l'usage de la chimie, sont-ils représentatifs de l'agriculture française, et, dans le cas contraire, est-il possible de quantifier la différence ? Afin de répondre à cette question, nous représentons dans les **Figure 19** et **Figure 20** les répartitions des cultures dans DEPHY et dans le résultat des enquêtes Pratiques Culturelles (PK), plus représentatives de la ferme France, ainsi que la répartition des types de désherbage par culture, pour l'année culturale de référence 2017 (dernière enquête PK grandes cultures disponible). A noter que la structure des bases de données impose de regarder d'une part un nombre de parcelles pour DEPHY et d'autre part des surfaces extrapolées pour les enquêtes PK. On constate que la répartition des cultures est assez similaire, avec toutefois une sous-représentation de la betterave, et une sur-représentation du soja dans DEPHY. En ce qui concerne le type de désherbage en revanche, on note une nette sur-représentation du désherbage non-chimique (groupe 4), au détriment du recours au S-métolachlore (groupe 1), dans DEPHY (tout particulièrement en soja).

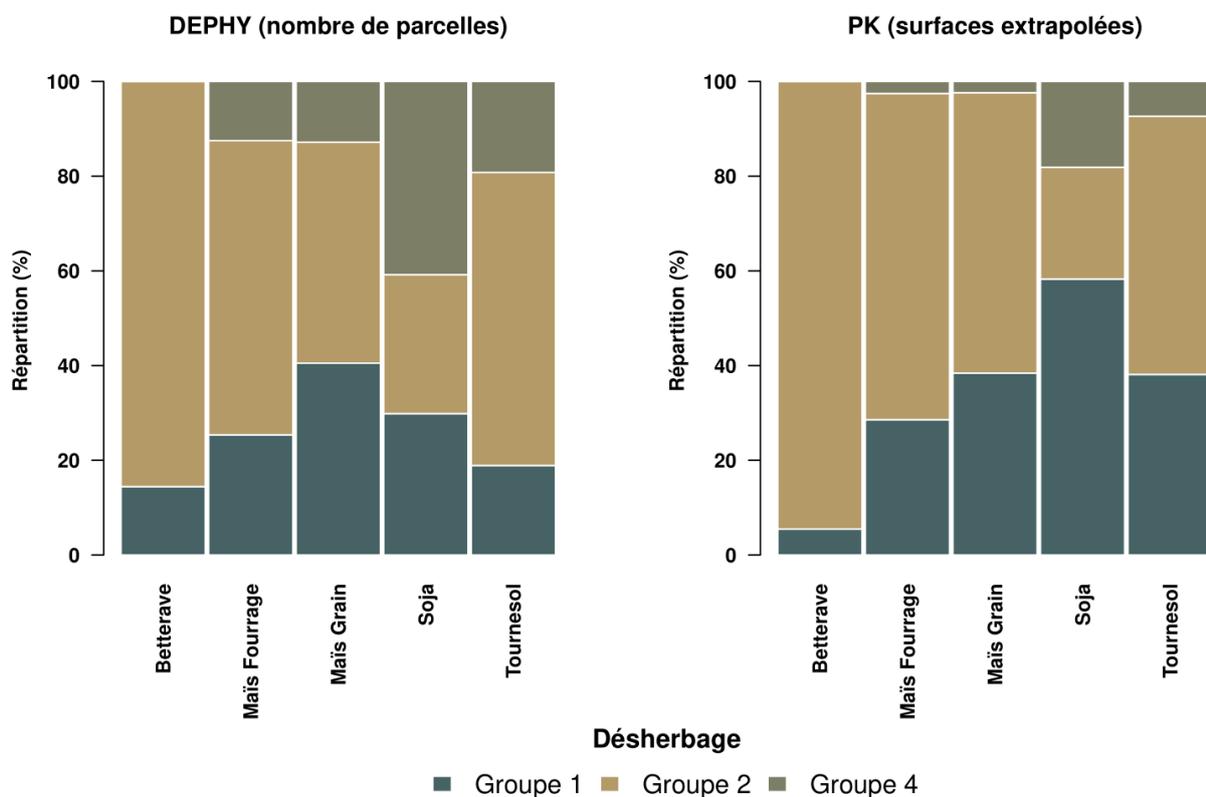
Figure 19 : Répartition des cultures dans DEPHY et PK (2017)



Sources : Réseau DEPHY et enquêtes PK (2017)

Note : le groupe 3 étant quasiment absent de DEPHY, il n'est pas représenté.

Figure 20 : Répartition des cultures par type de désherbage dans DEPHY et PK (2017)



Sources : Réseau DEPHY et enquêtes PK (2017)

Note : le groupe 3 étant quasiment absent de DEPHY, il n'est pas représenté.

Au-delà des cultures et pratiques de désherbages représentées, DEPHY et les résultats des enquêtes PK partagent quelques indicateurs techniques que l'on peut comparer, afin de mettre en évidence de potentielles différences. Ainsi, la [Figure 21](#) compare les IFT totaux moyens par culture pour DEPHY et PK, la [Figure 22](#) fait de même pour les IFT herbicide, et la [Figure 23](#) compare les rendements moyens par culture, toujours pour 2017, date des dernières enquêtes PK en grandes cultures auxquelles nous avons accès au moment de l'écriture de ce rapport. Notons l'absence des résultats pour la betterave, en raison du faible nombre de parcelles concernées cette année dans DEPHY. L'objectif de ces graphiques n'est pas de comparer les groupes entre eux (ce que nous ferons plus tard), mais de comparer DEPHY aux enquêtes PK. Le groupe 3 n'est pas présenté sur les graphiques en raison de sa trop grande rareté au sein des parcelles de DEPHY. Sur chaque graphe, un intervalle de confiance à 95% pour la moyenne est donné, et une étoile indique s'il existe une différence significative. On constate que les IFT, totaux ou herbicides, sont relativement similaires entre PK et DEPHY, bien que significativement supérieurs pour PK de manière ponctuelle. Le même constat s'applique aux rendements moyens, globalement très proches entre DEPHY et les enquêtes PK. Ceci nous a conforté dans notre choix d'utiliser les données issues du réseau DEPHY afin d'estimer les impacts de l'utilisation du S-métolachlore pour les agriculteurs, choix initialement motivé par la logique volontaire des agriculteurs présents dans DEPHY, et par la disponibilité d'un grand

nombre d'indicateurs économiques déjà calculés. En conséquence, on gardera en tête que les résultats des analyses technico-économiques, présentés dans les parties qui suivent, sont valables pour DEPHY uniquement. Les effectifs concernés ainsi que les similitudes sur les rendements et les IFT avec les enquêtes PK laissent penser que les conclusions ont un caractère généralisable. Néanmoins, seule une analyse rigoureuse de ces dernières viendrait le confirmer. Du fait de la sortie attendue de la nouvelle enquête PK grandes cultures pour la campagne 2021 et des contraintes d'accès liées au secret statistique, cette double analyse n'a pas été conduite pour ce rapport.

Figure 21 : IFT total dans DEPHY et PK (2017)

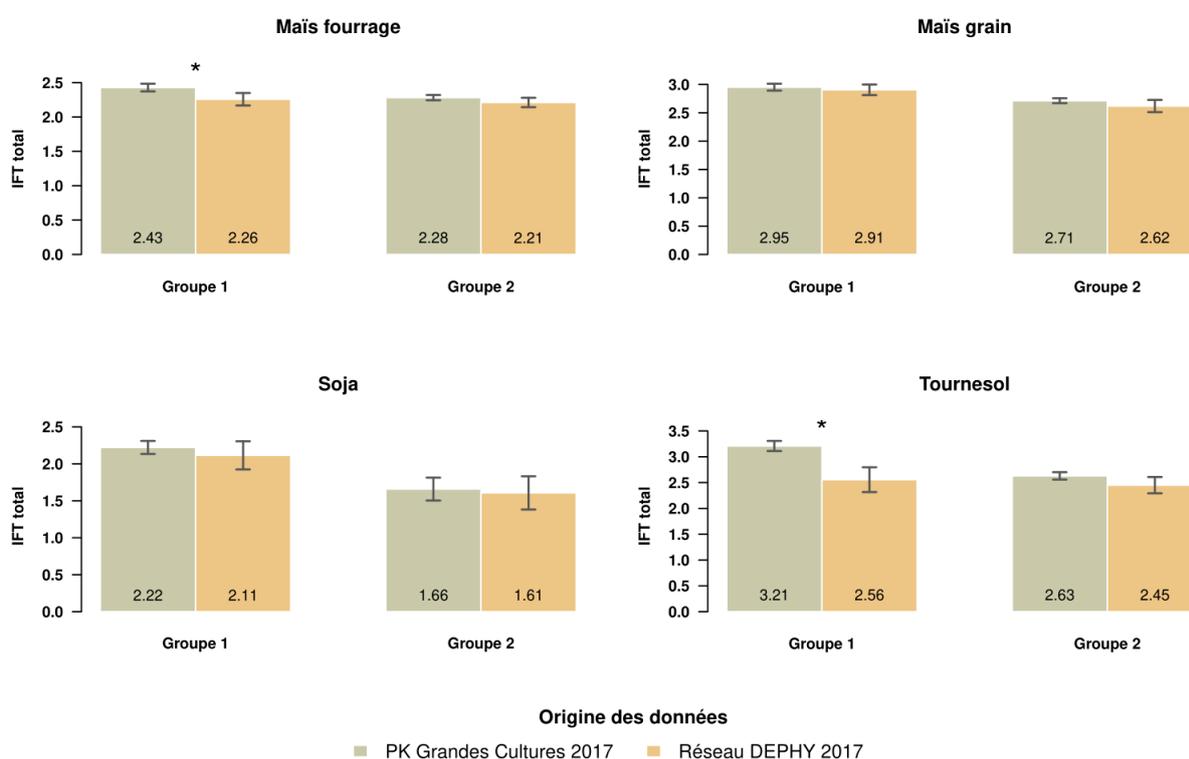


Figure 22 : IFT herbicide dans DEPHY et PK (2017)

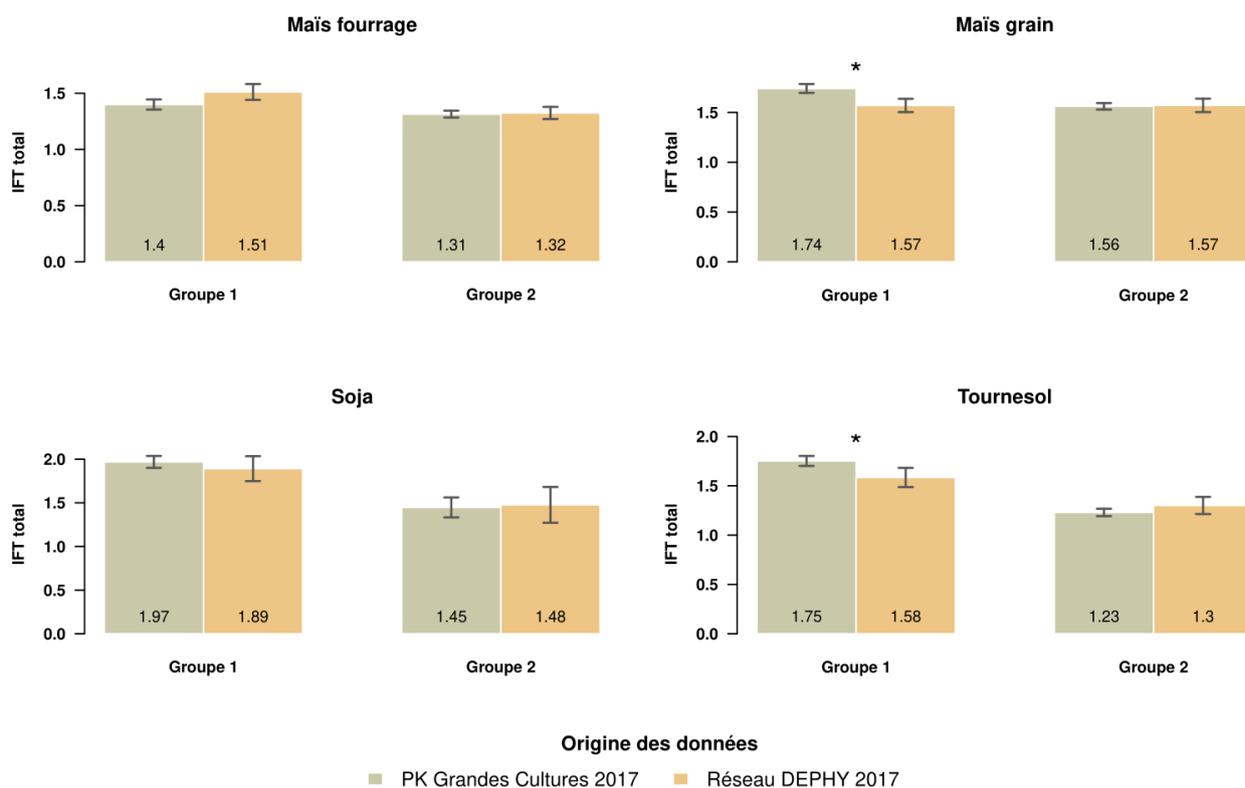
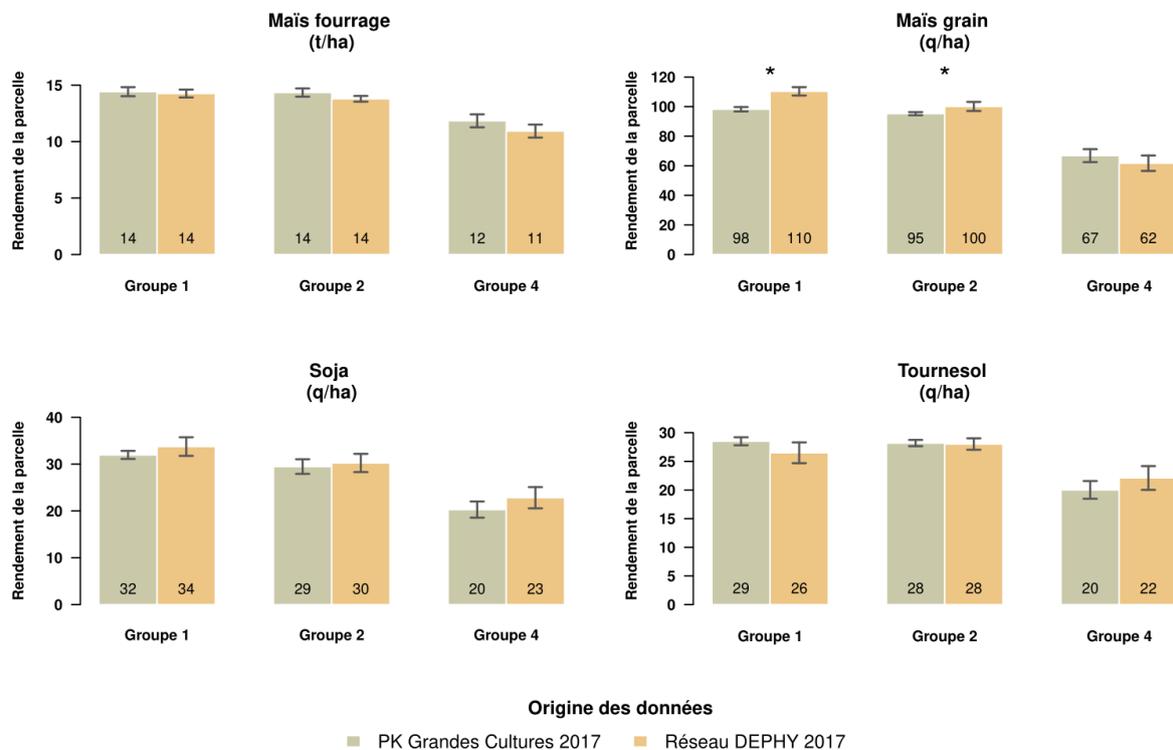


Figure 23 : Rendements dans DEPHY et PK (2017)



Note : Dans les figures 21 et 22, le groupe 4 a un IFT (total et herbicide, respectivement) nul par définition. Dans les figures 21, 22 et 23, le groupe 3 est absent car non disponible en effectif suffisant dans les jeux de données.

Pour une culture donnée, les parcelles de DEPHY post-tirage aléatoire forment notre échantillon statistique. A partir de là, nous cherchons à mettre en évidence la présence ou l'absence de différences technico-économiques entre les groupes. Il est alors nécessaire de s'assurer de ne comparer que ce qui est comparable, et de ne pas imputer des différences intergroupes à l'utilisation du S-métolachlore, quand ces différences pourraient en réalité dépendre de facteurs externes dits confondants (spécialisation régionale, types de sol ou conditions climatiques particulières par exemple). Formellement, un facteur confondant est une variable aléatoire ayant une influence à la fois sur la variable que nous cherchons à estimer (*e.g.* le rendement) et sur la ou les variables explicatives (en l'occurrence, l'utilisation de S-métolachlore). En pratique, ces facteurs peuvent fausser la relation de cause à effet que l'on cherche à étudier, et leur non-prise en compte génère un biais important lors de la comparaison directe des résultats moyens de différents groupes (Smith et Ebrahim, 2002). Pour pallier cela, nous nous appuyons sur une méthode largement utilisée en statistiques médicales afin d'estimer les effets d'un traitement en présence de facteurs confondants : la pondération par les scores de propension⁸⁴ (Rosenbaum et Rubin, 1983 ; Hirano *et al.*, 2003 ; Austin, 2011). Cette méthode est de plus en plus utilisée pour l'évaluation des politiques publiques (Essama-Nssah, 2006), et a été mobilisée afin d'estimer le coût de la sortie du glyphosate pour les agriculteurs (Carpentier *et al.*, 2020). De manière générale, et pour un indicateur donné (*e.g.* le rendement), la pondération par les scores de propension consiste à estimer la différence moyenne entre deux groupes (*e.g.* groupe 1 – avec S-métolachlore, et groupe 2 – autre(s) herbicide(s)) en tenant compte des facteurs confondants identifiés. La prise en compte de ces derniers s'effectue en pondérant les parcelles d'un groupe en fonction de leur proximité statistique avec les parcelles de l'autre groupe, proximité estimée à partir des facteurs confondants observables.

Formellement, pour une parcelle notée p , on introduit la notation décrite dans le [Tableau 19](#).

⁸⁴ Il existe de fait une famille entière de méthodes reposant sur les scores de propension, dont les principales sont la stratification par les scores de propension, l'appariement (*matching*) et la pondération. Le choix de cette dernière s'explique par le meilleur respect des hypothèses de la méthode que la pondération a permis dans notre cas (voir Annexe 9 pour plus de détails).

Tableau 19 : Notations pour la pondération par les scores de propension

Notation	Description
Z_p	Indique si la parcelle p a reçu du S-métolachlore ($Z_p = 1$) ou non ($Z_p = 0$)
Y_p	Variable d'intérêt pour la parcelle p , indicateur que l'on cherche à estimer (e.g. rendements, IFT...), valeurs numériques
X_p	Ensemble des facteurs confondants observables de la parcelle p , covariables identifiées comme pouvant avoir une influence sur les résultats des exploitations et le choix d'utiliser du S-métolachlore.
e_p	Score de propension associé à la parcelle p
W_p	Score de pondération associé à la parcelle p
ATE	<i>Average Treatment Effect</i> , effet moyen estimé du traitement sur la variable d'intérêt

Cette méthode consiste à associer à chaque parcelle un score de propension (e_p), défini comme :

$$e_p = P(Z_p = 1 \mid X_p)$$

Ce score correspond ainsi à la probabilité, pour chaque parcelle, de recevoir du S-métolachlore, au regard des facteurs confondants disponibles. Il existe de nombreuses manières d'estimer ce score : régression logistique (Cox, 1958), forêts aléatoires (Ho, 1995), SVM (Support Vector Machine ; Cortes et Vapnik, 1995), réseaux de neurones (Bishop, 1995), etc. Nous avons choisi de l'estimer par une méthode nommée *Covariate Balancing Propensity Score* (CBPS ; Imai et Ratkovic, 2014) permettant de maximiser à la fois la qualité du score (sa capacité prédictive) et l'équilibre des facteurs confondants après pondération, qui est une hypothèse importante du modèle. Il est en effet nécessaire de s'assurer que les moyennes standardisées de chaque facteur confondant, après ajustement par les scores de propension, ne diffèrent pas trop entre le groupe traité au S-métolachlore (groupe 1) et celui sans S-métolachlore (groupe 2 ou groupe 4 dans nos analyses), faute de quoi on ne peut considérer les groupes de parcelles comme étant suffisamment comparables pour l'analyse (l'Annexe 9 détaille ceci). Ainsi, le score de propension permet de synthétiser et de décrire la situation de chaque parcelle, caractérisée par des facteurs confondants, et donne sa propension à être traitée au S-métolachlore : un score proche de 1 décrit une situation identifiée comme favorable à l'utilisation du S-métolachlore, et inversement pour un score proche de 0, tandis qu'un score proche de 0,5 décrit une situation « neutre », dans laquelle il est équiprobable de trouver des parcelles avec ou sans S-métolachlore.

Dans ce rapport, nous avons estimé les scores de propension à partir des facteurs confondants suivants :

- Année de la campagne issue de DEPHY afin de prendre en compte le contexte économique et géopolitique influant les prix.
- Typologie de la rotation (décrit la rotation-type de la parcelle, issu de DEPHY, voir Annexe 7 pour les détails).
- Le nombre de cas de résistance aux herbicides observés dans le département de la parcelle, pour les vulpins, les ivraies, les panics, les sétaires, les digitaires et les chénopodes (données issues du réseau R4P d'INRAE, (R4P, 2020)).
- Des variables météorologiques (moyennes annuelles, agrégées à l'échelle de la petite région agricole. Les données climatiques SAFRAN proviennent de Météo-France et ont été téléchargées via la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE).
- Des variables pédologiques physiques (Ballabio *et al.*, 2016) et chimiques (Ballabio *et al.*, 2019) (moyennes à l'échelle de la petite région agricole, données issues de l'ESDAC (ESDAC ; Panagos *et al.*, 2012)).
- Typologie de la ruralité (description de la situation socio-économique de la ruralité, à l'échelle de la commune (Hilal *et al.*, 2022)).

Ces facteurs devraient capturer une partie des éléments jouant à la hausse ou à la baisse sur le risque d'héberger des PSD ou des populations résistantes, elles-mêmes influant la probabilité d'avoir recours au S-métolachlore.

Les scores de propension permettent ensuite de définir, pour chaque parcelle p , un poids W_p . Il existe plusieurs manières de définir W_p , et nous avons utilisé l'*Inverse Probability of Treatment Weighting* (IPTW) :

$$W_p = \begin{cases} \frac{1}{e_p} & \text{si la parcelle a reçu du S-métolachlore} \\ \frac{1}{1 - e_p} & \text{si la parcelle n'a pas reçu de S-métolachlore} \end{cases}$$

ou, écrit autrement :

$$W_p = Z_p \cdot \frac{1}{e_p} + (1 - Z_p) \cdot \frac{1}{1 - e_p}$$

Concrètement, une parcelle recevant du S-métolachlore aura un poids d'autant plus élevé qu'elle se trouve dans une situation identifiée comme étant propice aux alternatives (score de propension faible). Inversement, une parcelle n'en recevant pas aura un poids d'autant plus fort qu'elle se trouve dans les conditions identifiées comme propices au S-métolachlore (score de propension élevé). Notons immédiatement qu'une telle définition interdit les scores de propension à 0 ou à 1. Ceci constitue l'une des hypothèses fondamentales de la méthode : il ne doit pas être possible d'identifier de manière certaine si une parcelle a reçu ou non le

traitement, seulement à partir des facteurs confondants⁸⁵, et donc qu'il existe des facteurs inobservables qui influencent l'usage du S-métolachlore. En pratique, il est également recommandé d'exclure de l'analyse les parcelles ayant un score de propension « trop extrême », soit trop proche de 0 ou de 1, afin de ne pas donner trop de poids à une parcelle atypique (Kang *et al.*, 2016).

Ensuite, une étape essentielle consiste à vérifier l'équilibre des facteurs confondants, après pondération, entre le groupe avec S-métolachlore et le groupe sans. Cette étape permet de vérifier la qualité de la pondération par les scores de propension, et donc des estimations qui en dépendent. De plus amples détails sur cette vérification sont présentés en Annexe 9.

Disposant du poids de chaque parcelle, on estime ensuite une moyenne pondérée de la variable d'intérêt Y , pour chaque groupe G :

$$\bar{Y}_G = \frac{\sum_{p \in G} W_p \cdot Y_p}{\sum_{p \in G} W_p}$$

Enfin, on peut estimer l'effet moyen du traitement, ATE , comme la différence des moyennes pondérées du groupe avec S-métolachlore et du groupe sans. Nous répétons l'opération deux fois : une pour comparer les groupes 1 et 2 (avantages du S-métolachlore face à d'autres herbicides), puis pour comparer les groupes 1 et 4 (face aux alternatives non-chimiques). En plus de l'effet moyen, nous avons également estimé son écart-type, ainsi qu'un seuil de significativité de ce dernier, *via* des méthodes de *bootstrap* (Davison et Hinkley, 1997).

Les indicateurs technico-économiques ainsi estimés, tous issus de DEPHY, sont les suivants :

- Rendements
- Fréquence de travail du sol
- Fréquence de désherbage mécanique
- IFT total
- IFT herbicide
- Charges opérationnelles (PPP + fertilisation + semis + irrigation + substrats + pots)
- Charges de mécanisation (carburant + charges fixes + réparations + pneumatique + huile)
- Consommation de carburant
- Coût de la main d'œuvre tractoriste
- Produit brut (rendements × prix des récoltes)
- Marge brute (produit brut – charges opérationnelles)
- Marge directe (marge brute – charges de mécanisation – coût de la MO tractoriste)

⁸⁵ Intuitivement on comprend pourquoi : cela reviendrait dans le cas de la médecine à vouloir tester l'effet d'un médicament sur quelqu'un qui mourra avant de développer la maladie ou intégrer un patient qui est allergique à ce type de traitement, par exemple.

Ces indicateurs, dont une description plus complète est donnée en Annexe 6, et plus particulièrement les indicateurs économiques, soulèvent une dernière interrogation importante. Dans DEPHY, les indicateurs économiques sont en général standardisés, et millésimés. Standardisé : cela signifie que chaque prix utilisé à la construction d'un de ces indicateurs (*i.e.* prix des récoltes) est tiré d'un référentiel, et non renseigné directement par l'agriculteur. Millésimé : pour une culture donnée, le référentiel des prix des récoltes contient un prix par campagne (ou plutôt deux en réalité : un pour le conventionnel, plus un prix par campagne pour le bio).

Dès lors, il devient nécessaire de corriger la variation interannuelle des prix, puisque nous sommes amenés à rassembler dans un même groupe des parcelles d'années différentes, donc avec des indicateurs économiques exprimés en euros courants d'années différentes. Cela consiste à déflater, afin de ramener les indicateurs économiques à une base commune pour pouvoir les comparer. Or, les différents indicateurs disponibles dans DEPHY (prix des récoltes, charges d'intrants, de mécanisation, de main d'œuvre...) ne sont pas tous soumis aux mêmes variations de prix. C'est pourquoi nous avons retenu de déflater chaque agrégat économique en choisissant le plus pertinent parmi des indicateurs différents. Ainsi, nous avons corrigé le prix des récoltes par l'indice IPPAP (Indice mensuel des prix agricoles à la production⁸⁶), les charges opérationnelles (liées aux intrants) et de mécanisation (liées aux équipements matériels) par l'IPAMPA (Indice mensuel des prix d'achat des moyens de production agricoles⁸⁷), et les charges de main d'œuvre par l'IPC (Indice des prix à la consommation, notamment utilisé pour les ajustements du SMIC⁸⁸). Enfin, il nous semble important de noter que les indicateurs économiques issus de DEPHY (produit brut et différentes marges) sont calculés en attribuant une valeur marchande à ce qui est autoconsommé, soit donc en partant du principe que l'entièreté de la production est vendue, ce qui est rarement le cas en polyculture-élevage.

Dans la partie concernant le maïs grain, ainsi que dans les suivantes concernant les autres cultures pouvant recevoir du S-métolachlore, nous nous attachons à présenter quelques itinéraires techniques mobilisés par les agriculteurs, avec ou sans S-métolachlore, avant de donner les résultats de l'analyse économique. Nous sommes conscients que chaque situation est unique, que ce soit par les caractéristiques pédoclimatiques des parcelles concernées, le système de production dans lequel ces parcelles s'insèrent, la flore adventice présente résultant d'un historique, le contexte économique, social et environnemental avec lesquels l'agriculteur doit composer, etc. Les itinéraires techniques présentés le sont donc à titre d'exemples, et il est bon de rappeler que les agriculteurs qui font le choix de ne pas recourir au S-métolachlore n'ont sans doute pas, par chance ou expérience, de difficulté majeure quant à la gestion de graminées estivales adventices. Ces exemples n'ont donc pas vocation à être

⁸⁶ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/indicateur/p1657/description>

⁸⁷ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/indicateur/p1657/description>

⁸⁸ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/indicateur/p1657/description>

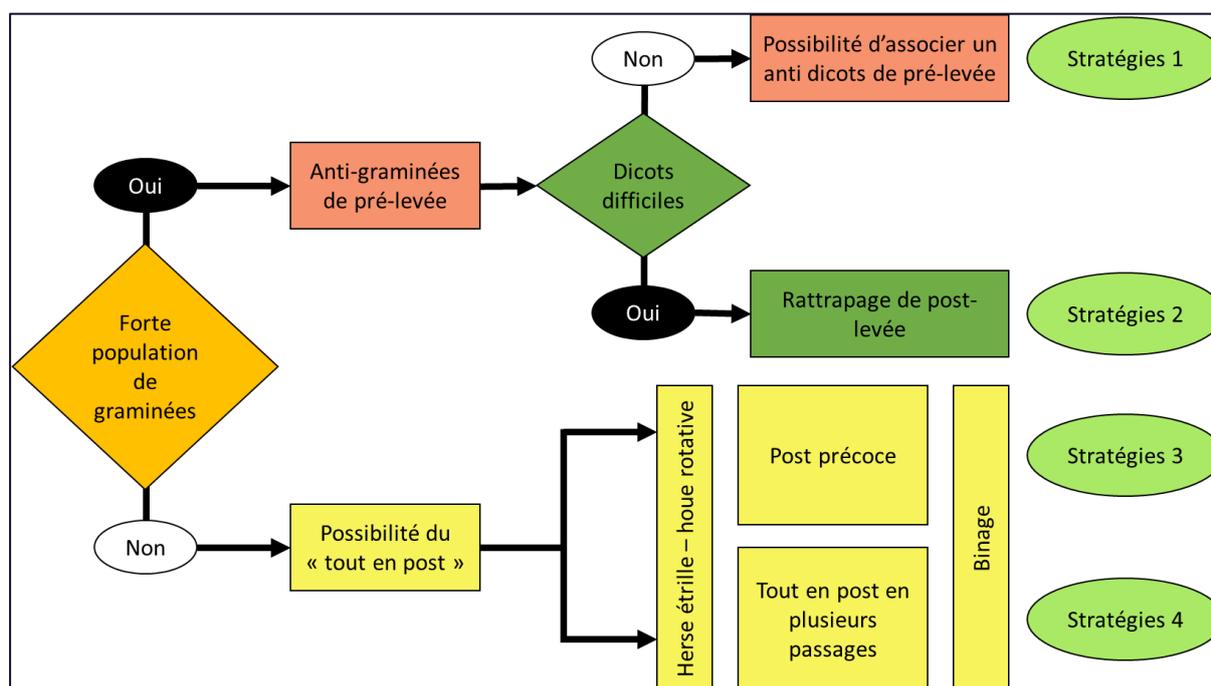
représentatifs de l'ensemble des situations existantes. Une large documentation présente de tels itinéraires techniques et nous renverrons le lecteur à certaines de ces publications. Le lecteur pourra plus largement se référer aux publications des instituts techniques, des chambres d'agriculture et autres organisations professionnelles agricoles qui publient régulièrement des références techniques sur les cultures pouvant être traitées au S-métolachlore.

6.1.1. Maïs Grain

6.1.1.1. Exemples d'itinéraires techniques avec et sans S-métolachlore

Pour débiter par une illustration synthétique, nous avons trouvé assez exemplaire la clé de raisonnement de la stratégie de désherbage proposée par la chambre d'agriculture d'Alsace. Elle concentre et hiérarchise les éléments fréquemment évoqués par les acteurs de terrain. Nous la reprenons dans la **Figure 24** ci-dessous.

Figure 24 : Stratégies de désherbage contre les adventices annuelles en maïs grain



Source : reproduction du schéma proposé par la Chambre d'Agriculture d'Alsace dans son Guide des grandes cultures et des cultures fourragères 2022 (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022).

Dans le cadre d'une situation de forte présence de graminées et sans dicotylédones difficiles, la Chambre d'Agriculture d'Alsace propose différents programmes de désherbage incluant ou non le S-métolachlore. L'itinéraire technique proposé inclut un seul traitement de pré-levée, et éventuellement un traitement de post-levée en cas d'échec. Le traitement de pré-levée peut combiner du S-métolachlore (exemple : Dual Gold à 1,1 L/ha), du thiencarbazonne et de l'isoxaflutole (exemple : Adengo xtra à 0,33 L/ha) ; il peut aussi combiner du diméthénamide-P (exemple : Isard à 1 L/ha), du thiencarbazonne et de l'isoxaflutole (exemple : Adengo xtra à 0,33 L/ha).

Dans le cadre d'une situation de forte présence de graminées et de dicotylédones difficiles, la Chambre propose un traitement de pré-levée incluant du S-métolachlore (exemple : Camix à 2,5 L/ha) ou non (exemple : Isard à 1,2 L/ha contenant du diméthénamide-P) suivi d'un traitement de post-levée en rattrapage, au stade 2 à 6 feuilles, pour contrôler le reste de l'infestation (exemple : Elumis à 0,7 L/ha contenant de la mésotrione et du nicosulfuron,

auquel il est préconisé d'ajouter un complément ciblant la ou les dicotylédones difficiles qui sont présentes).

Pour tenir compte des contraintes de calendrier, les éleveurs en conventionnel peuvent avoir tendance à privilégier des traitements de pré-levée. En effet, cela leur permet de se libérer du temps, notamment au moment des foins, puisque ces travaux peuvent se superposer au moment où serait pratiqué un traitement en post-levée. Dans l'autre sens, ils peuvent bénéficier de facilités de conduite selon leurs attentes sur la part autoconsommée (impact jugé plus bénin de la présence de certaines adventices, flexibilité dans la date de consommation, etc.).

Le désherbage mécanique sans chimie est également possible. Nous détaillons ici, à titre d'exemple, un itinéraire technique d'une conduite en agriculture biologique rencontrée dans le réseau DEPHY (discussion avec un ingénieur du réseau). Il commence par la destruction du couvert végétal (détruit puis incorporé au sol, ou bien fauché) suivi d'un travail du sol (labour ou décompactage à 20 cm) et du semis. Ce dernier est plus profond et plus tardif en bio qu'en conventionnel (entre fin avril et mi-mai en bio). Suivront ensuite de 2 à 4 passages de herse étrille ou houe rotative (d'abord à l'aveugle en plein en pré-levée du maïs dont le semis a pu se faire à une profondeur accrue, puis en plein en post-levée du maïs, à son stade 4 feuilles) et 1 à 2 binages. Le nombre de passages est souvent moindre pour les éleveurs que pour les céréaliers (de 2 à 4 passages en moins) ; la présence de prairie et de méteil dans la rotation mobilisée par les éleveurs est propice à réduire la pression en adventices, particulièrement en graminées.

Il est également possible de combiner désherbage chimique et mécanique. Nous prenons l'exemple présenté par la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire également dans le cadre du réseau DEPHY (Chambre d'Agriculture Pays de la Loire, 2020). Tout d'abord, un désherbage chimique associant nicosulfuron et mésotrione est réalisé au stade 4 feuilles du maïs en un seul passage. Puis l'agriculteur bine ses parcelles au stade 8-10 feuilles du maïs avant la fermeture du couvert. A noter que l'agriculteur en question est éleveur et inclut donc des prairies dans sa rotation ainsi que du « labour simplifié » à l'aide d'un compacteur combiné. Arvalis publie régulièrement des guides techniques relatifs à la culture de maïs (Choisir et Décider - maïs) sur toutes les régions concernées. A titre d'exemples, des guides relatifs aux régions Centre Val de Loire, Ile de France ou Sud-Ouest sont disponibles (Arvalis, 2021 ; Arvalis 2022a ; Arvalis 2022b).

6.1.1.2. *Analyse de DEPHY*

Pour chacun des indicateurs d'intérêt, les estimations des moyennes pondérées des groupes 1 (avec S-métolachlore) et 2 (autre(s) herbicide(s)), obtenues selon la méthodologie présentée

plus haut⁸⁹, sont présentées dans le **Tableau 20**. Ces estimations sont accompagnées de celle de l'effet moyen du traitement (ATE), ainsi que de son écart-type, obtenu par *bootstrap*. Le code couleur renseigne sur la significativité de la différence entre les deux groupes (gris = non significatif, vert = significativement supérieur dans ce groupe, orange = significativement inférieur dans ce groupe, significativité à 5% obtenu par *bootstrap*). La même chose comparant le S-métolachlore aux alternatives non-chimiques (groupe 4) est présentée dans le **Tableau 21**. Notons immédiatement la différence entre les indicateurs du groupe 1 lors de sa comparaison au groupe 2, et lors de sa comparaison au groupe 4 (e.g. le nombre de parcelles qui n'est pas le même) : afin de respecter certaines des hypothèses du modèle, on peut être amené à retirer de l'analyse certaines parcelles ayant un score de propension trop proche de 0 ou de 1 (i.e. étant dans une situation trop peu comparable aux parcelles de l'autre groupe vis-à-vis des facteurs confondants). Voir Annexe 9 pour plus de précision.

Par rapport aux parcelles du groupe 2, on constate que l'usage du S-métolachlore est corrélé à des rendements légèrement meilleurs (+4,2 q/ha en moyenne), sans surplus de travail du sol. En revanche, l'usage de S-métolachlore est corrélé à des IFT sensiblement plus forts, ainsi qu'à des charges opérationnelles légèrement plus élevées. Finalement, les différences de marge directe⁹⁰ ne sont pas significatives. Il n'existe pas de différences significatives de fréquence de travail du sol⁹¹, de charges de mécanisation, de consommation de carburant ou de coût de la main d'œuvre tractoriste entre les groupes 1 et 2.

Vis-à-vis des parcelles du groupe 4, l'usage du S-métolachlore est lié à un besoin de travailler le sol drastiquement réduit, ainsi qu'à des rendements largement supérieurs (de l'ordre de +32q/ha). Ces différences de rendement sont toutefois à mettre en lien avec les différences de pratiques de fertilisation, et plus généralement aux différences de logique système entre AB et conventionnel, point sur lequel nous reviendrons dans la partie **6.2**. La consommation de carburant, les charges de mécanisation ainsi que le coût de la main d'œuvre tractoriste sont également plus élevés dans le groupe 4. En revanche, les charges opérationnelles sont sensiblement plus élevées dans les parcelles recevant du S-métolachlore. Enfin, l'écart de marge directe estimé entre les groupes 1 et 4 est jugé non-significatif. Ceci peut sembler surprenant au regard de la différence de rendements, mais cette dernière est compensée de deux manières : d'une part via la différence des charges opérationnelles, plus élevées dans le groupe 1, et d'autre part *via* le différentiel des prix de commercialisation, plus élevés en maïs biologique qu'en conventionnel (voir Annexe 8 pour le détail des prix des récoltes utilisés).

⁸⁹ L'ensemble des analyses ont été réalisées en R (R Core Team, 2022), via les packages *cobalt* (Noah, 2022), *tidyverse* (Wickham, et al., 2019) et *CBPS* (Fong, et al., 2022).

⁹⁰ Dans DEPHY, la marge directe est celle qui soustrait le plus de choses au produit brut, donc celle qui se rapproche le plus de ce qu'il reste à l'agriculteur in fine, bien qu'il manque encore des choses telles que les aides, les impôts, etc...

⁹¹ ici, pris au sens d'une combinaison de fréquence de travail du sol hors-labour et de fréquence de désherbage mécanique

Tableau 20 : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le maïs grain – comparaison au groupe 2

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	629	97,58	2,52	0,24	2,99	1,73	390,69
Groupe 2	1285	93,36	2,48	0,27	2,54	1,53	362,22
ATE		4,21	0,04	-0,03	0,44	0,21	28,47
Ecart-type		1,55	0,1	0,03	0,06	0,04	9,56
Significativité		***	NS	NS	***	***	***

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	307,25	92,06	104,04	1657,29	1266,61	855,32
Groupe 2	302,45	95,6	100,71	1606,01	1243,79	840,63
ATE	4,81	-3,54	3,33	51,29	22,82	14,69
Ecart-type	6,93	2,27	3,18	33,72	32,58	33,55
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

Tableau 21 : : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le maïs grain – comparaison au groupe 4

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	579	94,04	2,43	0,25	ND	ND	379,32
Groupe 4	367	62,01	7,08	3,01	ND	ND	173,25
ATE		32,03	-4,65	-2,76	ND	ND	206,07
Ecart-type		2,37	0,24	0,13	ND	ND	14,72
Significativité		***	***	***	ND	ND	***

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	297,15	88,83	97,43	1548,98	1169,66	775,08
Groupe 4	366,77	124,25	130,24	1523,04	1349,79	852,79
ATE	-69,62	-35,43	-32,81	25,94	-180,13	-77,7
Ecart-type	12,32	3,79	5,22	55,35	52,57	52,36
Significativité	***	***	***	NS	**	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

6.1.2. Maïs fourrage

6.1.2.1. *Exemples d'itinéraires techniques avec et sans S-métolachlore*

Au moins dans sa phase d'installation, la conduite du maïs fourrage est relativement proche de celle du maïs grain. Nous renvoyons donc le lecteur à la partie [6.1.1.1](#).

6.1.2.2. *Les analyses de DEPHY*

De la même manière que pour le maïs grain, le [Tableau 22](#) et le [Tableau 23](#) présentent les résultats de l'analyse pour la culture du maïs fourrage. Concernant la comparaison du S-métolachlore aux parcelles du groupe 2, on constate cette fois-ci très peu de différences significatives : seuls l'IFT herbicide et les charges opérationnelles sont en moyenne sensiblement plus élevés dans les parcelles recevant du S-métolachlore. En revanche, les rendements, le travail du sol, les niveaux de charges ainsi que les performances économiques sont similaires.

Par rapport aux parcelles du groupe 4 là aussi, l'avantage procuré par le S-métolachlore est contrasté. Les parcelles recevant du S-métolachlore présentent en général un meilleur rendement, ainsi que des besoins de travail du sol largement réduits. Les charges, en revanche, y sont généralement supérieures : les charges opérationnelles sont en moyenne bien plus fortes (~+270€/ha), et les charges de mécanisation ou de main d'œuvre sont loin de compenser cet écart. En conséquence, et en gardant toujours en tête que les prix AB sont supérieurs aux prix conventionnels, on constate que ce sont les parcelles du groupe 4 qui présentent les marges les plus fortes, de l'ordre de +275€/ha en moyenne pour la marge directe, par rapport aux parcelles traitées au S-métolachlore. On remarque que le gain en marge directe du groupe 4 est du même ordre de grandeur que le surplus de charges opérationnelles du groupe 1 : ceci suggère que la différence de rendement constatée est presque entièrement compensée par les prix pratiqués en AB, tandis que les moindres charges permettent au groupe 4 de dégager un avantage. Rappelons enfin que les indicateurs de DEPHY (produit brut et marges) sont calculés en considérant que toute la production (y compris la partie autoconsommée) a été vendue : or, en pratique et pour un certain nombre d'exploitations, seule une (petite) partie du maïs fourrage est effectivement vendue, le reste étant réservé pour l'élevage.

Tableau 22 : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le maïs fourrage - comparaison au groupe 2

	Nombre de parcelles	Rendement (t/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	353	13,53	2,62	0,21	2,37	1,52	405,73
Groupe 2	1222	13,12	2,6	0,23	2,26	1,38	370,73
ATE		0,41	0,03	-0,02	0,12	0,14	35
Ecart-type		0,26	0,14	0,05	0,05	0,04	16,15
Significativité		NS	NS	NS	*	***	*

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	331,08	112,31	94,81	1787,62	1381,89	956,01
Groupe 2	334,79	110,46	96,22	1733,25	1362,52	931,51
ATE	-3,71	1,86	-1,42	54,37	19,37	24,5
Ecart-type	7,11	3,11	2,73	34,71	35,12	37,57
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

Tableau 23 : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le maïs fourrage - comparaison au groupe 4

	Nombre de parcelles	Rendement (t/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	317	13,5	2,66	0,18			410,09
Groupe 4	350	10,76	5,14	2,47			136,13
ATE		2,74	-2,49	-2,28			273,96
Ecart-type		0,31	0,2	0,13			18,88
Significativité		***	***	***			***

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	339,93	114,74	98,62	1771,18	1361,09	922,53
Groupe 4	340,48	119,36	108,15	1782,09	1645,96	1197,34
ATE	-0,55	-4,62	-9,53	-10,92	-284,87	-274,8
Ecart-type	9,72	4,24	3,92	47,63	48,68	50,21
Significativité	NS	NS	*	NS	***	***

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. On considère pour l'analyse que toute la production (y compris la partie autoconsommée) a été vendue.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

6.1.3. Soja

6.1.3.1. Exemples d'itinéraires techniques avec et sans S-métolachlore

La Chambre d'Agriculture du Gers préconise une combinaison de pré-levée et post-levée pour « une efficacité plus régulière et un meilleur contrôle des levées échelonnées », en particulier dans les zones de monoculture de printemps ou en cas d'infestation de graminées et de chénopodes (Chambre d'Agriculture du Gers, 2016). La pré-levée permet de gérer la faible vitesse de recouvrement du sol par le soja ; un binage peut venir compléter l'action des herbicides. Par ailleurs et selon la Chambre d'Agriculture du Gers, la post-levée est appliquée sur près de 90% de la sole soja ; elle doit intervenir dès le stade 3 feuilles du soja et jusqu'au stade 4-5 feuilles.

Dans un autre contexte pédoclimatique, la chambre d'agriculture d'Alsace (2022) propose différents programmes de désherbage dont la mobilisation dépend notamment de la flore adventice présente, comme présenté précédemment pour le maïs :

- Dans le cas d'une forte infestation en graminées estivales (notamment PSD), un traitement de pré-levée incluant du S-métolachlore peut être suffisant. A titre d'exemple, il est possible d'associer en un traitement de pré-levée du Mercantor gold à 1,05 L/ha (contient du S-métolachlore) et du Prowl 400 à 2,3 L/ha (contient de la pendiméthaline et permet de compléter le spectre contre certaines dicotylédones telles que laiteron ou morelle). Terres Inovia souligne que ce traitement peut s'avérer insuffisant sur d'autres dicotylédones telles que chénopode et renouée liseron qui entraînent alors de manière fréquente le recours à la post-levée. Un binage peut également compléter ces différentes interventions herbicides, avant fermeture du rang.
- Une autre stratégie consiste à combiner un passage en pré-levée à un deuxième passage en post-levée précoce. Le passage de pré-levée permet de contrôler de manière précoce les graminées. Il peut mobiliser ou non du S-métolachlore. A titre d'exemple, il peut s'agir d'un passage de Mercantor gold à 1,05 L/ha (contient du S-métolachlore) en pré-levée, suivi par un passage de Pulsar 40 à 1 L/ha (contient de l'Imazamox) en post-levée. Il peut aussi s'agir d'une combinaison de pendiméthaline (exemple : Prowl 400 à 2 L/ha) et clomazone (exemple : Centium CS à 0,2 L/ha) en pré-levée, suivie d'Imazamox (exemple : Pulsar 40 à 0,6 L/ha associé à de l'huile de colza estérifiée comme adjuvant) en post-levée. De nouveau, ces deux exemples de programmes chimiques peuvent être complétés par un binage avant fermeture du rang.
- En cas de pression en adventices moyenne, il est possible d'avoir recours uniquement à de la post-levée (en un ou deux passages) à condition de positionner précisément ces traitements. Les stratégies proposées par la Chambre d'agriculture d'Alsace incluent généralement du Pulsar 40 (contient de l'Imazamox) dont le spectre est large mais jugé insuffisant sur certaines dicotylédones telles que les matricaires, certaines renouées ou encore sur digitales en forte pression PSD. Ce type de stratégie peut également être complété par un binage avant fermeture du rang.

Le désherbage uniquement mécanique sur soja est également possible. Terres Inovia en présente les particularités dans un article de 2019 (Vuillemin, 2019a). Les interventions qui y sont décrites conviennent à des cultures conduites en conventionnel ; elles sont proches de ce qui peut être réalisé en soja biologique (discussion avec un ingénieur du réseau DEPHY). Un premier passage en plein est nécessaire quelques jours après le semis (de 3 à 7 jours). La herse étrille ou la houe rotative peuvent être mobilisées en fonction du type de sol (herse étrille sur sol non tassé, houe rotative sur sol battant). En culture, il s'agit d'alterner herse étrille et/ou houe rotative, puis finir par un, deux ou trois binages une fois que la culture de soja est bien installée. Ces binages doivent intervenir sur des adventices jeunes. Un équipement adapté de la bineuse permet de limiter les phénomènes de buttage rendant particulièrement complexes les opérations de récolte.

Selon une enquête menée par Terres Inovia dans le Sud-Ouest en 2012, la pratique dominante en soja bio consistait à réaliser deux passages de herse étrille puis deux binages. En moyenne, quatre interventions mécaniques sont réalisées sur soja bio en France (Vuillemin, 2019a). Des arrachages manuels de datura peuvent être nécessaires en soja bio en complément du désherbage mécanique ; ils impliquent du temps de travail en plus, et donc un coût de main d'œuvre supplémentaire compensé par la meilleure valorisation de la graine en AB.

6.1.3.2. *Analyse de DEPHY*

Au même titre que pour les autres cultures étudiées, les prix utilisés pour l'analyse économique appliquée à la culture de soja peuvent être retrouvés en Annexe 8.

Par rapport au maïs, grain ou fourrage, la culture du soja est moins présente dans DEPHY, mais nous pouvons tout de même rassembler plus d'une centaine de parcelles par groupe, ce qui permet de procéder aux estimations. Ainsi, on constate que les parcelles traitées au S-métolachlore présentent des IFT total et herbicide supérieurs à celles issues du groupe 2, mais ne présentent pas de rendements significativement meilleurs. De plus, on ne constate aucune différence de travail du sol, et les performances économiques restent très similaires. La marge directe, plus précisément, ne présente pas de différence significative entre les deux groupes.

Par rapport aux parcelles du groupe 4, l'utilisation du S-métolachlore est corrélée à de meilleurs rendements (+8 q/ha en moyenne), ainsi qu'à un moindre travail du sol. A l'instar du maïs, les charges de mécanisation, le coût de la main d'œuvre, ainsi que la consommation de carburant augmentent dans les parcelles non-traitées, tandis que les charges opérationnelles diminuent. La baisse des charges totales et l'existence de prix supérieurs en AB conduisent à de meilleurs résultats économiques finaux (en termes de marge directe) pour les parcelles ne recevant pas de désherbage chimique (+150€/ha en moyenne).

Tableau 24: Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le soja - comparaison au groupe 2

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	205	30,56	1,98	0,07	2,14	2,01	258,83
Groupe 2	216	29,31	1,9	0,05	1,7	1,51	263,65
ATE		1,25	0,08	0,02	0,44	0,5	-4,82
Ecart-type		0,99	0,15	0,04	0,1	0,08	18,07
Significativité		NS	NS	NS	***	***	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	276,31	79,37	93,33	1093,7	834,87	465,23
Groupe 2	266,53	74,66	89,91	1047,91	784,27	427,83
ATE	9,78	4,71	3,42	45,79	50,61	37,41
Ecart-type	15	4,55	9,18	38,32	40,89	42,45
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

Tableau 25 : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le soja - comparaison au groupe 4

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	182	31,33	2,02	0,06			256,07
Groupe 4	209	23,2	6,77	2,9			102,77
ATE		8,13	-4,75	-2,84			153,3
Ecart-type		1,07	0,27	0,16			15,45
Significativité		***	***	***			***

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	280,64	78,01	95,85	1101,29	845,22	468,73
Groupe 4	330,52	112,77	117,53	1175,49	1072,72	624,67
ATE	-49,88	-34,76	-21,67	-74,2	-227,5	-155,95
Ecart-type	19,51	4,66	8,62	51,8	53,14	53,93
Significativité	**	***	*	NS	***	**

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

6.1.4. Tournesol

6.1.4.1. Exemples d'itinéraires techniques avec et sans S-métolachlore

Concernant les stratégies de désherbage chimique du tournesol, c'est principalement la pré-levée qui est mobilisée. La combinaison d'un herbicide racinaire anti-graminée (contenant du S-métolachlore ou non) à un antidicotylédone permet d'obtenir un spectre relativement large (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022). L'anti-graminée racinaire peut être, à titre d'exemple, du Mercantor gold (contient du S-métolachlore), du Dakota-P (contient de la pendiméthaline et du diméthénamide-P), ou encore de l'Atic-Aqua (contient de la pendiméthaline). Ils peuvent être associés à un anti-dicotylédones tel que du Challenge 600 (contient de l'aclofifène) ou du Proman (contient du métobromuron) afin d'élargir le spectre d'action (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022 ; Duroueix, 2020).

Les solutions de désherbage complètes en post-levée sont restreintes en culture de tournesol. Seuls les produits à base d'imazamox (exemple : Pulsar 40, Pulsar plus) ou de tribénuron-méthyl (exemple : Express SX) peuvent être mobilisés sur des variétés tolérantes (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022 ; Duroueix, 2020).

Le binage peut également venir en complément d'un traitement racinaire en pré-levée. Il peut éventuellement permettre de réduire les doses herbicides employées et/ou compléter un programme chimique non satisfaisant. Le binage peut être réalisé à partir du stade 2 feuilles du tournesol à condition d'utiliser des protèges plants et une vitesse faible (environ 3 km/h) (Vuillemin, 2019b).

Par ailleurs, la technique d'herbisemis (application de l'herbicide de pré-levée sur le rang au moment du semis *i.e.* en un seul passage) suivie d'un ou plusieurs binages de l'inter-rang offre de très bonnes performances technico-économiques (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022). Cette technique qui nécessite du matériel particulier, permet de réduire les quantités d'herbicides à l'hectare et l'IFT, et peut s'élargir à toutes les cultures sarclées pouvant recevoir un traitement en pré-levée (Vuillemin, Duroueix, 2021).

Le désherbage entièrement mécanique est également possible sur tournesol. Les exemples suivants ont été fournis par des ingénieurs du réseau DEPHY. Le premier consiste à effectuer un labour puis un passage de herse étrille (ou herse rotative) durant l'hiver, puis un passage de herse plate juste avant le semis du tournesol, puis un passage de herse étrille juste après le semis, puis un passage de bineuse quand le tournesol mesure 40 cm. Dans cet exemple, de la luzerne est ensuite semée sous le tournesol. Le semis de luzerne est précédé par un passage de herse étrille. Par ailleurs, la culture de tournesol est précédée d'un couvert mélangeant seigle et vesce. Le second exemple consiste à détruire le couvert précédant le tournesol par un labour, puis à semer le tournesol au combiné (semoir associé à un outil de travail du sol), puis à réaliser un passage de herse étrille juste après le semis (voire un deuxième au stade 2 feuilles), puis à passer la bineuse deux, voire trois fois.

Que ce soit pour des stratégies combinant chimie et mécanique ou pour des stratégies entièrement mécaniques comme en agriculture biologique, il est possible d'effectuer un léger

buttage du rang afin d'en limiter le salissement (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022 ; Terres Inovia, 2016). Cette intervention peut avoir lieu à partir du stade 6 feuilles du tournesol.

6.1.4.2. *Analyse de DEPHY*

Par rapport au groupe 2, l'usage du S-métolachlore pour la culture du tournesol n'est corrélé qu'à des IFT totaux et herbicide significativement supérieurs. Les performances techniques (travail du sol, rendements) et économiques (en termes de produit brut, de marges, ou de charges), sont sensiblement similaires.

En ce qui concerne les alternatives non-chimiques, en revanche, plusieurs différences apparaissent. Les rendements sont ainsi supérieurs dans les parcelles traitées (+6q/ha en moyenne), et le travail du sol y est drastiquement réduit. Comme souvent, les charges opérationnelles y sont plus fortes, sans que les moindres charges de mécanisation et de main-d'œuvre ne compensent totalement cet écart. En termes de bilan, les performances économiques s'avèrent être similaires entre les deux groupes, et la marge directe ne présente pas de différence significative.

Tableau 26 : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le tournesol - comparaison au groupe 2

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	231	25,26	2,13	0,21	2,74	1,74	196
Groupe 2	804	24,59	2,28	0,27	2,34	1,29	192,06
ATE		0,67	-0,15	-0,06	0,4	0,45	3,93
Ecart-type		0,6	0,14	0,04	0,08	0,05	9,37
Significativité		NS	NS	NS	***	***	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	269,67	82,69	73,97	952,64	756,64	413,01
Groupe 2	264,79	84,64	77,04	924	731,94	390,11
ATE	4,88	-1,95	-3,07	28,63	24,7	22,9
Ecart-type	8,73	2,76	2,94	30,17	30,13	30,36
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

Tableau 27 : Résultats technico-économique des parcelles DEPHY pour le tournesol - comparaison au groupe 4

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Groupe 1	187	25,16	2,09	0,24			184,06
Groupe 4	196	18,89	5,9	2,16			57,97
ATE		6,27	-3,81	-1,93			126,09
Ecart-type		0,88	0,28	0,13			9,56
Significativité		***	***	***			***

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Groupe 1	273,26	83,54	75,21	892,14	708,08	359,61
Groupe 4	312,84	106,01	95,14	810,3	752,33	344,35
ATE	-39,58	-22,47	-19,93	81,84	-44,25	15,26
Ecart-type	13,46	4,87	4,85	38,04	37,95	39,56
Significativité	**	***	***	*	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

6.1.5. Exemple d'itinéraires techniques en cultures de betteraves, haricots et porte-graines, avec et sans S-métolachlore

Ces cultures ne représentent pas des effectifs suffisants pour réaliser une analyse statistique à partir des données de DEPHY. Dans ce paragraphe, nous nous limitons donc à présenter quelques exemples d'itinéraires techniques avec et sans S-métolachlore.

6.1.5.1. Betteraves sucrières

L'ITB (Institut Technique de la Betterave) rappelle que la betterave est très sensible à la concurrence des adventices et que son désherbage est très technique. Le S-métolachlore est principalement utilisé en betterave pour lutter contre les graminées. On peut distinguer deux situations : i) les parcelles pour lesquelles le contrôle des Ray Grass et vulpins doit être intensifié, en particulier dans les cas de résistances aux modes d'action des graminicides les plus courants, et ii) les parcelles où le système de culture favorise les PSD (principalement systèmes avec maïs et betteraves en Alsace).

Contrôle des graminées classiques :

Les graminées, ray-grass et vulpin, font partie des adventices les plus fréquentes dans les parcelles de betterave au printemps et elles sont souvent mal maîtrisées (ce fut notamment le cas en 2021 comme le confirment les relevés parcellaires réalisés par l'ITB (ITB, 2022a)). Leur désherbage est confronté aux problèmes de résistances aux modes d'action les plus généralisés (ITB, INRAE, ANSES, 2022). Le S-métolachlore (ainsi que le triallate et le dmta-P) permet de lutter contre les vulpins et ray-grass résistants et de s'assurer d'une efficacité satisfaisante. Le **Tableau 28** ci-dessous présente deux préparations commerciales qu'il est possible d'utiliser en pré-levée « en situation de résistance avérée ou en cas de pression montante de vulpins ou de ray-grass » (ITB, 2022c) : l'Avadex 480 contenant du triallate, ou le Mercantor Gold contenant du S-métolachlore.

Tableau 28 : Graminicides de pré-levée pour la betterave

		Mode d'action (classification HRAC)	Dose/ha	Conseils
Avant semis	Avadex 480	N - 15	3 l	À incorporer rapidement
Après semis, pré-levée	Mercantor Gold	K3 - 15	0,6 l	À éviter dans les sols filtrants en raison du risque de phytotoxicité

Source : Pense betterave de l'ITB 2022, page 5 (ITB, 2022c).

Le S-métolachlore permet d'intervenir en pré-levée et de réduire les levées des graminées dans la culture contrairement aux produits à base de dmta-P qui ne sont pas homologués en pré-émergence pour la culture de la betterave. La culture n'atteint la pleine couverture

qu'autour de la mi-juin, avec une longue période pour des levées successives de graminées dans l'inter-rang et sur le rang. Aussi, l'intervention en pré-levée doit être relayée par un antigraminée foliaire, en post-levée (ITB, 2020).

Une autre possibilité en post-levée des betteraves consiste à combiner l'antigraminée foliaire avec de l'Isard (dmta-P) ou du Mercantor Gold (S-métolachlore) ; cela permet d'améliorer l'efficacité du traitement antigraminées (ITB, 2020). Pour des raisons de sélectivité, l'ITB recommande d'éviter les sols filtrants et d'attendre le stade 4-6 feuilles des betteraves.

L'intérêt majeur du S-métolachlore en culture de betteraves est de diversifier les modes d'action dans la lutte contre les graminées résistantes. L'ajout de cette molécule au traitement foliaire de base (traitement DIME) permet de maîtriser durablement le stock grainier des parcelles sans se faire déborder par les phénomènes de résistance. Dans son Cahier technique N°1107 (ITB, 2020), l'ITB résume ses principaux conseils dans ce cadre : comme vu précédemment, il s'agit de combiner les modes d'actions chimiques, mais également de diversifier son désherbage avec la lutte agronomique. L'ITB préconise i) un labour tous les 3 ou 4 ans afin de limiter les remontées de graines viables enfouies les années précédentes et ii) de diversifier les rotations.

Un traitement spécifique contre les dicotylédones est nécessaire.

Contrôle des PSD :

Une dose de 0,6 l/ha de S-métolachlore en post-levée est efficace pour lutter contre les levées de Panic, Sétaire, Digitale (PSD). Une application de 0,4 l/ha de S-métolachlore complété avec l'Isard (dmta-P) obtient également une bonne efficacité contre ces adventices. Des graminicides réalisés en post-levée à un stade précoce vont également permettre de diminuer les infestations de PSD. Le recours au S-métolachlore reste essentiel dans les programmes de désherbage des rotations incluant betterave et maïs très présentes en Alsace.

Désherbage mixte :

Le désherbage mécanique est également possible en betterave, quasiment exclusivement combiné à un programme de désherbage chimique. Pour rappel, la filière betterave bio existe seulement depuis 2019 et concerne encore de faibles surfaces. Cette combinaison de désherbage mécanique et chimique permet de réaliser des économies en herbicides. A titre d'exemples, l'ITB propose deux types de stratégies de désherbage présentées ci-dessous (Duval R., 2019). Néanmoins, ces pratiques mécaniques visent plus particulièrement les dicotylédones que les graminées ; or si le S-métolachlore a un spectre qui s'élargit en partie aux dicotylédones, il est plutôt utilisé sur son efficacité sur graminées.

La première stratégie combine 2 à 3 traitements herbicides chimiques en plein dont l'objectif est de garder la parcelle propre jusqu'au stade 4 feuilles des betteraves, stade avant lequel la plante est trop petite et fragile pour être désherbée mécaniquement. Puis plusieurs passages sont réalisés soit avec une bineuse (équipée de moulinets pour désherber le rang), soit avec une houe rotative. L'ITB rappelle néanmoins que cette pratique de désherbage mécanique sur le rang est efficace sur dicotylédones mais pas sur graminées (ITB, 2022b).

La seconde stratégie proposée par l'ITB consiste à ne traiter que le rang à l'aide d'une rampe de localisation d'herbicide (voire de réaliser un désherbinage) permettant de réduire de moitié ou plus, la surface traitée (Duval R., 2019). Il est ensuite recommandé de réaliser plusieurs binages (bineuse traditionnelle) dans l'inter-rang.

6.1.5.2. *Haricot*

Aujourd'hui, le S-métolachlore, la benfluraline, la clomazone et la pendiméthaline sont autorisés en pré-levée ; la bentazone et l'imazamox sont autorisés en post-levée comme anti-dicotylédones. En général, de 4 à 5 substances actives sont combinées dans un même programme de désherbage afin d'assurer des lots de haricots exempts de corps étrangers.

Selon Unilet, le S-métolachlore est employé sur haricot (en pré-levée) notamment dans des situations de sols riches en matière organique car la benfluraline ne s'y prête pas (cette dernière est en revanche employée dans les sols limoneux du Bassin parisien et des Hauts-de-France où les taux de matières organiques sont plus faibles). Il est ensuite incorporé dans les 24 heures. S'en suit un traitement à base de clomazone en post-semis-prélevée. Cet exemple d'itinéraire technique est mobilisé en Bretagne (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2018).

Le désherbage mécanique est également possible sur haricots. C'est dans le Sud-Ouest qu'il est le plus répandu. Il est efficace sur un sol sec en surface. Des binages sont possibles au stade jeune du haricot et jusqu'à la fermeture du rang (pour éviter d'endommager les parties aériennes). Par ailleurs, l'efficacité d'un désherbage réalisé à la bineuse équipée de doigts souples est « intéressante sur le rang de semis » (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2018) dès que les jeunes plantes sont suffisamment ancrées pour résister au déchaussement.

6.1.5.3. *Porte-graines*

La diversité des cultures porte-graines et des itinéraires techniques possibles est telle que nous renvoyons le lecteur aux échanges avec les instituts techniques agricoles que nous relatons dans la partie [5.2.2.5](#) et aux publications disponibles sur internet, telles que celles de la FNAMS (Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences) dont celle relative au désherbage du haricot porte-graine de mai 2020 (FNAMS, 2020) ou celle traitant du désherbage mécanique dans le cadre d'un grand nombre de productions de semences (FNAMS, 2013).

6.2. Comparaison entre conventionnel et biologique : une logique de systèmes

Nous souhaitons revenir ici sur une difficulté générale que nous avons rencontrée en menant cette étude. Nous aurions aimé pouvoir comparer les pratiques ayant recours au S-métolachlore à celles mobilisant des alternatives non chimiques 'toutes choses égales par

ailleurs'. L'estimation par score de propension vise à approcher cet objectif. Toutefois, bien que l'on possède des informations sur la composition chimique des sols via l'ESDAC, dont les teneurs en azote et phosphore, celles-ci n'ont pas comme objectif de rendre compte des amendements réalisés par les agriculteurs⁹². Ces derniers sont disponibles dans DEPHY, et, idéalement, nous les aurions inclus dans les facteurs confondants que l'estimation par score de propension permet de corriger. Toutefois, les inclure ne permet pas d'en respecter les hypothèses, notamment celle de l'équilibre des covariables (voir Annexe 9). Dès lors, en s'appuyant sur des données existantes, la comparaison n'est possible qu'en retenant l'agriculture conventionnelle utilisatrice du S-métolachlore d'une part, et les conduites en AB d'autre part. Chacune a sa logique et valeur de système, et il existe une ambition de rendements élevés en conventionnel, qui est probablement d'autant plus forte que la protection phytosanitaire y est intense et la quantité de fertilisants ajustée aux objectifs visés. Ainsi, si une part de la différence de rendement entre conventionnel et AB découle de l'utilisation d'une protection sanitaire complète incluant le S-métolachlore, une autre tient à cette différence systémique, notamment via l'utilisation de fertilisants. Le **Tableau 29** montre ainsi que les rendements plus élevés dans les parcelles traitées, par rapport aux programmes de désherbage non-chimiques, sont corrélés avec des apports en fertilisants plus grands. On notera que pour le soja, il n'y a pas de différence rattachée à la fertilisation azotée entre bio en conventionnel ; les autres éléments P et K ressortent toutefois.

Tableau 29 : Différences moyennes de rendements ainsi que d'apports en fertilisants (minéraux et organiques) entre les parcelles traitées au S-métolachlore et les parcelles en AB

	Rendements	Apports en azote	Apports en phosphore	Apports en potassium
Maïs grain	+32,33 q/ha	+101,46	11,71	-9,25
Maïs fourrage	+2,94 t/ha	+118,66	46,88	72,15
Soja	+8,06 q/ha	+1,63	20,26	19,62
Tournesol	+6,46 q/ha	+19,02	12,91	-2,25

■ Différence en faveur des parcelles traitées

■ Différence non significative

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

En revanche, si on suspecte que la fertilisation joue un rôle dans les différences de rendement, on manque à ce stade d'informations pour quantifier précisément ce rôle. Il est clair que les pesticides et la fertilisation jouent conjointement pour garantir de forts rendements (Aktar *et al.*, 2009 ; Yousaf *et al.*, 2017), et que la distinction de leur part respective n'est non seulement

⁹² En pratique, comme le détaille la méthodologie des relevés utilisés pour la création des bases de données de l'ESDAC (Tóth *et al.*, 2013), les quantités d'azote, de potassium et de phosphore étaient plus élevées dans les relevés effectués dans les terres agricoles. Ainsi, une partie des amendements est probablement involontairement prise en compte dans ces données.

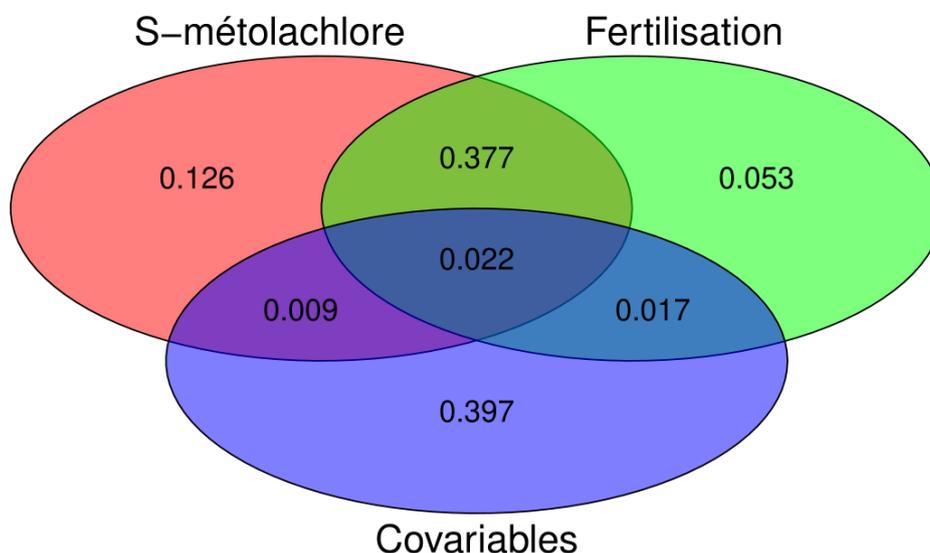
pas aisée, mais même discutable. On s'attaque en fait à la logique même d'un système (Liu *et al.*, 2015) dont on voudrait isoler une part. Notre travail n'entend donc pas résoudre cette question, mais simplement vérifier que les différences de rendement présentées plus hauts sont bien le fruit de systèmes de production aux objectifs différents.

Pour cela, nous avons mis en œuvre une méthode de partition de la variance, largement utilisée en écologie des communautés (Borcard *et al.*, 1992). De manière générale, cette méthode vise à estimer la contribution de différents types de facteurs aux variations d'une variable réponse, ou dépendante. Dans notre cas, on cherche à déterminer le rôle respectif du traitement phytosanitaire (dont S-métolachlore, premier type de facteurs) et des apports en fertilisation (azote, phosphore et potassium, second type de facteurs) sur les rendements (variable réponse). En réalité, on inclura un troisième type de facteurs, les covariables utilisées pour l'estimation des scores de propension, qui représentent en quelques sortes le rôle des conditions conjoncturelles et environnementales sur les rendements.

L'estimation de la contribution de chaque type de facteur se fait de la manière suivante : on commence par effectuer des régressions linéaires des rendements sur chaque type de facteurs, indépendamment. On fait ensuite de même avec chaque paire de types de facteurs (traitement phytosanitaire + fertilisants, etc...), et enfin une régression incluant les trois types de facteurs. On détermine la contribution de chaque facteur, et la contribution conjointe de chaque paire de facteurs en comparant les R^2 de chaque régression au R^2 de la régression incluant les trois types de facteurs (Real *et al.*, 2003). On obtient ainsi la part (en pourcentage) de la variation des rendements expliquée par i) le traitement phytosanitaire, dont S-métolachlore, seul, la fertilisation seule, et les covariables seules, ii) l'effet conjoint du traitement et de la fertilisation (donc de la logique du système de culture, son ambition de rendements), l'effet conjoint du traitement et des covariables, et l'effet conjoint de la fertilisation et des covariables, et iii) de l'effet conjoint des trois.

Figure 25 : Contribution des différents types de facteurs aux rendements en maïs grain

Contribution du traitement au S-métolachlore, de la fertilisation, et des covariables au niveau de rendement (%)



En pratique, les régressions linéaires ont été effectuées sur les mêmes échantillons que ceux ayant été utilisés pour les estimations via les scores de propension, pour la comparaison groupe 1/groupe 4. Chaque régression linéaire a de plus été pondérée par les poids issus des scores de propension (voir méthodologie partie 6.1). Le fait de pondérer la régression par les scores de propension et de tout de même rajouter les covariables dans le modèle rend l'estimation « doublement robuste », et est recommandée dans la littérature (Stuart, 2010). Enfin, seule la variance totale expliquée par les facteurs à disposition est donnée, mais il existe en réalité une part de la variation des rendements qu'aucun des facteurs considérés ici n'est en mesure d'expliquer. La **Figure 25** donne les résultats pour le maïs grain, sous forme de diagramme de Venn. On constate que, bien que le traitement phytosanitaire seul joue un rôle, ce dernier est limité (~13% de la variance expliquée). La majeure partie des variations du rendement provient i) des covariables, donc des conditions conjoncturelles et pédoclimatiques (~39%), ainsi que ii) de l'effet conjoint du traitement et de la fertilisation, et donc de la logique du système de culture et des ambitions initiales de rendement (~37%). Il est ainsi difficile d'identifier la part du seul S-métolachlore dans les différences de rendements.

Cela laisse ouverte l'option de croiser un désherbage mécanique couplé à une fertilisation minérale. A ce stade il demeure incertain que cela permette des rendements similaires au conventionnel. Ce système correspond à notre groupe 3 pour lequel nous n'avons que très peu de données. Il est vraisemblable qu'un tel système aurait aussi recours à des variétés adaptées à ce système intermédiaire de conduite. Sur la plateforme expérimentale Ca-Sys de l'INRAE de Dijon, les rendements obtenus sur les cultures bénéficiant d'une fertilisation minérale mais d'aucune protection phytosanitaire de synthèse présentent généralement des valeurs intermédiaires entre la conduite en AB et la conduite conventionnelle.

6.3. Analyses de sensibilité

L'objectif de cette partie est d'établir si les différences économiques entre les parcelles traitées au S-métolachlore et celles recevant des alternatives chimiques ou non-chimiques, estimées pour le maïs grain, le maïs fourrage, le soja et le tournesol plus haut⁹³, sont robustes ou non à des variations de certains paramètres dont elles dépendent. Nous avons en effet montré que les avantages économiques, en termes de marge directe, générés par l'utilisation du S-métolachlore (face aux groupes 2 et 4) sont relativement limités, voire non-existants. Nous ne sommes en revanche pas en mesure, à ce stade, de savoir si les bonnes performances économiques des alternatives sont à même de résister à des variations conjoncturelles plus ou moins marquées.

Afin de répondre à cette question, nous avons mené une analyse de sensibilité sur les estimations des performances économiques. L'idée est d'évaluer comment évolue l'avantage économique du S-métolachlore, défini comme la différence des marges directes estimées du groupe 'avec' et des groupes 'sans', en fonction de variations de certaines de ses composantes. Par exemple, est-ce qu'une variation du prix de vente des récoltes est susceptible de modifier les conclusions tirées lors de la partie 6.1 ?

Plus précisément, nous avons fait varier six indicateurs économiques ayant une influence sur la marge directe : le prix de vente des récoltes, les charges de mécanisation, les charges opérationnelles, ainsi que trois composantes de ces dernières, à savoir le coût de l'irrigation, celui des produits phytosanitaires, et celui des intrants en fertilisation. Nous avons fait varier chacun de ces indicateurs indépendamment selon les principes du *One-at-a-time* (Hamby, 1995), sur une grille allant de -50% à +50% de leur valeur initiale.

Pour chaque variation de chaque indicateur, nous avons estimé la différence des marges directes moyennes entre les parcelles traitées au S-métolachlore (groupe 1) et celles recevant d'autre(s) herbicides(s) (groupe 2) d'une part, et celles sur lesquelles sont mises en place des alternatives non-chimiques de l'autre (groupe 4). Cette différence de marge directe n'est autre que l'*Average Treatment Effect* (ATE), décrit en introduction de cette partie 6.1. La méthode d'estimation de l'ATE, reposant sur les scores de propension, y est également détaillée. Enfin, l'évolution de l'ATE sur la grille de variation est représentée graphiquement, accompagnée d'un intervalle de confiance à 95% estimé par *bootstrap*. Nous avons appliqué cette méthode pour les mêmes cultures que celles traitées plus haut, à savoir le maïs grain, le maïs fourrage, le soja et le tournesol.

Les résultats de cette analyse de sensibilité, dont les détails sont donnés en Annexe 10, montrent que nos conclusions sont largement robustes à de telles variations conjoncturelles

⁹³ Cultures pour lesquelles nous avons pu réaliser une analyse économique à partir des données DEPHY.

des indicateurs considérés ici. De manière générale, et pour chacune des cultures analysées, les conclusions de la partie 6.1 résistent à la plupart des variations étudiées.

Plus précisément :

- Une variation des prix des récoltes à la hausse (mais maintenant l'avantage à l'AB) a tendance à faire augmenter l'ATE (donc à avantager la marge directe des parcelles traitées au S-métolachlore par rapport à celles n'en recevant pas), et inversement. Toutefois, cette influence reste modérée, et il faut des variations très fortes pour que les conclusions établies en partie 6.1 changent. Par exemple, une baisse d'au moins 40% du prix des récoltes rend les alternatives non-chimiques significativement plus rentables que le S-métolachlore en maïs grain, alors qu'aucune différence significative n'est constatée sinon. Ainsi, bien qu'elle avantage globalement les parcelles traitées au S-métolachlore, une hausse des prix des récoltes devrait être extrêmement élevée pour que l'on constate un avantage significatif de marge directe pour ces dernières.
- Les variations des charges de mécanisation, des charges opérationnelles, et de ses composantes n'ont presque aucun impact sur l'ATE entre le groupe 1 et le groupe 2. Dit autrement, les parcelles traitées au S-métolachlore et celles recevant d'autre(s) herbicide(s) réagissent de la même manière aux variations de leurs charges, ce qui implique que la différence de marge directe reste stable. Ainsi, les conclusions établies en partie 6.1, à savoir que nous ne trouvons pas d'avantage économique significatif à l'utilisation du S-métolachlore par rapport aux autres herbicides, restent vraies même pour de fortes variations, positives ou négatives, des charges opérationnelles et de mécanisation, et ce pour toutes les cultures étudiées. Ce résultat pouvait être attendu car les itinéraires de conduite mobilisant différentes alternatives chimiques demeurent par ailleurs très similaires.
- Les variations du coût de l'irrigation n'ont quasiment aucune influence sur les ATE, quelle que soit la culture, et quelle que soit l'alternative considérée.
- Plus les charges de mécanisation seront élevées, plus cela sera favorable aux parcelles traitées au S-métolachlore par rapport à celles n'étant pas désherbées chimiquement. Toutefois, à l'instar des prix des récoltes, il faut envisager une augmentation très forte pour que cette différence permette au groupe 1 de surperformer le groupe 4 en maïs grain.
- A l'inverse, une hausse des charges opérationnelles avantage les parcelles n'ayant pas recours à la chimie. C'est particulièrement vrai pour les coûts des produits phytosanitaires et des intrants en fertilisation. La même remarque que précédemment s'applique : l'influence reste limitée, et il faut de très fortes variations de charges opérationnelles pour que nos conclusions s'inversent. A titre d'exemple, pour le tournesol, les parcelles traitées au S-métolachlore deviennent significativement plus rentables que celles n'ayant pas recours à la chimie à partir d'une baisse de 70% des charges opérationnelles.

6.4. Zoom sur quelques alternatives chimiques

Jusqu'ici, nous avons évalué la faisabilité technique et économique des programmes de désherbages chimiques sans S-métolachlore à travers la comparaison du groupe 1 au groupe 2. Or, ce dernier, s'il contient les substituts au S-métolachlore, est en réalité plus large. Dans cette partie, nous nous attachons à évaluer le degré de substituabilité entre le S-métolachlore d'une part, et la pendiméthaline, le dmta-P, et la sulcotrione de l'autre, au travers des différentes bases de données dont nous disposons. Ces alternatives potentielles ont été choisies sur la base de plusieurs critères : le diméthénamide-P est la principale alternative chimique au S-métolachlore identifiée comme telle au travers les différentes remontées du terrain, dont celles des experts des Instituts Techniques Agricoles (ITA), au cours de nos échanges. La pendiméthaline l'est aussi dans une moindre mesure, notamment dans des situations de moindre infestation par les graminées estivales. De son côté, la sulcotrione fait partie des principales molécules utilisées pour le désherbage du maïs dont l'utilisation a explosé après l'interdiction du S-métolachlore au Luxembourg en 2015, passant ainsi de moins de 100kg à plus de 500kg, quatre années sur six. Soulignons que les spectres d'action de ces différentes molécules ne se recoupent parfois qu'assez partiellement : par exemple, si le S-métolachlore est efficace sur les graminées et les dicotylédones, la pendiméthaline l'est moins sur les premières. De même, la sulcotrione est utilisable principalement en post-levée⁹⁴, et son efficacité concerne principalement les dicotylédones. Nous avons choisi de l'étudier pour illustrer le cas d'une molécule qui pourrait être mobilisée sur maïs à condition d'avoir une faible pression en graminées (ce qui passe notamment, au-delà de facteurs externes tels que les conditions pédo-climatiques, par la mobilisation de l'ensemble des facteurs prophylactiques discutés précédemment). Pour ces différentes SA, ce point constitue une limite d'une analyse portée sur la substitution entre deux molécules n'ayant pas les mêmes spectres d'action. Il peut en aller de même pour les contraintes sur les conditions pédo-climatiques d'utilisation des différentes molécules (voir [Annexe 11](#) pour plus de détails). Nous avons donc entrepris d'estimer l'avantage technico-économique que procure le S-métolachlore par rapport à ces substances. Pour ce faire, nous mobilisons une fois de plus les données issues du réseau DEPHY. La méthode d'estimation des performances technico-économiques et le type de résultats obtenus ont été présentés en partie [6.1](#). Le maïs étant la seule culture commune à nos quatre molécules, tout en étant la plus représentée dans DEPHY, c'est elle que nous privilégierons (en grain ainsi qu'en fourrage). Afin de tirer de premiers éléments à propos des conditions d'utilisation, nous nous intéresserons à l'équilibre des covariables pré et post-pondération, hypothèse importante de la méthode présentée rapidement en partie [6.1](#), et plus largement en [Annexe 9](#). Nous nous attacherons ici à

⁹⁴ Ascenza indique une activité principalement foliaire, mais également racinaire sous certaines conditions (humidité suffisante et en utilisant une dose suffisante).

synthétiser les résultats, et le détail de ces derniers, molécule par molécule, est renvoyé en [Annexe 11](#).

De manière globale, l'analyse ne met pas en évidence un surcoût significatif à l'utilisation de l'une de ces quatre molécules en substitution au S-métolachlore, avec toutefois une réserve importante sur la situation de la pendiméthaline, pour laquelle nos estimations manquent de précision en raison d'un faible nombre de parcelles disponibles dans DEPHY. Plus largement et outre les flores visées ou les habitudes d'usage, nous détectons très peu de différences, techniques ou économiques, entre les parcelles traitées au S-métolachlore et celles recevant l'une de ces molécules, à l'exception de la sulcotrione en maïs grain, pour laquelle les parcelles traitées au S-métolachlore présentent de meilleurs rendements. Les rares différences significatives concernent principalement les IFT, et sont synthétisées dans le [Tableau 30](#).

Tableau 30 : Synthèse des différences significatives pour les indicateurs technico-économiques de DEPHY entre le S-métolachlore et des alternatives potentielles

Culture	Alternative	Rendements	Fréquence de désherbage mécanique	IFT herbicide	Charges opérationnelles	Charges de mécanisation	Marge directe
Maïs grain	dmta-P	NS	NS	-0,13	NS	NS	NS
Maïs fourrage	dmta-P	NS	NS	-0,2	NS	NS	NS
Maïs grain	Pendiméthaline	NS	+ 0,13 passages	- 0,34	NS	NS	NS
Maïs fourrage	Pendiméthaline	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Maïs grain	Sulcotrione	+ 9,03 q/ha	NS	0,2	NS	NS	NS
Maïs fourrage	Sulcotrione	NS	NS	0,18	NS	NS	NS

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

NS : non-significatif

Note : en vert, les parcelles traitées au S-métolachlore présentent un avantage. En orange, un désavantage.

Parmi les 3 alternatives potentielles étudiées, il ressort de notre analyse que le diméthénamide-P est l'herbicide sur lequel pèse le plus fort risque de report, dans l'hypothèse d'une interdiction du S-métolachlore : aucun surcoût significatif n'est mis en évidence par l'analyse, et les conditions communes d'utilisations semblent assez courantes. Le dmta-P est de plus la principale molécule identifiée comme susceptible de se substituer au S-métolachlore par les ITA, principalement de par son action sur les graminées estivales.

La sulcotrione sera vraisemblablement beaucoup moins mobilisée même si elle pourrait l'être dans certaines conditions pédoclimatiques (notamment en conditions humides) et sur des graminées plus spécifiques que le S-métolachlore, ou bien sur des fortes infestations de dicotylédones (voir spectres d'action en Annexe 4). Comme évoqué précédemment, nous présentons la sulcotrione pour deux raisons principales : i) la forte augmentation de sa

mobilisation au Luxembourg suite à l'interdiction du S-métolachlore et ii) elle permet d'illustrer le cas d'une molécule qui pourrait être mobilisée sur maïs en cas de faible pression en graminées (situation favorisée par la mobilisation de leviers prophylactiques). D'autres molécules auraient pu être retenues pour la comparaison comme le thiencarbazone-méthyl (inhibiteur de l'ALS) dont l'utilisation a aussi augmenté au Luxembourg depuis l'interdiction du S-métolachlore.

Enfin, la pendiméthaline pourrait en faire de même face à spectre d'adventices plus restreint, avec une moindre infestation par des graminées estivales. Si la pendiméthaline est, en pratique, utilisée dans des situations plus humides que le S-métolachlore, elle ne peut pas l'être sur sol filtrant, car elle devient alors phytotoxique pour le maïs. L'utilisation de la pendiméthaline et de la sulcotrione semble moins évidente en conditions plus sèches et en présence de sols sableux. On voit que l'approche aide à préciser les situations potentiellement tendues qui peuvent mériter des vérifications plus poussées.

Il nous paraît possible d'anticiper dès à présent les conséquences technico-économiques mais aussi environnementales d'un report massif sur le dmta-P, et partiel sur d'autres molécules telles que la pendiméthaline ou la sulcotrione, en cas d'interdiction du S-métolachlore. Notons dès à présent que sulcotrione n'est autorisée que pour le désherbage du maïs et du sorgho (sur l'ensemble des cultures concernées par le S-métolachlore), que la pendiméthaline couvre l'ensemble des cultures pouvant recevoir du S-métolachlore à l'exception de l'Ananas et de la betterave, et que le diméthénamide-P couvre les cultures de betterave (hors potagère), le maïs, le sorgho et le tournesol.

Le **Tableau 31** synthétise les phrases de risques pour la santé et l'environnement du S-métolachlore et des trois substances selon la *Pesticide Properties DataBase*⁹⁵ (Lewis *et al.*, 2016). On constate que toutes présentent les mêmes risques de contamination des eaux, et que le diméthénamide-P et la sulcotrione présentent des risques supplémentaires par rapport au S-métolachlore.

⁹⁵ Dans EPHY, les phrases de risques sont données par produit et non par SA

Tableau 31 : Phrases de risques pour le S-métolachlore et des alternatives potentielles

	S-métolachlore	Diméthamide-P	Pendiméthaline	Sulcotrione
H373 : Risque présumé d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée				X
H302 : Nocif en cas d'ingestion		X		
H317 : Peut provoquer une allergie cutanée	X	X	X	X
H400 : Très toxique pour les organismes aquatiques	X	X	X	X
H410 : Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets à long terme	X	X	X	X

Source : Pesticide Properties DataBase (Lewis et al., 2016)

Enfin, la sulcotrione et la pendiméthaline sont toutes deux candidates à la substitution⁹⁶. Ainsi, ces substances actives présentent toutes un montant de redevance pour pollution diffuse (RPD) égal ou supérieur à celui du S-métolachlore, qui est de 3€ par kilogramme. En ce sens, l'Annexe 12 présente les montants de RPD ainsi que différents niveaux d'alertes associés à une sélection des herbicides les plus utilisés en France en 2020.

6.5. Le désherbage mixte dans DEPHY

Jusqu'ici, nous avons comparé les parcelles de DEPHY ayant été traitées au S-métolachlore (groupe 1) avec celles recevant une ou plusieurs alternatives, qu'elles soient chimiques (groupe 2) ou non-chimiques (groupe 4). Or, comme nous l'avons vu en partie 5.3, une partie des leviers permettant de réduire l'usage des herbicides en général interviennent dans le cadre d'un désherbage mixte, donc mêlant du désherbage chimique à du désherbage mécanique. Au sein des données issues de DEPHY, la question se pose d'identifier les parcelles en situation de

⁹⁶ Règlement d'exécution (UE) 2015/408

désherbage mixte afin de réaliser la même analyse que plus haut, et d'en identifier le surcoût potentiel relativement à un désherbage uniquement chimique.

Une manière de repérer ces pratiques dans DEPHY est de croiser la fréquence de désherbage mécanique avec l'IFT herbicide, deux indicateurs directement disponibles. Une parcelle ayant un IFT herbicide non nul tout en pratiquant le désherbage mécanique peut ainsi être identifiée comme pratiquant le désherbage mixte. Nous avons ainsi considéré qu'une parcelle pratiquait le désherbage mixte si elle présentait une fréquence de désherbage mécanique supérieure ou égale à 1 et un IFT herbicide non-nul. Dans ce qui suit, il convient de garder en tête qu'une telle définition est large. Nous avons poursuivi avec la méthodologie présentée en partie [6.1](#) pour comparer les parcelles recevant un désherbage chimique sans complément mécanique substantiel avec les parcelles en désherbage mixte. Le [Tableau 32](#) et le [Tableau 33](#) présentent respectivement les résultats de ce travail pour le maïs grain et le maïs fourrage, pour lesquels nous avons pu rassembler des effectifs suffisants.

On note les mêmes tendances pour les deux cultures. D'un côté, le recours au désherbage mixte n'a pas d'influence significative sur les rendements. De l'autre, il semble avoir un impact, visible en maïs grain mais non en maïs fourrage, sur les résultats économiques des parcelles, en termes de marge directe. Pour être plus précis, les parcelles en désherbage mixte en maïs grain présentent une marge directe inférieure de 90€/ha à la marge directe des parcelles du groupe « tout chimique », et ce, malgré des rendements similaires. Dans le détail, on constate que le désherbage mixte est corrélé à un recours accru au travail mécanique du sol et donc à une augmentation des coûts lui étant associés (charges de mécanisation et de main d'œuvre) de l'ordre de 70 à 80 €/ha. La baisse des charges opérationnelles, de l'ordre de 20 €/ha, ne permet pas de compenser ce surcoût. La pratique du désherbage mixte, telle que capturée dans DEPHY, semble donc être en mesure de maintenir des rendements au niveau du conventionnel classique, au prix d'un effort supplémentaire impliquant des surcoûts significatifs.

Tableau 32 : Analyse du désherbage mixte dans DEPHY - maïs grain

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Tout chimique	1514	95,42	2,09	0	2,75	1,65	376,03
Mixte	362	93,4	3,98	1,3	2,42	1,33	355,68
ATE		2,02	-1,9	-1,3	0,33	0,32	20,35
Ecart-type		1,9	0,11	0,04	0,07	0,04	10,14
Significativité		NS	***	***	***	***	*

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Tout chimique	290,95	90,63	96,67	1636,48	1260,45	872,83
Mixte	342,73	106,91	119,84	1600,86	1245,18	782,62
ATE	-51,78	-16,28	-23,17	35,61	15,27	90,22
Ecart-type	7,97	2,65	4,27	39,24	38,93	38,44
Significativité	***	***	***	NS	NS	*

Source : Propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

Note : NS = Non significatif. Pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Tableau 33 : Analyse du désherbage mixte dans DEPHY - maïs fourrage

	Nombre de parcelles	Rendement (t/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
Tout chimique	1277	13,19	2,39	0	2,31	1,45	385,71
Mixte	272	13,05	4,13	1,3	2,09	1,13	361,63
ATE		0,14	-1,75	-1,3	0,22	0,32	24,08
Ecart-type		0,22	0,11	0,05	0,07	0,05	14,77
Significativité		NS	***	***	***	***	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
Tout chimique	330	110,06	94,7	1745,17	1359,46	934,76
Mixte	390,12	126,25	114,73	1734,57	1372,95	868,1
ATE	-60,13	-16,19	-20,02	10,59	-13,48	66,66
Ecart-type	9,9	2,93	2,91	29,62	32,33	35,94
Significativité	***	***	***	NS	NS	NS

Source : Propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

Note : NS = Non significatif. Pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

6.6. Synthèse de l'analyse des parcelles de DEPHY

L'analyse économique de DEPHY réalisée dans ce rapport reste soumise à une limite notoire. Bien que la pondération par les scores de propension tende à nous placer dans une situation où les parcelles sont le plus comparable possible, la flore effectivement présente ou suspectée de l'être dans les parcelles reste un facteur de première importance dans le choix de la conduite du désherbage. Cette situation peut découler d'un historique qui mélange des causes externes imposées comme le pédoclimat, et des causes plus individuelles comme la prise en considération du risque de résistance ou la gestion des PSD par des mesures prophylactiques. Actuellement, il n'existe pas de compilation exploitable exhaustive à l'échelle de la France et établie à un grain suffisamment fin, pour rendre compte du niveau de salissement des parcelles par une flore spécifique (graminées, dicotylédones, vivaces, etc.). De plus, l'agriculteur ne renseigne pas de manière systématique ce qui justifie son choix de pratique ou l'étendue des précautions qu'il intègre. Ainsi, on ne maîtrise pas dans quelle mesure les choix de désherbage que nous avons pu analyser résultent de situations floristiques très contrastées. La logique du raisonnement agronomique amène en effet à utiliser le S-métolachlore lorsqu'il existe une forte pression des graminées et, par conséquent, son utilisation ne constitue pas une garantie d'accéder à un meilleur rendement que des parcelles initialement propres et n'ayant pas recours au S-métolachlore.

Sous cet angle, il paraît logique de ne retrouver que peu de différences économiques entre les parcelles du groupe 1 et celles du groupe 2.

La synthèse du **Tableau 34** montre que seuls les IFT, et dans certains cas les charges opérationnelles, sont supérieurs pour les parcelles traitées au S-métolachlore. En effet, si le S-métolachlore est systématiquement utilisé dans des parcelles plus contaminées en graminées estivales, l'effort supplémentaire à endosser suffit à expliquer la hausse d'IFT et de charges opérationnelles. Dit autrement, du fait de variations non connues de l'état de la flore, le choix par un agriculteur de retenir le S-métolachlore plutôt qu'une autre molécule herbicide peut conduire à laisser un biais non accessible par l'analyse. Les seules garanties que ce biais puisse être limité résident dans la diversité des situations couvertes qui se recouvrent largement entre les groupes 1 et 2 et dans le fait que la comparaison entre S-métolachlore et diméthénamide-P ne montre pas d'écart. De plus, l'état moyen de la flore est partiellement intégré *via* la différenciation des cultures ainsi que la prise en compte dans les facteurs confondants des rotations-type et des conditions pédoclimatiques jouant conjointement sur le risque de salissement.

Nous ne sommes pas non plus en mesure de vérifier que toutes les parcelles du groupe 1, utilisatrices de S-métolachlore, sont effectivement dans une situation de forte pression des graminées adventices, et que toutes les parcelles du groupe 2 sont effectivement plus propres. Il apparaît probable que le S-métolachlore soit utilisé de manière préventive, sans avoir la certitude d'une forte infestation, dans l'espoir de s'en prémunir, pour son action antidicotylédone, ou bien par habitude. De plus, les parcelles du groupe 2 comprennent celles

traitées au dmta-P, qui s'utilise généralement dans les mêmes conditions de salissement que le S-métolachlore.

Tableau 34 : Synthèses des principaux résultats de l'analyse économique de DEPHY

Culture	Versus	Rendements	Fréquence de désherbage mécanique	IFT herbicide	Charges opérationnelles	Charges de mécanisation	Marge directe
Maïs grain	Groupe 2	+ 4,21 q/ha	NS	0,21	+ 28,95 €/ha	NS	NS
Maïs grain	Groupe 4	+ 32,03 q/ha	- 2,76 passages	ND	+ 206,07 €/ha	- 69,62 €/ha	NS
Maïs fourrage	Groupe 2	NS	NS	0,12	+ 35 €/ha	NS	NS
Maïs fourrage	Groupe 4	+ 2,74 t/ha	- 2,28 passages	ND	+ 273,96 €/ha	NS	- 274,8 €/ha
Soja	Groupe 2	NS	NS	0,5	NS	NS	NS
Soja	Groupe 4	+ 8,13 q/ha	- 2,84 passages	ND	+ 153,3 €/ha	- 49,88 €/ha	- 155,95 €/ha
Tournesol	Groupe 2	NS	NS	0,45	NS	NS	NS
Tournesol	Groupe 4	+ 6,27 q/ha	- 1,93 passages	ND	+ 126,09 €/ha	- 39,58 €/ha	NS

NS : Non significatif ; ND : Non disponible

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

Note : en vert, les parcelles traitées au S-métolachlore présentent un avantage. En orange, un désavantage.

Ainsi, et sans rejeter les limites évoquées plus haut, il nous semble que l'analyse, menée sur l'ensemble du territoire français, puisse apporter des enseignements quant à l'existence d'un surcoût à l'utilisation d'alternatives au S-métolachlore. En particulier, la comparaison aux parcelles traitées au dmta-P dans le cas du maïs ne montre pas de tel surcoût. De manière plus générale, la comparaison aux parcelles désherbant chimiquement sans S-métolachlore, dont celles ayant recours à la pendiméthaline et à la sulcotrione, va dans le même sens, tout en rappelant les limites associées aux spectres de ces deux molécules.

Par rapport aux parcelles du groupe 4, l'usage du S-métolachlore est systématiquement corrélé à de meilleurs rendements (+20 à +25%), ceux-ci pouvant même être conséquents en maïs grain (+35% environ), qui sont à rapprocher des différences de fertilisation quand on compare agriculture biologique et conventionnelle. Le nombre d'opérations de travail du sol, ainsi que la fréquence de désherbage mécanique sont systématiquement plus faibles sur les parcelles traitées. En conséquence, les charges de mécanisation et les coûts de main d'œuvre tractoriste y sont aussi plus faibles (à l'exception du maïs fourrage pour les charges de mécanisation). En revanche, les charges opérationnelles y sont systématiquement plus élevées, de sorte que les parcelles ayant recours à un désherbage non-chimique ont des charges totales (opérationnelles, main d'œuvre tractoriste et mécanisation) inférieures à celles recevant un désherbage chimique. Finalement, l'avantage économique du S-métolachlore une saison donnée face aux conduites de désherbage non-chimiques est nul en maïs grain et en tournesol, et négatif en maïs fourrage et en soja. En général, la perte de rendement des alternatives non-chimiques est compensé par i) les moindres charges,

notamment liées aux intrants (- 55% à - 70% en moyenne pour les charges opérationnelles ; - 10% à - 30% pour les charges totales), et ii) les prix de vente associés au label bio plus élevés qu'en conventionnel (entre + 30% et + 50% en moyenne).

Enfin, il est important de garder en tête que ces analyses ont été effectuées en l'absence d'informations pourtant essentielles à la compréhension des choix des agriculteurs : outre la flore présente, déjà mentionnée, les aides ainsi que les primes liées à des cahiers des charges publics (zone de captage d'eau) ou privés, de même que le contenu de ces cahiers des charges, ne sont pas connus. L'absence de ces informations constitue une autre limite de notre analyse, et nous pensons qu'il serait bénéfique de rendre disponible autant que possible des données permettant de la combler (cartographie des zonages sensibles à l'échelle de la France, par exemple).

Par ailleurs, si notre analyse conclut à une absence de surcoût à la mobilisation d'alternatives non-chimiques au S-métolachlore, elle ne prend en considération que ce qui est directement appréhendable du point de vue économique. Ainsi, la mise en œuvre d'alternatives non-chimiques peut s'avérer plus contraignante. Elle peut impacter le temps de travail avec des conséquences lors des pics d'activités. Par ailleurs, le désherbage mécanique nécessite un plus grand nombre de passages et une vigilance accrue sur les stades des adventices. Il conduit à d'autres types d'impacts : risque accru d'érosion des sols, émission de GES, pénibilité, etc. Ainsi, bien qu'il ne soit pas systématiquement avantageux financièrement, le recours au S-métolachlore peut être préféré à ses alternatives. A noter que nous n'analysons pas non plus ces types d'impacts (santé et l'environnement) liés à la mobilisation du S-métolachlore ou de ses alternatives chimiques.

7. Conclusion et perspectives

Son spectre d'action et le retrait d'autres herbicides expliquent l'engouement pour le S-métolachlore.

La raison principale de la forte mobilisation du S-métolachlore est son efficacité sur les graminées estivales (notamment PSD), adventices souvent difficiles à contrôler dans les cultures de printemps et d'été des systèmes en grandes cultures. Il s'est imposé depuis plusieurs années comme le troisième herbicide le plus utilisé en France, après le glyphosate et le prosulfocarbe, avec 1 918 tonnes de matière active achetées en 2020. Un long historique de retraits de molécules qui avaient une place centrale dans les programmes de désherbage a progressivement renforcé sa mobilisation.

Il est hautement improbable qu'émerge un nouvel herbicide de substitution.

La découverte de nouvelles familles herbicides reste très improbable à ce jour. L'homologation d'un herbicide d'une nouvelle famille des inhibiteurs des thioesterases d'acides gras par BASF⁹⁷ serait une première depuis 35 ans. La recherche se poursuit et il se peut en revanche que d'autres moyens de lutte chimique voient à terme le jour en utilisant des technologies nouvelles ciblées comme l'ARN interférence ou les micro-peptides. Ces perspectives restent toutefois assez lointaines. Il apparaît incontournable d'investir en parallèle dans la mobilisation d'alternatives non chimiques pour gagner en indépendance vis-à-vis d'herbicides dont l'avenir reste incertain compte tenu des profils toxicologiques et écotoxicologiques ou du développement de résistances à plusieurs familles herbicides. Si le S-métolachlore échappe à ce jour à de telles résistances, on ne peut garantir que ce sera indéfiniment le cas.

Des alternatives chimiques et non-chimiques au S-métolachlore existent et l'analyse économique souligne l'absence de surcoût global à la mobilisation de ces dernières sur les parcelles étudiées.

L'utilisation d'autres herbicides chimiques au sein du réseau DEPHY n'est pas corrélée à de moins bons résultats économiques à l'échelle de la parcelle. C'est particulièrement vrai pour le diméthénamide-P, principal substitut au S-métolachlore, et molécule utilisée dans conditions sensiblement similaires. Il existe ainsi une probabilité élevée de report sur ce dernier en cas d'interdiction du S-métolachlore, alors-même qu'il est déjà détecté dans les eaux à destination de la consommation humaine. Ce report est d'autant plus probable que le nombre de substances actives partageant l'efficacité du S-métolachlore sur PSD est limité.

L'identification des alternatives non-chimiques est plus délicate, car elle implique de devoir comparer des systèmes aux logiques différentes (conventionnel vs. AB). Sur les parcelles

⁹⁷ <https://www.cultivar.fr/sinformer/un-nouveau-mode-daction-pour-lutter-contre-les-graminees-resistantes>

étudiées, l'analyse économique ne met pas en évidence un avantage économique global à l'utilisation du S-métolachlore, par rapport à un recours au désherbage non-chimique. En revanche, cette conclusion est majoritairement portée par des prix de vente des récoltes supérieurs en AB. Par ailleurs, que ce soit pour les systèmes conduits en bio et ceux conduits en conventionnel, la question de la dépendance aux énergies fossiles peut se poser, tout particulièrement à l'heure où les prix de ses dernières s'emballent.

Des facteurs structurels renforcent aujourd'hui le choix d'avoir recours au S-métolachlore et contribuent à freiner le recours à ses alternatives, notamment non chimiques.

Tout d'abord, le recours au désherbage mécanique peut avoir lieu i) si les conditions pédoclimatiques le permettent et ii) quand les adventices sont encore à un jeune stade de développement. Si la majorité des situations nécessitent deux à quatre passages (herse, houes, bineuses) et un semis plus profond, les levées échelonnées des adventices peuvent nécessiter un plus grand nombre de passages avec des conséquences défavorables sur la conduite des cultures, la dépendance aux énergies fossiles et sur les sols. Ce dernier point motive d'ailleurs certains agriculteurs à pratiquer l'agriculture de conservation des sols, qui implique de renoncer au travail mécanique de ce dernier. Par ailleurs, certaines cultures (notamment en production de semences) ont des cahiers des charges stricts imposant le recours à certains pesticides, dont le S-métolachlore, et limitant ainsi la mobilisation de leviers qui pourraient diminuer la dépendance à cette molécule (*e.g.* mesures prophylactiques, applications localisées, combinaison avec des moyens mécaniques). En production de semences hybrides de maïs, préciser les lignées pour lesquelles le S-métolachlore est la seule molécule supportée pourrait contribuer à limiter ses usages sur les lignées supportant une plus large gamme de molécules. De plus, desserrer le niveau de tolérance des lignées parentales à d'autres herbicides pourrait aussi contribuer à réduire la dépendance de cette filière au S-métolachlore.

Enfin, les débits de chantier sont plus importants pour du désherbage mécanique que pour du désherbage chimique (selon le type d'outil et sa largeur) ; l'augmentation de la taille des exploitations freine d'autant plus le déploiement du désherbage mécanique. Le guidage de précision permet de faciliter et d'accélérer ce dernier mais i) encore peu d'agriculteurs sont équipés et ii) il ne permet actuellement pas de désherber aussi sur le rang des cultures concernées en post-levée.

Réduire la dépendance au S-métolachlore nécessite d'impliquer l'ensemble des maillons des filières, et de combiner différents leviers.

Si l'agriculture biologique contribue à répondre à l'enjeu de réduction de l'utilisation des herbicides et facilite la préservation de la qualité des eaux, d'autres modèles agricoles peuvent y participer à court terme. En premier lieu, il apparaît nécessaire de mobiliser autant que possibles des mesures agronomiques prophylactiques au cours de l'année de l'installation de la culture et des années précédentes. Il peut s'agir par exemple de faux semis, d'ajustement des dates de semis, de diversification de la rotation, etc. De même, il apparaît opportun de

travailler sur le recours à un obstacle physique au développement des adventices, via un paillage ou un enherbement permanent. De nouveaux équipements seraient alors nécessaires pour faciliter leur gestion. Enfin, la capture des menues pailles pour éviter le retour au sol des semences adventices ou l'écimage peuvent aussi trouver leur place.

Au-delà de ces leviers, des systèmes de désherbage mixtes associant désherbage mécanique en complément d'une intervention chimique participent à réduire la dépendance au S-métolachlore. Ils peuvent permettre de réduire les doses d'herbicide de rattrapage après l'emploi de S-métolachlore en pré-levée. Par ailleurs, la généralisation, au sein de ces systèmes mixtes, de l'application du S-métolachlore uniquement sur le rang, pour toutes les cultures sarclées ou qui pourraient l'être, associée à une gestion de l'inter-rang par paillage, désherbage mécanique ou physique, ou enherbement entraînerait une réduction importante i) des quantités de S-métolachlore appliquées à l'hectare et ii) des quantités de S-métolachlore utilisées à l'échelle de la France. Néanmoins, la modernisation du parc matériel est nécessaire pour atteindre des débits de chantier satisfaisants. Un accompagnement technique et économique des agriculteurs appuierait ces évolutions.

Ainsi, la mise en place de ces différents leviers implique notamment de i) développer des outils techniquement adaptés et financièrement accessibles aux agriculteurs et ii) d'assurer l'existence de filières collectant et valorisant les sous-produits générés. C'est donc bien par des contributions de la part des différents acteurs des filières, dont l'offre variétale, le machinisme et la collecte, que la transition vers une moindre dépendance au S-métolachlore sera possible.

Des solutions au stade de prototype gagneraient à être explorées, ce qui dépasse actuellement le cadre réglementaire de l'évaluation comparative fixé par le règlement (CE) N° 1107/2009.

Une partie des leviers permettant de réduire la dépendance au S-métolachlore correspond à des situations minoritaires ou à l'état de prototypes. Les variétés permettant une bonne gestion de l'enherbement sont encore mal identifiées, et les équipements de guidage permettant le désherbage du seul rang sont peu répandus parmi les exploitants. Dès lors, leur étude sort du cadre fixé pour l'évaluation comparative, qui impose que les alternatives soient « *d'usage courant* ».

Pourtant, il semble pertinent d'explorer l'ensemble des solutions possibles, qu'elles soient déjà déployées à grande échelle, au stade de prototype à l'instar du désherbage électrique de l'entre-rang, voire encore inexistantes. Les envisager comme alternatives semble nécessaire pour diversifier au maximum les solutions permettant de desserrer la dépendance de l'agriculture au S-métolachlore.

L'analyse de la situation dans d'autres Etats membres de l'UE est riche en informations ; le partage des données pourrait néanmoins être facilité.

Le Luxembourg a interdit l'utilisation du S-métolachlore sur l'ensemble de son territoire depuis 2015 ; et il estime que l'amélioration de ses aquifères profonds ne s'amorcera qu'aux alentours de 2030.

Au-delà de ce cas spécifique, il semble qu'un partage facilité des données entre Etats Membres serait bénéfique pour faciliter la projection qu'implique ce type de travaux. Il peut s'agir des déclinaisons réglementaires propres à chaque Etat et relatives aux produits phytosanitaires (*e.g.* cultures concernées, doses et fréquences d'utilisation autorisées, distances à respecter aux points d'eau ou aux habitations), des bases de données sur les pratiques culturales, des outils financiers mis à disposition des agriculteurs pour limiter la dépendance à certaines molécules, etc.

Pour aller plus loin, l'étude de cahiers des charges privés valorisant le non-recours au S-métolachlore pourrait être menée en complément des travaux présentés dans ce rapport.

La manière dont le non recours au S-métolachlore, et au désherbage chimique de manière plus générale, est inscrit dans certains cahiers des charges mériterait d'être instruite. Une analyse de la compensation financière attribuée spécifiquement au non recours au S-métolachlore (qui est en général une contrainte parmi d'autres) serait intéressante, ainsi que d'étudier les impacts technico-économiques de l'application de tels cahiers des charges sur les exploitations agricoles. Dans un second temps, une analyse des impacts de la généralisation de tels cahiers des charges sur la qualité de l'eau et la contraction des coûts pour maintenir un bien commun pour la collectivité serait également une piste intéressante.

Il existe une marge d'amélioration concernant la structuration des bases de données.

DEPHY rend disponible un grand nombre d'indicateurs économiques, ils ne sont pas pour autant exhaustifs. De manière générale, la possibilité de coupler des données sur les pratiques agricoles (aujourd'hui accessibles notamment *via* DEPHY ou les Enquêtes Pratiques culturales) et des données économiques (*via* le RICA) sur une même exploitation reste une marge d'amélioration qui dépasse le cadre de cette étude et serait bénéfique à un grand nombre de travaux. Une base de données compilant les pressions adventices, à condition d'avoir une portée pluriannuelle et une échelle fine, serait aussi précieuse pour traiter l'ensemble des questions relatives au désherbage.

Le règlement (CE) 1107/2009 semble surtout adapté à la comparaison entre alternatives chimiques.

L'application de l'article 50 du règlement (CE) 1107/2009 semble adaptée à traiter une comparaison entre solutions chimiques pouvant se substituer. Néanmoins, son application apparait beaucoup plus difficile quand il s'agit de comparer des alternatives de natures différentes (*e.g.* chimiques vs. mécaniques) et avec des logiques différentes (*e.g.* curatif vs. préventif). Il est ainsi difficile de faire entrer dans ce cadre ce qui relève de la reconception en profondeur des systèmes agricoles. Ainsi, certains leviers agroécologiques peuvent avoir d'importants impacts en termes de sobriété d'usage des ressources ou d'efficacité de leur

utilisation. Ces leviers ne sont pas aisément évalués d'un point de vue économique et on peine par ailleurs à considérer ce qui relève des retombées sur la santé et l'environnement.

Ainsi, il pourrait être bénéfique, dans une refonte de l'article 50, d'éviter une approche molécule par molécule qui se restreint à des logiques de substitution. Ces dernières risquent de transférer des problématiques aussi diverses soient-elles (résistances, impacts sur l'environnement, etc.) sur une autre molécule, voie de mener à multiplier les situations orphelines. Il serait souhaitable de pouvoir approcher différemment l'évaluation comparative en travaillant par famille d'usages et non par molécule. Dans l'exemple traité, la problématique pourrait être : « Comment assurer le désherbage des systèmes de production incluant des cultures de printemps ? Sous quelles conditions peut-on le faire sans recourir à la chimie ? Cela a-t-il vocation à rester dans le périmètre de l'AB ou peut-on l'imaginer dans des systèmes 'intermédiaires' maintenant l'accès à une part de fertilisation minérale ? » Autant de facettes qui peuvent dessiner des modalités différentes de conduite de l'agriculture.

Bibliographie

N.B. : Un effort particulier a été apporté afin de citer des références en accès grand public.

- Administration de la gestion de l'eau du Luxembourg. (2014). *Pollution pesticides dans l'eau potable* [Communiqué de presse]. <https://gouvernement.lu/dam-assets/fr/actualites/communiques/2014/11-novembre/04-pesticides/presentation-conference-presse-041114.pdf>
- Agreste (2019). *Statistique agricole annuelle 2017-2018. Données définitives*. 64 p. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd1916/cd2019-16_SAA%20donnees%20definitivesV4.pdf
- Agreste (2020). *Chiffres et données. Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017. Principaux résultats*. Octobre 2020 N°9. 21p.
- Agreste (2021). *Statistique agricole annuelle 2020. Chiffres provisoires*. 62 p.
- Agrosyst (2019). *Guide Utilisateur*. Mise à jour de novembre 2019. 128p.
- Agrosyst (2020). *Indicateurs de performance*. Mise à jour de septembre 2020. 28p.
- Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary toxicology*, 2(1), 1-12.
- Anses (2014). *AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la détermination de valeurs sanitaires maximales (V_{MAX}) pour des acides sulfonique (ESA) et oxanilique (OXA) de l'alachlore et du métolachlore*. Saisine n°2013-SA-0187. 22p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2013sa0187.pdf>
- Anses (2018). *Phytopharmacovigilance. Synthèse des données de surveillance. Sulcotrione*. 10p. https://www.anses.fr/fr/system/files/Fiche_PPV_Sulcotrione.pdf
- Anses (2018). *Phytopharmacovigilance. Synthèse des données de surveillance. S-métolachlore*. 12 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/Fiche_PPV_S-metolachlore.pdf
- Anses (2019). *Surveillance de la qualité des eaux de consommation et protection de la santé humaine : l'Anses propose une méthode pour identifier les métabolites de pesticides pertinents*. [https://www.anses.fr/fr/content/surveillance-de-la-qualit%C3%A9-des-eaux-de-consommation-et-protection-de-la-sant%C3%A9-humaine-#:~:text=Cette%20directive%20europ%C3%A9enne%20fixe%20des,un%20m%C3%A9tabolite%20pertinent%20\(1\)](https://www.anses.fr/fr/content/surveillance-de-la-qualit%C3%A9-des-eaux-de-consommation-et-protection-de-la-sant%C3%A9-humaine-#:~:text=Cette%20directive%20europ%C3%A9enne%20fixe%20des,un%20m%C3%A9tabolite%20pertinent%20(1))
- Anses (2020). *Méthodologie de comparaisons des alternatives au formaldéhyde*. 99p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2014SA0236Ra-Methodo.pdf>
- Anses (2021a). *Non-conformités dans les eaux destinées à la consommation humaine dues aux métabolites du métolachlore. Signalement n°82. Extrait du rapport d'analyse et d'interprétation d'un signalement transmis à l'Anses au titre de la phytopharmacovigilance*. 2021-AST-0088. 119p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/PPV2021AST0088Ra.pdf>

- Anses (2021b). *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la détermination de la pertinence pour les eaux destinées à la consommation humaine pour les métabolites de pesticides : métolachlore OXA (CGA 51202), métolachlore ESA (CGA 354743) et métolachlore NOA 413173 (SYN 547627)*. 22 p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2019SA0129.pdf>
- Anses (2021c). *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la demande d'autorisation exceptionnelle d'utiliser pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, l'eau du forage de la Veauce à Saint-Julien d'Armagnac (Landes) ne respectant pas la limite de qualité réglementaire pour le paramètre métolachlore ESA dans les eaux brutes. Saisine n°2021-SA-0029*. 24 juin 2021. 10p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2021SA0029.pdf>
- Arvalis (2010). *Désherbage mécanique : combien coûte l'intégration du désherbage mécanique ?* <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/combien-coute-lintegration-du-desherbage-mecanique>
- Arvalis (2014). *Désherbage : résultats, nouveautés et perspectives*. 22p. https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.jsp?id=24432&prop=file
- Arvalis (2021). *Choisir & Décider. Maïs, Variétés et interventions*, Centre Val de Loire, Ile de France. 95p. https://www.arvalis-infos.fr/file/galleryelement/pj/80/e1/b9/98/guide_preco_mais_centre_iledefrance_1861283664729572283.pdf
- Arvalis (2022a). *Choisir & Décider. Maïs, Variétés et interventions*, Centre Val de Loire, Ile de France. 101p. https://www.arvalis-infos.fr/file/galleryelement/pj/c6/34/60/1b/guide_preco_mais_centre_iledefrance_2021-6831637063990697583.pdf
- Arvalis (2022b). *Choisir & Décider. Maïs, Variétés et interventions*, Sud-Ouest. 33p. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/guide_precos_choisir_mais_2022_sud_ouest355670261247758134.pdf
- Austin, P. C. (2009). Balance diagnostics for comparing the distribution of baseline covariates between treatment groups in propensity-score matched samples. *Statistics in medicine*, 28(25), 3083-3107.
- Austin, P. C. (2011). An introduction to propensity score methods for reducing the effects of confounding in observational studies. *Multivariate behavioral research*, 46(3), 399-424.
- Ballabio, C., Panagos, P., & Monatanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, 110-123.
- Ballabio, C., Lugato, E., Fernández-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borrelli, P., Montanarella, L. & Panagos, P. (2019). Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma*, 355, 113912.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press.
- Blaser, H. U., Buser, H. P., Coers, K., Hanreich, R., Jalett, H. P., Jelsch, E., ... & Wegmann, A. (1999). The chiral switch of metolachlor: The development of a large-scale enantioselective catalytic process. *Chimia International Journal for Chemistry*, 53(6), 275-280.

- BNVD Traçabilité (2022). *Données sur les ventes de produits phytopharmaceutiques*. Office français de la biodiversité. www.ofb.gouv.fr©. Données extraites le 15/09/2022 sur <https://ventes-produits-phytopharmaceutiques.eaufrance.fr/>
- Borcard, D., Legendre, P., & Drapeau, P. (1992). Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 73(3), 1045-1055.
- Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huyghe C., *Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique*. 2020, INRAE, 159p.
- Chambre d'Agriculture d'Alsace (2018). *Le DÉSHÉRBAGE MÉCANIQUE des grandes cultures en Alsace*. p8. https://alsace.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/040_Inst-Alsace/RUBR-environnement/Protection_de_l_eau/GUIDE_DESHÉRBAGE_MECANIQUE_Decembre_2018.pdf
- Chambre d'Agriculture d'Alsace (2021). *Phytosanitaires et métabolites. Le S-métolachlore*. 14p.
- Chambre d'Agriculture d'Alsace (2022). *Guide des grandes cultures et des cultures fourragères*. 223p.
- Chambre d'Agriculture de Bretagne (2018). *Conseils de saison cultures légumières*. 2p. [http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/30511/\\$File/LeGlazic-Fevrier%202018-%20Haricot-frais-%C3%A0-ecosser.pdf?OpenElement](http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/30511/$File/LeGlazic-Fevrier%202018-%20Haricot-frais-%C3%A0-ecosser.pdf?OpenElement)
- Chambre d'Agriculture de Bretagne (2021). *DESHÉRBAGE MECANIQUE : Accompagnement individuel*. 6p. [https://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/34986/\\$File/2021_Fiche_conseil_D%C3%A9shM%C3%A9ca_Ma%C3%AFs_Chambre_d_agriculture_de_Bretagne.pdf?OpenElement](https://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/34986/$File/2021_Fiche_conseil_D%C3%A9shM%C3%A9ca_Ma%C3%AFs_Chambre_d_agriculture_de_Bretagne.pdf?OpenElement)
- Chambre d'Agriculture de Bretagne (2022). *Semis des maïs*. 3p. [https://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/36190/\\$File/FICHE%20IMPLANTATION%20MAIS%202022%2003%2010.pdf?OpenElement](https://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/36190/$File/FICHE%20IMPLANTATION%20MAIS%202022%2003%2010.pdf?OpenElement)
- Chambre d'Agriculture de l'Oise (2013). *Désherbage mixte, quand mécanique et chimique se combinent*. 16p. https://hautsdefrance.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Hauts-de-France/plaquette_deshherbage_mecanique.pdf
- Chambre d'Agriculture Pays de la Loire (2020). *S-métolachlore, Alternatives et solutions pour un meilleur usage*. 4p.
- Chambre des Pyrénées-Atlantiques (2017). *Fiche essais désherbage du maïs*. 4p. https://pa.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/106_Inst-Pyrenees-Atlantiques/Documents/Agro-ecologie/PAT_Gave_de_Pau/PAT_Fiche-Essais_Mais.pdf
- Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire (2019). *Maïs ensilage : intérêt des plantes compagne ?* SOLAG, Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire. N°8 du 25/11/2019. https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Pays_de_la_Loire/022_Inst-Pays-de-la-loire/Listes-affichage-FE/RetD/Vegetal/Bulletins-SOLAG/Cultures/20191127_SOLAG_Mais_ensilage.pdf

- Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire (2020). *S-métolachlore, alternatives et solutions pour un meilleur usage*. Version février 2020. 4p. [https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays de la Loire/2022/2022 S Metolachlore Alternatives solutions pour meilleur usage.PDF](https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays_de_la_Loire/2022/2022_S_Metolachlore_Alternatives_solutions_pour_meilleur_usage.PDF)
- Chambre d'Agriculture du Gers (2016). *Soja, pour une levée rapide et un désherbage réussi*. Volonté Paysanne du Gers N°1276 – 8 avril 2016. [https://gers.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/067_Inst-Gers/documents/volontepaysannegers/articlesvp2009-2017/Cultures/Grandes cultures/Annee 2016/Soja pour une leve%CC%81e rapide et un de%CC%81sherbage re%CC%81ussi VP 1276.pdf](https://gers.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/067_Inst-Gers/documents/volontepaysannegers/articlesvp2009-2017/Cultures/Grandes_cultures/Annee_2016/Soja_pour_une_leve%CC%81e_rapide_et_un_de%CC%81sherbage_re%CC%81ussi_VP_1276.pdf)
- Chauvel, B., Guillemin, J. P., Gasquez, J., & Gauvrit, C. (2012). History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: Changes and evolution of herbicide molecules. *Crop Protection*, 42, 320-326.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- Cox, D. R. (1958). The regression analysis of binary sequences. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 20(2), 215-232.
- Data.gouv.fr (2022). Données ouvertes du catalogue E-Phy des produits phytopharmaceutiques, matières fertilisantes et supports de culture, adjuvants, produits mixtes et mélanges. Extraction le 11/02/2022. Mis à jour le 27/01/2022. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-ouvertes-du-catalogue-E-Phy-des-produits-phytopharmaceutiques-matieres-fertilisantes-et-supports-de-culture-adjuvants-produits-mixtes-et-melanges/>
- Davison, A. C., & Hinkley, D. V. (1997). *Bootstrap methods and their application* (No. 1). Cambridge university press.
- Délye C., Meyer L., Causse R., Pernin F., Michel S., Chauvel B. (2015). *Résistances aux herbicides, les estivales en force !* PHYTOMA N° 689 décembre 2015. [https://www.r4p-inra.fr/wp-content/uploads/2017/12/D%C3%A9lye et al 2015a-PHYTOMA.pdf](https://www.r4p-inra.fr/wp-content/uploads/2017/12/D%C3%A9lye_et_al_2015a-PHYTOMA.pdf)
- Délye C., Colbach N., Le Corre V. (2021). *Résistances aux herbicides : mécanismes, situation en France et bonnes pratiques*. Innovations Agronomiques, INRAE, 2020, 81, pp.33-49. ff10.15454/8j8h-6610ff. fahal-03152155f
- DGAL/SDQSPV/2021-278 (2021). *Catalogue national des usages phytopharmaceutiques*. 12/04/2021. 582p.
- DGS (2021). *Bilan de la qualité de l'eau au robinet du consommateur vis-à-vis des pesticides en France en 2020*. Ministère des Solidarités et de la Santé. 12p. https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/2020_bilan_pesticides_vf.pdf
- Direction générale de l'alimentation (2017). *Méthodologie de calcul du NODU (Nombre de doses unités)*. <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-nodu>
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., & Martin, E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology*, 18, 65-71.

- Duroueix F. (2020). *Stratégies herbicides en tournesol*. Modifié le 23 avril 2020. Consulté le 16 août 2022. <https://www.terresinovia.fr/-/strategies-herbicides-en-tournesol#:~:text=Le%20d%C3%A9sherbage%20de%20pr%C3%A9lev%C3%A9%20exige,e t%20de%20mieux%20se%20diffuser.>
- Duroueix, Micheneau (2022). *Soja : bien préparer sa campagne 2022. Maîtriser l'enherbement en soja*. Rencontres techniques de Terres Inovia – 22/03/2022. https://www.terresinovia.fr/documents/20126/4103854/3_Maitriser+l%27enherbement+en+soja.pdf/30c696ee-56ee-b4ac-618f-65f91e1b8bc7?t=1647963726116
- Duval R. (2019). *Stratégies herbicides et désherbage mécanique*. Publié le 26 avril 2019. Consulté le 16 août 2022. <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/strategies-herbicides-et-desherbage-mecanique-1/>
- Ephy (2021). S-métolachlore. 21/12/2021. <https://ephy.anses.fr/substance/s-metolachlor>
- Essama-Nssah, B. (2006). Propensity score matching and policy impact analysis: A demonstration in EViews.
- Estorgues V., Perennec S., Buffard J. (2012). *Gestion des mauvaises herbes : le faux-semis. Aujourd'hui & Demain*, n°111, Article de presse. https://geco.ecophytopic.fr/documents/20182/21720/pdf_R_aliser_des_faux_semis_pendant_l_interculture_2.pdf
- FNAMS (2013). *Bulletin semences. Hors-série. Le désherbage mécanique en production de semences*. Juillet 2013. 60p. <https://www.fnams.fr/wp-content/uploads/2017/07/2013-07-desh-meca.pdf>
- FNAMS (2020). *Le désherbage du haricot porte-graine. Semences potagères. NTP 134 – Mai 2020*. 4p.
- Fong, C., Ratkovic, M. and Imai, K. (2022). CBPS: Covariate Balancing Propensity Score. R package version 0.23. <https://CRAN.R-project.org/package=CBPS>
- Fontaine, L., Bonin, L., Lieven, J., Garnier, J. F., Zaganiacz, V., Rodriguez, A., & Lemarié, P. (2013). Optimiser et promouvoir le désherbage mécanique en grandes cultures. *Innovations Agronomiques*, 28, 113-125. <https://hal.inrae.fr/hal-02644004/document>
- Freedman, D. A. (2009). *Statistical models: theory and practice*. cambridge university press.
- Fuerst, E.P., Irzyk, G.P., Miller, K.D. (1993). Partial Characterization of Glutathione S-Transferase Isozymes Induced by the Herbicide Safener Benoxacor in Maize. *Plant Physiol.* 1993 Jul;102(3):795-802. doi: 10.1104/pp.102.3.795.
- Hamby, D. M. (1995). A comparison of sensitivity analysis techniques. *Health physics*, 68(2), 195-204.
- Heine, L. G., & Franjevic, S. A. (2013). Chemical hazard assessment and the GreenScreen™ for safer chemicals. *Chemical Alternatives Assessments*, 36, 129. DOI:[10.1039/9781849737234-00129](https://doi.org/10.1039/9781849737234-00129)
- Hilal, M., Barczack, A., Tourneux, F.P., Schaeffer, Y., Houdart, M., Cremer-Schulte, D., (2022). Typologie des espaces ruraux et des espaces à enjeux spécifiques (littoral, montagne et DOM). <https://doi.org/10.15454/KEF0YW>, Recherche Data Gouv, V1

- Hirano, K., Imbens, G. W., & Ridder, G. (2003). Efficient estimation of average treatment effects using the estimated propensity score. *Econometrica*, 71(4), 1161-1189.
- Ho, T. K. (1995, August). Random decision forests. In *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition* (Vol. 1, pp. 278-282). IEEE.
- Imai, K., & Ratkovic, M. (2014). Covariate balancing propensity score. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 76(1), 243-263.
- ITB (2020). *Le cahier technique*. N°1107 – 03/03/2020. <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/le-cahier-technique-n1107/>
- ITB (2022a). *Le cahier technique*. N°1140 – 18/01/2022. https://www.itbfr.org/fileadmin/user_upload/PDF/Cahier-central-du-Betteravier-Francais/BF1140-ITB.pdf
- ITB (2022b). *Le cahier technique*. N°1145 – 29/03/2022. https://www.itbfr.org/fileadmin/user_upload/PDF/Cahier-central-du-Betteravier-Francais/BF1145-ITB.pdf
- ITB (2022c). *Pense-Betterave 2022*. Rédigé en février 2022. https://www.itbfr.org/fileadmin/user_upload/PDF/Pense-betterave/Pense_betterave_2022_web.pdf
- ITB, INRAE, ANSES (2022). *Note Commune : Gestion des résistances des bio-agresseurs aux produits phytopharmaceutiques en culture de betterave sucrière*.
- Journal Officiel du Grand-Duché de Luxembourg (2013). *Recueil de législation*. A – N° 141. 30 juillet 2013. p.2807-2018.
- JOUE - Journal officiel de l'Union européenne (2008). *RÈGLEMENT (CE) No 1272/2008 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) no 1907/2006*. 31.12.2008. L 353/1.
- JOUE - Journal officiel de l'Union européenne (2009). *RÈGLEMENT (CE) No 1107/2009 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil*. 24.11.2009. L 309/1.
- JOUE - Journal officiel de l'Union européenne (2011). *RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) No 540/2011 DE LA COMMISSION du 25 mai 2011 portant application du règlement (CE) no 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil, en ce qui concerne la liste des substances actives approuvées*. 11.6.2011. L 153/1.
- Kang, J., Chan, W., Kim, M. O., & Steiner, P. M. (2016). Practice of causal inference with the propensity of being zero or one: assessing the effect of arbitrary cutoffs of propensity scores. *Communications for statistical applications and methods*, 23(1), 1–20. <https://doi.org/10.5351/CSAM.2016.23.1.001>
- Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural, Service d'économie rural (2014-2020). FÖRDERPROGRAMM für umweltgerechte und den natürlichen Lebensraum schützende landwirtschaftliche

- Produktionsverfahren. INFORMATIONSBROSCHÜRE, PDR 2014-2020, Agrar-Umwelt-Klimamaßnahmen in Luxemburg. 36p. <https://agriculture.public.lu/dam-assets/publications/ma/pdr2014-2020/forderprogramm/15553-10-brochure-e-lr.pdf>
- Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural (2021). *L'agriculture Luxembourgeoise en chiffres 2020*. <https://agriculture.public.lu/dam-assets/publications/ser/statistiques/Agriculture-luxembourgeoise-en-chiffres-2020.pdf>
- Lee, B. K., Lessler, J., & Stuart, E. A. (2011). Weight trimming and propensity score weighting. *PLoS one*, 6(3), e18174. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018174>
- Lewis, K. A., Tzilivakis, J., Warner, D. J., & Green, A. (2016). An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(4), 1050-1064.
- Liu, Y., Pan, X., & Li, J. (2015). A 1961–2010 record of fertilizer use, pesticide application and cereal yields: a review. *Agronomy for sustainable development*, 35(1), 83-93.
- Mamarot, J., & Rodriguez, A. (2003). Sensibilité des mauvaises herbes aux herbicides en grandes cultures. Version 5. ACTA
- MASA - Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2015). *Procédure de mise sur le marché de produits phytopharmaceutiques : de l'évaluation à l'autorisation*. <https://agriculture.gouv.fr/procedure-de-mise-sur-le-marche-de-produits-phytopharmaceutiques-de-levaluation-lautorisation>. Consulté le 25 juillet 2022.
- MASA - Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2021). Publication des données provisoires des ventes de produits phytopharmaceutiques en 2020. <https://agriculture.gouv.fr/publication-des-donnees-provisoires-des-ventes-de-produits-phytopharmaceutiques-en-2020>. Publication le 30/07/2021, Consulté le 05/03/2022.
- Noah Greifer (2022). cobalt: Covariate Balance Tables and Plots. R package version 4.3.2. <https://CRAN.R-project.org/package=cobalt>
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L., "European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements"; (2012) *Land Use Policy*, 29 (2), pp. 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
- Pierre S.-P., Pérus M., Villeneuve F. (2012). *Le point sur les techniques alternatives : Faux semis et gestion des adventices*. CTIFL, Brochure technique. https://geco.ecophytopic.fr/documents/20182/21720/upload_00009355_pdf.pdf
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- R4P. (2020, July 25). Resistance cases to PPPs in France / Cas de résistance aux PPP en France. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/BYV62>
- Real, R., Márcia Barbosa, A., Porrás, D., Kin, M. S., Márquez, A. L., Guerrero, J. C., ... & Mario Vargas, J. (2003). Relative importance of environment, human activity and spatial situation in determining the distribution of terrestrial mammal diversity in Argentina. *Journal of Biogeography*, 30(6), 939-947.

- Rosenbaum, P. R., & Rubin, D. B. (1983). The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, 70(1), 41-55.
- Smith, G. D., & Ebrahim, S. (2002). Data dredging, bias, or confounding: They can all get you into the BMJ and the Friday papers. *Bmj*, 325(7378), 1437-1438.
- Stone, A. (2016). Quick Chemical Assessment Tool-Version 2.0. Department of Ecology, State of Washington. Publication, (14-04), 033. <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1404033.pdf>
- Strom, S. A., Hager, A. G., Seiter, N. J., Davis, A. S., & Riechers, D. E. (2020). Metabolic resistance to S - metolachlor in two waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) populations from Illinois, USA. *Pest Management Science*, 76(9), 3139-3148
- Stuart, E. A. (2010). Matching methods for causal inference: A review and a look forward. *Statistical science: a review journal of the Institute of Mathematical Statistics*, 25(1), 1.
- Stürmer, T., Wyss, R., Glynn, R. J., & Brookhart, M. A. (2014). Propensity scores for confounder adjustment when assessing the effects of medical interventions using nonexperimental study designs. *Journal of internal medicine*, 275(6), 570-580.
- Terres Inovia (2016). *Guide de culture. Tournesol bio 2016*. 24p. <http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques-culture/guide-tournesol-bio-terres-inovia-2016.pdf>
- Tóth, G., Jones, A., Montanarella, L. (eds.) 2013. [LUCAS Topsoil Survey. Methodology, data and results](#). JRC Technical Reports. Luxembourg. Publications Office of the European Union, EUR26102 – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online); ISBN 978-92-79-32542-7; doi: 10.2788/97922"
- Vacher, C., Vuillemin, F., Buridant, C., Denieul, C., Délye, C., Duroueix, F., Perriot, B., Rodriguez, A., Royer, C., Bonin, L. (2019). *Note commune inter-instituts 2019 pour la gestion des résistances des adventices aux herbicides en grandes cultures*. 23p. <https://www.r4p-inra.fr/fr/la-note-commune-herbicides-est-en-ligne/>
- Vuillemin F. (2019a). *Désherbage mécanique du soja*. Publié le 11 avril 2019. Consulté le 16 août 2022. <https://www.terresinovia.fr/-/desherbage-mecanique-du-soja>
- Vuillemin F. (2019b). *Binage du tournesol*. Modifié le 9 avril 2019. Consulté le 16 août 2022. <https://www.terresinovia.fr/-/lutte-mecanique-du-tournesol-avec-le-binage>
- Vuillemin F., Duroueix F. (2021). *Désherbage mixte : concilier herbicides et bineuse*. Modifié le 15 février 2021. Consulté le 16 août 2022. <https://www.terresinovia.fr/-/tournesol-itineraires-techniques-mixtes-combinant-bineuse-et-herbicides>
- Wickham *et al.*, (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Yousaf, M., Li, J., Lu, J., Ren, T., Cong, R., Fahad, S., & Li, X. (2017). Effects of fertilization on crop production and nutrient-supplying capacity under rice-oilseed rape rotation system. *Scientific reports*, 7(1), 1270. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01412-0>
- Zhang, Z., Kim, H. J., Lonjon, G., & Zhu, Y. (2019). Balance diagnostics after propensity score matching. *Annals of translational medicine*, 7(1).

Annexes

Annexe 1 : Saisine


GOVERNEMENT
*Liberté
Égalité
Fraternité*

Le directeur général de l'alimentation
Le directeur général de la prévention des risques
Le directeur général de la santé

Paris, le **21 AVR. 2021**

à

Réf: Monsieur le président directeur général d'INRAE
Monsieur le directeur général de l'ANSES

Objet : Travaux sur l'identification des alternatives à certains produits phytopharmaceutiques en vue de la mise en œuvre de l'évaluation comparative prévue par le règlement UE n°1107/2009.

Le 22 juin 2018, conformément à l'engagement du Président de la République, le Gouvernement a présenté un plan d'actions pour la sortie du glyphosate, ayant pour objet de mettre fin aux principaux usages d'ici la fin de l'année 2020 au plus tard et d'ici cinq ans pour l'ensemble des usages, tout en veillant à ce que les agriculteurs ne soient pas laissés sans solution.

Le Gouvernement a notamment demandé à l'Anses de procéder à la substitution, lorsqu'elle est possible, des utilisations de produits à base de glyphosate conformément à l'article 50(2) du règlement (CE) n°1107/2009. Ainsi, il a confié à l'ANSES, en lien avec INRAE, le soin d'identifier les usages pour lesquels des alternatives techniques existent et ne présentent pas d'inconvénients économiques ou pratiques majeurs. L'évaluation comparative a été effectuée pour les principales cultures consommables de glyphosate et permet :

- de s'assurer que le glyphosate pourra bien être remplacé par des pratiques économes en produits phytopharmaceutiques ;
- d'objectiver l'impact économique d'un retrait du glyphosate, production par production, en lien avec les instituts techniques agricoles.

La révision des autorisations de mise sur le marché des produits à base de glyphosate devrait ainsi permettre de diminuer significativement les quantités vendues.

Dans le prolongement de ce premier travail et conformément à la réglementation européenne, cette démarche peut désormais être appliquée à d'autres produits phytopharmaceutiques, en particulier les herbicides. En effet, le règlement (CE) n°1107/2009 prévoit la possibilité de procéder à une évaluation comparative des usages des produits restant autorisés, qui peut conduire à la substitution si le produit ou la méthode de remplacement présente des risques sensiblement moins élevés pour la santé humaine ou animale ou l'environnement, et si elle ne présente pas d'inconvénients économiques ou pratiques majeurs.

Pour préparer ce travail, ainsi que permettre la mobilisation des leviers d'action les plus adaptés par les pouvoirs publics et par les professionnels pour réduire les utilisations substituables de produits phytopharmaceutiques, nous souhaitons qu'INRAE mette en place un cadre méthodologique et évalue, par filière ou par système de production, les possibilités de substitution par des méthodes non-chimiques de l'usage des herbicides, et à terme d'autres pesticides, en prenant en compte l'impact technico-économique d'une telle substitution. INRAE pourra s'appuyer sur la méthodologie élaborée dans le cadre des travaux menés sur le glyphosate.

Les analyses seront conduites par une équipe dédiée ayant des compétences en agronomie et en micro-économie, et utilisant l'ensemble des données scientifiques et techniques disponibles, notamment les données issues des initiatives menées sur le terrain. L'Institut déterminera dans un premier temps les filières ou les productions nécessitant les quantités les plus importantes d'herbicides et/ou recourant le plus fréquemment aux substances préoccupantes pour la santé humaine et l'environnement, notamment les substances candidates à substitution et les substances mises en avant par l'avis de l'Anses du 10 avril 2020.

Un comité de suivi comprenant la DGPR, la DGAI, la DGS et l'Anses sera mis en place par INRAE. Il sera réuni régulièrement pour suivre l'avancement des travaux et sera consulté sur le cadre méthodologique et sur les filières ou productions devant faire l'objet des premières analyses. Ces premières analyses, comprenant une liste de **substances d'intérêt** dont l'étude est envisagée par INRAE, devront être rendues dans un délai de 4 mois à partir de la présente saisine.

INRAE sera chargé d'établir, à l'issue d'un délai de 8 mois à partir de la présente saisine, des propositions aux ministères et à l'Agence concernant les suites à donner à ces travaux comprenant une **liste de substances et d'usages prioritaires** dont le remplacement est compatible avec des pratiques alternatives non chimiques ou économes en produits phytopharmaceutiques et acceptables économiquement. Dans ce cadre, INRAE se positionnera notamment sur les 3 substances suivantes : le prosulfocarbe, le s-métolachlore et le chortoluron.

Dans le même temps, nous demandons à l'Anses d'identifier, dans un délai de 4 mois à partir de la présente saisine, les obstacles à la mise en œuvre de la procédure d'évaluation comparative afin :

- de proposer des pistes d'amélioration à promouvoir au sein des groupes de travail européen sur le sujet auxquels participe l'Agence et par les autorités françaises, notamment en matière de prise en compte des alternatives non chimiques et de réalisation de la procédure d'évaluation comparative visée aux articles 50.1 et 50.2 du règlement (CE) n°1107/2009 ;
- de rendre effective la substitution des substances préoccupantes, lorsqu'elle est techniquement pertinente, sur la base des analyses d'INRAE.

Lors de l'évaluation ou de la réévaluation des demandes d'autorisation de mise sur le marché correspondantes, l'Anses réalisera l'évaluation comparative en vue d'une substitution, lorsqu'elle est techniquement pertinente, pour les usages et substances prioritaires identifiés par INRAE.

Vous nous rendrez compte de l'avancement de ces travaux et de toute difficulté éventuelle que vous pourriez rencontrer.

Annexe 2 : Bases de données mobilisées

Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques par les Distributeurs agréés (BNVD)

Nous renvoyons le lecteur au site BNVD Traçabilité⁹⁸ pour une présentation détaillée de la BNVD.

Depuis la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) promulguée le 30 décembre 2006, les distributeurs de produits phytosanitaires sont tenus de déclarer les ventes effectuées sur le territoire national. Les données fournies par les distributeurs alimentent la BNVD. L'objectif est d'améliorer la traçabilité des ventes de produits phytosanitaires et d'établir le montant de la redevance pour pollution diffuse (RPD) pour chaque entreprise. Pour une substance active donnée, la RPD dépend de son niveau de toxicité et de dangerosité⁹⁹. Le montant attribué à une entreprise dépend donc des quantités vendues de produits et de leur composition.

La BNVD donne accès à la fois aux quantités de produits phytosanitaires et aux quantités de substances actives. Les données publiques de la BNVD renseignent à la fois sur les ventes et sur les achats de produits phytosanitaires. Pour ce travail, nous avons utilisé les données relatives aux achats. Elles sont établies de 2013 à 2020 et couvrent la France entière. Elles correspondent aux achats réalisés auprès de distributeurs établis en France et aux achats effectués auprès de distributeurs établis à l'étranger et non redevables. Les quantités sont rattachées au code postal de l'acheteur.

Les distributeurs doivent déclarer leurs ventes de l'année N avant le 31 mars de l'année N+1 auprès des agences et offices de l'eau. Les données sont tout de même susceptibles de faire l'objet de corrections jusqu'au 31 décembre de l'année N+2, ce qui peut expliquer une certaine volatilité des données encore deux années après l'année concernée.

Il apparaît sans doute utile de rappeler qu'acheter ne signifie pas nécessairement i) employer sur le lieu d'achat, ii) tout employer notamment quand les bidons 'unité' excèdent les besoins des surfaces à traiter, ni enfin iii) tout utiliser l'année de l'achat. Les agriculteurs essayent de ne pas stocker inutilement mais leur local de stockage de produits phytosanitaires est rarement vide.

E-Phy

E-Phy est le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture autorisés en France. Il est possible d'y explorer les données de deux manières :

⁹⁸ <https://ventes-produits-phytopharmaceutiques.eaufrance.fr/about>

⁹⁹ <https://www.eau-seine-normandie.fr/les-aides-et-redevances/les-redevances/pollutions-diffuses#:~:text=La%20redevance%20pour%20pollution%20diffuse,plus%20respectueux%20de%20l%27environnement.>

- Sur le catalogue en ligne disponible sur le site de l'Anses¹⁰⁰ ;
- En téléchargeant les données sous format CSV ou XML sur le site data.gouv¹⁰¹ (ces fichiers sont mis à jour à partir des données du site E-phy cité ci-dessus).

Les fichiers E-Phy contiennent un ensemble de données relatives aux produits phytopharmaceutiques, aux matières fertilisantes et supports de culture, aux adjuvants, aux produits mixtes et mélanges couverts par une autorisation de mise sur le marché (AMM) ou un permis de commerce parallèle (PCP) ou ayant été retirés du marché. C'est l'Anses qui délivre depuis 2015 les AMM et PCP. Environ 15 000 produits, qu'ils soient autorisés ou retirés, sont décrits dans ces fichiers selon un certain nombre d'indicateurs : numéro d'AMM ou de PCP, nom commercial, type de produits, substances, phrases de risque liées à la (ou les) substance(s) qui compose(nt) le produit, teneur en substance active, usage(s) autorisé(s), etc. E-Phy n'intègre pas les dérogations de 120 jours¹⁰² ; elles sont publiées sur le site du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire durant leur période de validité¹⁰³.

Par ailleurs, l'Anses rappelle que ces données, si elles peuvent être ré-utilisées, doivent faire l'objet d'une mention explicite.

Dans les faits, une nouvelle mise à jour de la base vient écraser la version antérieure. Pour pouvoir remonter à ce que contenait E-Phy à un moment donné, l'ANSES gère un fichier qui retrace l'historique des autorisations. C'est à ce fichier que nous nous sommes fréquemment référés.

RPG

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une base de données géographique donnant l'occupation des sols agricoles en France. Le RPG ne concerne que les surfaces sujettes aux aides PAC ; il sert de référence à l'instruction de ces aides. Une version anonymisée est disponible sur le site data.gouv¹⁰⁴.

Nous avons aussi travaillé sur une version du RPG 2020 fournie par l'Observatoire du Développement Rural (ODR) d'INRAE. Elle associée à chaque code postal les surfaces (en hectare) de chaque culture présente sur ce code postal. La version de l'ODR recense jusqu'à 310 types de cultures différentes.

Nous avons enfin utilisé une version du RPG recensant les parcelles en AB déclarée à la PAC, mise en ligne par l'Agence Bio¹⁰⁵.

¹⁰⁰ <https://ephy.anses.fr/>

¹⁰¹ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-ouvertes-du-catalogue-e-phy-des-produits-phytopharmaceutiques-matieres-fertilisantes-et-supports-de-culture-adjuvants-produits-mixtes-et-melanges/>

¹⁰² Ces autorisations sont données pour une durée maximale de 120 jours dans des situations d'urgence sanitaire.

¹⁰³ <https://agriculture.gouv.fr/produits-phytopharmaceutiques-autorisations-de-mise-sur-le-marche-dune-duree-maximale-de-120-jours>

¹⁰⁴ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

¹⁰⁵ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/616d6531c2951bbe8bd97771/>

Enquêtes Pratiques culturelles

Ces enquêtes sont gérées par le Service de la statistique et de la prospective du Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation (SSP-MAA)^{106,107}. Elles sont disponibles pour les filières grandes cultures et prairies, viticulture, maraîchage, arboriculture. Selon les principes d’un observatoire, ce sont des outils de description des pratiques des exploitants agricoles. Chaque enquête permet de reconstituer l’itinéraire technique conduit sur une parcelle culturelle¹⁰⁸ de l’exploitation enquêtée : travail du sol, fertilisation, emploi de produits phytosanitaires, rendements, mode d’implantation et de destruction des cultures, désherbage mécanique, etc. (Agreste, 2021). Une parcelle culturelle correspond à « tout ensemble de terres jointives cultivées en une espèce végétale donnée, ayant un seul précédent cultural et conduite selon des pratiques homogènes (fertilisation, traitements phytosanitaires...). Elle ne correspond donc pas systématiquement au parcellaire du plan cadastral de l’exploitation. » (Agreste, 2020).

Pour chaque filière, ces enquêtes pratiques culturelles sont réalisées régulièrement, à quelques années d’intervalle, et en alternance avec des enquêtes plus ciblées sur les pratiques phytosanitaires. Elles sont réalisées en face-à-face, à l’échelle du territoire national (métropole et départements d’Outre-mer pour certaines cultures).

Les régions et départements enquêtés sont sélectionnés selon une méthode prédéfinie ; puis un échantillonnage est réalisé culture par culture suivant deux degrés successifs : i) le tirage des exploitations puis ii) le tirage d’une seule parcelle dans chacune de ces exploitations. Les données obtenues suite à ces enquêtes sont ensuite extrapolées culture par culture sur le champ géographique enquêté de chacune d’entre elles *i.e.* les seules régions enquêtées pour ces cultures, puis à l’échelle nationale (Agreste, 2020). Nous renvoyons le lecteur au document Agreste (2020) présentant la méthodologie empruntée pour réaliser ces enquêtes.

Réseau DEPHY

Le réseau DEPHY est une émanation du plan Ecophyto. Son objectif est « d’éprouver, de valoriser et de déployer des techniques et systèmes agricoles économes en produits phytosanitaires et économiquement, environnementalement et socialement performants, à partir d’un réseau national couvrant l’ensemble des filières végétales françaises »¹⁰⁹.

Il est constitué de deux entités : le réseau DEPHY FERME et le réseau DEPHY EXPE. Le réseau DEPHY FERME a été initié en 2010 avec 178 exploitants agricoles volontaires s’engageant à

¹⁰⁶ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2009/detail/>

¹⁰⁷ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/S-PK%20GC%202021/methodon/>

¹⁰⁸ Parcelle culturelle : « tout ensemble de terres jointives cultivées en une espèce végétale donnée, ayant un seul précédent cultural et conduite selon des pratiques homogènes (fertilisation, traitements phytosanitaires...). Elle ne correspond donc pas systématiquement au parcellaire du plan cadastral de l’exploitation. » (Agreste, 2020)

¹⁰⁹ <https://ecophytopic.fr/dephy/carte-interactive-dephy>

réduire leur usage de produits phytosanitaires. En 2018, ce réseau regroupait plus de 3000 fermes¹¹⁰. Le réseau DEPHY EXPE a été initié en 2011 afin d'étudier, sur un mode expérimental en vraie grandeur et avec les outils 'agriculteur', la faisabilité de systèmes de culture visant une forte réduction d'usage des produits phytosanitaires. 41 projets d'expérimentation ont été initialement lancés, puis 41 autres en 2018.

Les pratiques des fermes du réseau sont enregistrées dans la base de données Agrosyst gérée par INRAE. Les fermes entrant dans le réseau décrivent leurs itinéraires techniques des trois années précédentes. Il s'agit du « point zéro ». Ainsi, ce « point zéro » correspond aux pratiques des agriculteurs avant de potentielles modifications au cours de leur participation au réseau DEPHY.

Plusieurs échelles sont disponibles dans la base de données Agrosyst. Quand une ferme est enquêtée dans le cadre du réseau DEPHY, toutes ses parcelles ne sont pas soumises à l'enquête. Seule une partie de la ferme est enquêtée : on parle de « système de culture ». Dans DEPHY, « un système de culture est défini, pour une portion d'espace traitée de manière homogène (par ex. : un groupe de parcelles), par les cultures qui y sont pratiquées, leur ordre de succession et les itinéraires techniques (i.e. les interventions culturales) mis en œuvre pour chacune d'elles » (Agrosyst, 2019). Une échelle plus fine est également disponible : celle de la parcelle.

Pour réaliser ces travaux, nous nous sommes appuyés sur l'ensemble des données disponibles depuis la création du réseau DEPHY *i.e.* de 2009 à 2021. Les indicateurs mobilisés dans DEPHY sont variés : ils sont à la fois techniques et économiques. A titre d'exemples, sont disponibles (directement ou déductibles avec les données brutes) : rendement, IFT (total, herbicides, fongicides, etc.) les quantités des substances actives mobilisées, le type de travail du sol, sa fréquence, le produit brut, différents types de marges, etc.

SAFRAN

Les données climatiques issues du modèle SAFRAN proviennent de Météo-France, et ont été téléchargées via la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE. Le modèle SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie ; Durand *et al.*, 1993) a initialement été développé pour la prévision des avalanches et les suivis hydrologiques, et fait l'objet d'un partenariat entre INRAE et Météo-France.

Nous avons eu accès aux valeurs quotidiennes d'un ensemble de 12 variables, entre 2006 et 2021, sur un maillage régulier de la France métropolitaine de 8 km. L'accès a été effectué dans le cadre du partenariat entre INRAE et Météo-France, et a fait l'objet d'une demande spécifique, validée par Météo-France. Les variables utilisées dans ce travail sont décrites dans le [Tableau 35](#).

¹¹⁰ https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2021-07/Reseau_FERME_2018_VF_num_1.pdf

Les données issues du modèle SAFRAN ont été agrégées de différentes manières. Une première agrégation temporelle a été réalisée : pour chaque maillage, nous avons calculé la moyenne annuelle de chacune des variables. Une seconde agrégation, spatiale, a été réalisée afin d’obtenir la moyenne de chaque variable pour chaque petite région agricole (PRA). Nous avons ainsi travaillé à partir des moyennes annuelles à l’échelle de la PRA.

Tableau 35 : Liste et description des variables climatiques issues de SAFRAN

Nom	Unité	Description
wg_racine_q	m ³ /m ³	Contenu en eau liquide dans la couche racinaire à 06 UTC.
evap_q	mm	Evapotranspiration réelle (cumul quotidien 06-06 UTC).
hu_q	%	Humidité relative (moyenne quotidienne).
swi_q	%	Indice d’humidité des sols (moyenne quotidienne 06-06 UTC).
preliq_q	mm	Précipitations liquides (cumul quotidien 06-06 UTC).
ssi_q	J/cm ²	Rayonnement visible (cumul quotidien).
runc_q	mm	Ruissellement (cumul quotidien 06-06 UTC).
t_q	°C	Température moyenne des 24 températures horaires (01-00 UTC).
ff_q	m/s	Vent (moyenne quotidienne) à 10m.
tsup_h_q	°C	Température maximale des 24 températures horaires (19-18 UTC).
tinf_h_q	°C	Température minimale des 24 températures horaires (07-06 UTC).

ESDAC

L’European Soil Data Centre (ESDAC ; Panagos *et al.*, 2012) est un point de centralisation de divers jeux de données concernant les sols des pays européens, visant à servir d’unique référence (hébergeant des données de sources différentes) sur le sujet. L’ESDAC est une composante du Centre Commun de Recherche (CCR¹¹¹), laboratoire de recherche scientifique de l’Union Européenne. L’accès aux données a fait l’objet d’une demande préalable, validée par l’ESDAC.

Nous avons utilisé deux jeux de données présents sur le site internet de l’ESDAC, l’un décrivant les propriétés physiques du sol¹¹² (Ballabio *et al.*, 2016), et l’autre les propriétés chimiques¹¹³ (Ballabio *et al.*, 2019). L’ensemble des variables utilisées sont décrites dans le **Tableau 36**. Ces données couvrent l’ensemble du territoire européen, par maillage régulier de 500 m. Les données ne sont pas observées, mais issues d’un modèle de prédiction fondé sur un ensemble

¹¹¹ https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre_fr

¹¹² <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data>

¹¹³ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/chemical-properties-european-scale-based-lucas-topsoil-data>

d'observations réalisées en 2009 et rassemblées au sein de la base de données LUCAS¹¹⁴ (Land Use and Coverage Area frame Survey ; Toth *et al.*, 2013). De la même manière que les données climatiques issues de SAFRAN, ces données ont été agrégées à l'échelle de la petite région agricole (PRA).

Tableau 36 : Liste et description des variables issues de l'ESDAC

Propriétés	Nom	Description
Chimiques	pH_H2O	pH mesuré dans l'eau
	pH_CaCl	pH mesuré dans une solution CaCl2 0.01 M
	CEC	Capacité d'échange cationique
	CN	Ratio C/N
	N	Azote
	P	Phosphore
	CaCO3	Carbonate de calcium
Physiques	AWC	Capacité de rétention d'eau
	Sand	Pourcentage de sable dans la couche de sol 0-20cm
	Silt	Pourcentage de limon dans la couche de sol 0-20cm
	Clay	Pourcentage d'argile dans la couche de sol 0-20cm
	Bulk_density	Masse volumique apparente
	Coarse_frag	Pourcentage de fragments rocheux dans le sol
	textureUSDA	Classification des sols de l'USDA

Typologie des espaces ruraux et des espaces à enjeux spécifiques

Cette typologie¹¹⁵ est issue d'un travail mené par la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale (DATAR) en 2011 visant à analyser et comprendre la diversité des campagnes françaises, et de classer les territoires français en fonction de cette dernière (Hilal *et al.*, 2022). La classification est effectuée à l'échelle de la commune, et tient compte de facteurs relatifs à la population et à son niveau de vie, à l'emploi et aux activités économiques, et à la caractérisation des paysages. Plusieurs typologies ont été réalisées par cette étude, et nous avons repris la typologie générale. La liste des modalités et leur description est présentée dans le **Tableau 37** ci-dessous. Une mise à jour de cette typologie est en cours de réalisation et elle n'était pas disponible dans le cadre de ce travail.

¹¹⁴ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>

¹¹⁵ <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/KEF0YW>

Tableau 37 : Liste et description des modalités de la typologie de la ruralité

Modalité	Description
F_CVLV_DYN	Campagnes des villes, du littoral et des vallées urbanisées ; densifiées, en périphérie des villes, à très forte croissance résidentielle et économie dynamique
F_CVLV_DIF	Campagnes des villes, du littoral et des vallées urbanisées ; diffuses, en périphérie des villes, à croissance résidentielle et dynamique économique diversifiée
F_CVLV_PRES	Campagnes des villes, du littoral et des vallées urbanisées ; densifiées, du littoral et des vallées, à forte croissance résidentielle et à forte économie présente
F_C_AI	Campagnes agricoles et industrielles ; sous faible influence urbaine
F_CFD_PRESA	Campagnes vieilles à très faible densité ; faibles revenus, économie présente et agricole
F_CFD_PRESTOU	Campagnes vieilles à très faible densité ; faibles revenus, croissance résidentielle, économie présente et touristique
F_CFD_ESERV	Campagnes vieilles à très faible densité ; faibles revenus, croissance résidentielle, économie présente et touristique, très fort éloignement des services d'usage courant

Annexe 3 : Le S-métolachlore dans la presse grand public

Cette annexe commence par quelques extraits issus de la presse. Ils exposent différentes facettes de la problématique de la contamination de l'eau potable par le S-métolachlore, ses métabolites et par les pesticides et fertilisants de manière plus générale telles que présentée par la presse. Quelques coûts de traitement des eaux y sont évoqués.

La suite de l'annexe détaille une analyse que nous avons conduite sur les communes les plus souvent citées pour voir si elles présentaient des caractéristiques particulières sur les usages du S-métolachlore relativement au reste du territoire.

Extraits de la presse :

« La source de la Preille compte notamment trois molécules [...] (des métabolites de pesticides, métazachlore ESA, OXA et métolachlore ESA) avec des taux importants. [...]. Les investissements consentis pour lutter contre les pesticides dans l'eau potable donnent le tournis. Depuis 2008 et jusqu'en 2027, Eaux de Vienne aura consacré un total d'environ 22 millions d'euros d'investissements dans plusieurs unités de traitement de l'eau réparties sur l'ensemble du département. Ajoutez-y un coût de fonctionnement compris entre 4 et 500.000 € pour l'ensemble des installations ; soit 3,5 millions de plus par an. [...] La première unité de traitement de l'eau contre les nitrates et les pesticides a été inaugurée en novembre 2016 à Saint-Pierre d'Exideuil, après huit ans d'instruction et de travaux pour un coût de 15 millions d'euros. » Centre Presse, 18 juillet 2022. *Vienne : 30% de l'eau potable contient des pesticides.* <https://www.centre-presse.fr/article-859839-pesticides-l-eau-ne-coule-pas-de-source.html>

« Plus d'une dizaine de communes dépendantes du Syndicat intercommunal des eaux de Montmirey-le-Château sont privées d'eau potable. L'origine de la pollution : un désherbant, [le métolachlore]. [...] « Nous avons budgétisé une enveloppe de 4 000 € et nous distribuons environ 85 packs de bouteilles en plastique d'un litre et demi par semaine », commente le maire Martin Daune. [...] Un filtre à charbon sera installé sur la station de pompage à Thervay : montant de l'opération, près de 400 000 € en comptant les travaux de terrassement. [...] Mais ce filtre est une mesure provisoire, peut-être trois ans. L'an dernier, le syndicat a planché sur une solution durable et là encore la facture est importante puisqu'il s'agirait d'une extension du bâtiment pour une nouvelle installation de filtrage : 1,6 million d'euros. » Voix du Jura, 10 mai 2022. *Jura. Plus de 3500 habitants privés d'eau potable pour cause de pollution des sols.* https://actu.fr/societe/jura-plus-de-3-500-habitants-privés-d-eau-potable-pour-cause-de-pollution-des-sols_50715785.html

« « La commune d'Ossun distribue depuis 2014, à ses abonnés, de l'eau potable présentant des teneurs non conformes en pesticides. Le constat est clair, les eaux captées sont polluées par des nitrates et des pesticides », affirme l'association France Nature Environnement. [...]

Dans son rapport préalable, l'ARS parle d'un « constat de contamination de l'ensemble des captages d'eau situés en zone de grandes cultures ». En ajoutant que le captage d'Ossun est celui « le plus pollué par l'ESA-métolachlore ». » La Dépêche, 1^{er} août 2018. *Ossun. Pesticides dans l'eau : les assos en ébullition*. <https://www.ladepeche.fr/article/2018/08/01/2844749-pesticides-dans-l-eau-les-assos-en-ebullition.html>

« [Patrick Dubreil, membre du syndicat de la médecine générale et enseignant à l'Université de Nantes :] « Le taux d'ESA métolachlore est de 0,36 microgramme par litre, soit trois fois la limite de qualité. Même chose du côté de l'Oxa métolachlore, avec 0,07 microgramme par litre. Les courbes de tendances sont toujours en croissance. » » Ouest-France, 3 juin 2019. *Guémené-Penfao. La pollution de l'eau est au menu, ce soir*. <https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/guemene-penfao-44290/guemene-penfao-la-pollution-de-l-eau-est-au-menu-ce-soir-6379519>

« Jeudi 25 novembre, des représentants du Syndicat d'eau de l'Anjou ont participé au conseil communautaire de la CCVHA (Vallées du Haut-Anjou), au Lion-d'Angers (Maine-et-Loire). Pour présenter leur rapport d'activité mais aussi faire le point sur la qualité de d'eau du robinet, sujet débattu ces derniers mois. [...] Dans leur collimateur principalement : l'ESA métolachlore, résidu d'un désherbant utilisé surtout pour le traitement du maïs. [...] Quant à l'usine de Saint-Georges-sur-Loire, qui alimente notamment Erdre-en-Anjou et Bécon-les-Granits, elle sera totalement reconstruite à l'horizon 2025, pour un coût probablement supérieur à 8 millions d'euros. » Ouest-France, 26 novembre 2021. *Segré et le Haut-Anjou. Eau du robinet : non conforme mais potable*. <https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/le-lion-dangers-49220/segre-et-le-haut-anjou-eau-du-robinet-non-conforme-mais-potable-b959ca6a-4e94-11ec-b2b9-fc54b95c0179>

« De l'ESA-métolachlore, un résidu d'herbicide, a été détecté dans de l'eau destinée à la consommation humaine dans le nord de l'Isère. [...] La limite réglementaire de 0,1 microgramme par litre a été dépassée dans 24 communes. « Les dépassements observés ne sont pas supérieurs à 1,3 microgramme par litre », indique l'agence sanitaire [ARS Auvergne-Rhône-Alpes], citée par nos confrères. » Ouest-France, 7 décembre 2021. *Un résidu d'herbicide détecté dans l'eau potable de 24 communes de l'Isère*. <https://www.ouest-france.fr/auvergne-rhone-alpes/isere/un-residu-d-herbicide-detecte-dans-l-eau-potable-de-24-communes-de-l-isere-7546310>

« Présents à Daoulas, dans le Finistère, à la veille de Noël, l'association Eau et Rivières de Bretagne et le Réseau des agriculteurs bio de Bretagne alertent notamment sur la présence, au-dessus de la limite réglementaire, de S-métolachlore et de Prosulfocarbe dans le réseau d'eau courante. Ils demandent l'interdiction de ces deux herbicides très volatiles. » Ouest-France, 21 décembre 2021. *L'eau du robinet polluée par les pesticides pour « près de 700 000 Bretons », selon deux associations*. <https://www.ouest-france.fr/bretagne/environnement->

[pres-de-700-000-bretons-boivent-une-eau-polluee-par-les-pesticides-5f0b4e4c-6273-11ec-badb-67e947979ada](https://www.france3-regions.francetvinfo.fr/bourgogne-franche-comte/jura/pesticides-en-agriculture-dans-le-jura-12-communes-ne-peuvent-plus-consommer-l-eau-du-robinet-et-cela-va-durer-2525980.html)

« Dans le Jura, 13 communes dépendantes du syndicat intercommunal des eaux de Montmirey-le-Château jonglent depuis la mi-janvier avec les bouteilles d'eau. Celle du robinet est impropre à la consommation [...] en raison de la présence de métabolites de pesticides (NOA-métolachlore, ESA- métolachlore), indique l'Agence Régionale de Santé. » Franceinfo, 15 avril 2022. *Pesticides en agriculture : dans le Jura, 13 communes ne peuvent plus consommer l'eau du robinet et cela va durer.* <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bourgogne-franche-comte/jura/pesticides-en-agriculture-dans-le-jura-12-communes-ne-peuvent-plus-consommer-l-eau-du-robinet-et-cela-va-durer-2525980.html>

« [...] on trouve dans chaque litre d'eau jusqu'à 1,2 microgramme d'ESA-métolachlore, un désherbant pour maïs et légumes. Douze fois plus que le seuil réglementaire européen fixé à 0,1 microgramme par litre. De quoi justifier une dérogation préfectorale le 13 avril dernier, pour que l'eau contenant jusqu'à 1,68 microgramme d'ESA-métolachlore par litre puisse continuer à être distribuée. » Ouest-France, 10 juillet 2022. *ESA-métolachlore : faut-il s'inquiéter de la qualité de l'eau à Pontivy ?* <https://www.letelegramme.fr/morbihan/pontivy/esa-metolachlore-faut-il-s-inquieter-de-la-qualite-de-l-eau-a-pontivy-10-07-2022-13105420.php>

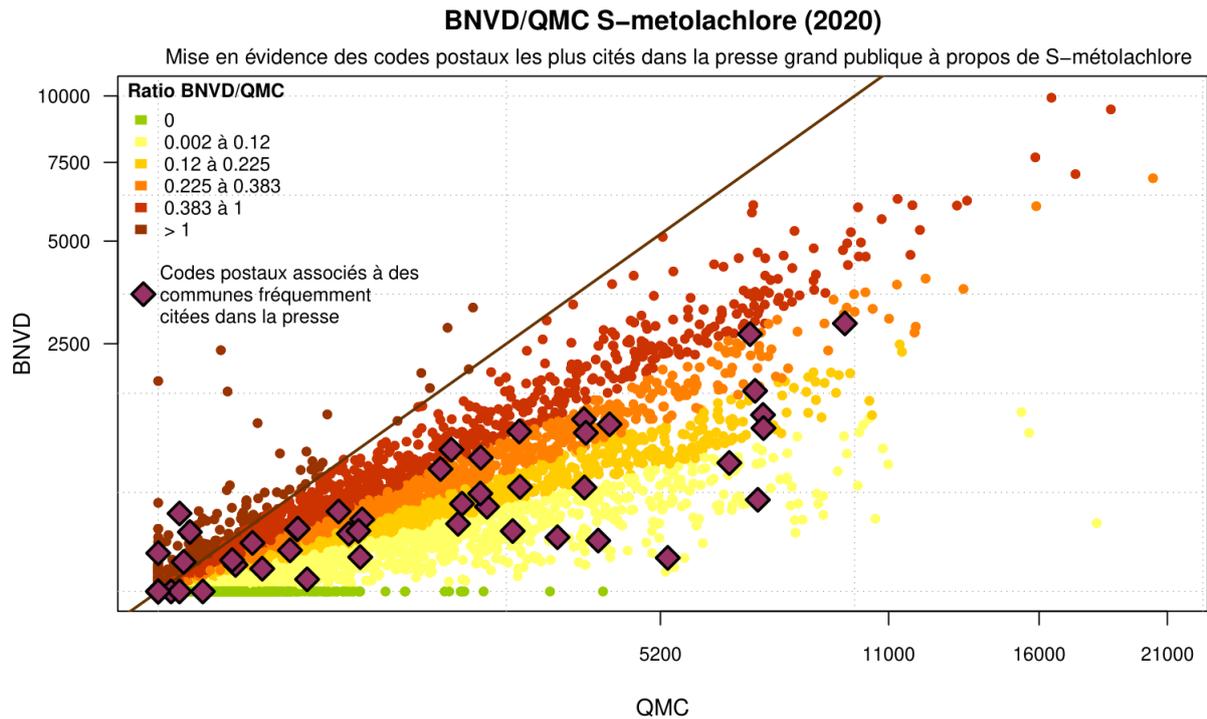
« Pour traiter les pesticides, notamment les résidus de ESA-métolachlore, Atlantic'eau va investir plus de 6 millions d'euros dans une nouvelle usine de traitement à base de charbon actif. Le coût de fonctionnement de la nouvelle usine est estimé à 100 000 € par an. Sur le volet préventif, Atlantic'eau s'est doté d'un plan d'action d'accompagnement des agriculteurs présents dans la zone d'alimentation du captage (3 000 ha), en incitant financièrement à pratiquer le désherbage mécanique. Ce plan, en cours de validation par la préfecture, ne satisfait pas les marcheurs contre les pesticides. « On investit 6 millions dans une usine, mais il faudrait surtout, dès le départ, ne pas polluer l'eau », pointe Jean-Yves, un autre membre de Malice. » Ouest-France, 20 mars 2022. *Nort-sur-Erdre. 300 marcheurs contre les pesticides dans l'eau.* <https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/loire-atlantique/nort-sur-erdre-300-marcheurs-contre-les-pesticides-dans-l-eau-4900053a-a7a5-11ec-95bd-846f9f6707ea>

Analyse sur les communes les plus citées :

Pour établir la liste des communes régulièrement citées dans les nombreux articles de presse, nous avons agrégé les fréquences d'apparition à l'échelle du code postal. Nous avons ensuite projeté ces codes postaux sur le graphique mettant en relation les quantités de S-métolachlore achetées (BNVD) et l'indice de quantités maximales consommables (QMC), et mettant en évidence le niveau de tension autour du S-métolachlore, défini à travers les quartiles du ratio BNVD/QMC (voir **Figure 9**). La **Figure 26** en expose les résultats pour les 50 codes postaux les plus fréquents. On constate que le fait d'être régulièrement cité dans la presse n'est corrélé ni

à une situation de tension forte autour du S-métolachlore, ni à de larges quantités achetées sur le territoire en question. Ceci peut témoigner d'une situation généralisée. La mise en relief de ces situations peut venir de biais de connaissance de la part des journalistes. Il peut aussi découler de particularités des réseaux venant alimenter ces communes. Nous n'avons pas poussé plus loin les investigations.

Figure 26 : Niveau de tension autour du S-métolachlore pour les codes postaux régulièrement cités dans la presse grand public



Source : Propre élaboration à partir des données du RPG, de la BNVD, E-Phy et de la presse.

Annexe 4 : Spectres d'action de quelques substances actives herbicides seules ou en combinaison

Tableau 38 : Spectre complet de quelques substances actives

Adventice	S-métolachlore (+benoxacore)	dmta-P	Pendiméthaline	dmta-P + Pendiméthaline	Mésotrione	Sulcotrione	Métolachlore + Pendiméthaline	Isoxaflutole
Digitaires : D. sanguine*, D. ischème	1,8	2	2	1,5	2	2,3	2	2,5
Panic à inflorescence dichotome	2,5	2,5		1,5	3,5	4		3
Panic capillaire	2	2	2,5	2	4	3		3
Panic faux-millet*	4	4	2	2	2	2	2,5	3
Panic pied de coq*	1,8	2	2	1,5	2	2,3	2	3
Sétaires : S. glauque*, S. verte*, S. verticillée	1,8	2	2	1,5	4	4	2	2,5
Abutilon de Théophraste	4	4		4	2	2		2
Adonis type annuel			2					
Agrostis jouet du vent			2,8					
Alchémille des champs			3,5		1	2		
Amarante couchée de semis					2			
Amarante couchée installée					3,5			4
Amarantes : A. réfléchie*, A. hybride*, A. de Bouchon*, A. blite*, A. blanche	3,8	2,5	2	2	1	2,5	2,5	2
Ambroisie à feuilles d'armoise	4	3	4		3	2	4	
Ammi élevé	3,6	3	4		3	4		4
Arabette de Thalius			2		1	1,5		
Armoise vulgaire de semis					2			4
Armoise vulgaire installée	4		4		3,5			4
Arroche étalée	3,1	4	2,5	2	2	2,5	3	4
Bident tripartite		3			2			4
Brome stérile	2							
Capselle bourse à pasteur	2	2	2,2		2	1	2,5	2
Cardamine hérissée			4		1			
Carotte sauvage			4		2	4	4	
Céraiste aggloméré			2,1			2		
Chardon des champs de semis					2			4
Chardon des champs installé	4		4		3,5	3,5		4
Chénopode hybride								3,5
Chénopode polysperme		2		2				2
Chénopodes : Ch. blanc*, Ch. hybride, Ch. polysperme	3,5	3	2,1	1,5	1,5	1	2	1,5

Coquelicots : Pavot coquelicot, Pavot argémone, Pavot douteux			1,6	2	4	3,3		4
Datura stramoine	4	4		2	2	1	3,8	2
Diplotaxis fausse-roquette	4	3	4			1,5		
Drave printanière					1			
Epières : E. annuelles, E. des champs						2		
Epilobe à quatre angles installé			4					4
Erodium à feuilles de ciguë					4			2
Ethuse ciguë			4			4		1,5
Euphorbe réveil-matin	3,5	2	4		2		2	4
Folles avoines : Avoine folle, Avoine stérile	3	3	4		4	4	3	
Fumeterres : F. officinale, F. à petites fleurs	2	2,5	2,4	2	2	2,5	3	4
Gaillet gratteron	4	4	3,9		2	3	4	4
Galéopsis : G. à feuilles étroites, G. intermédiaire			2		1			2
Galinsogas : G. à petites fleurs, G. cilié		2		2	2			
Géraniums			3,5		3	3	2	4
Gesse sans feuilles								1
Héliotrope d'Europe							2	
Helminthie fausse-vipérine			3,5				4	
Jonc des crapauds		2	1,9			1,5		4
Laiteron des champs installé	4		4					4
Laiteron rude* et Laiteron maraîcher	3	3	3,2		4	2,5	3,5	2
Lamiers : L. pourpre, L. amplexicaule	3	2	2	1	2	2	2	2
Lampourde à gros fruits	4	4			2	2		
Lampsane commune			4					2
Linaire mineure								1
Linaires : L. bâtarde, L. élatine		2	2,8	1	1	4	3,5	2
Liserons de semis : L. des champs, L. des haies					2			4
Liserons installés : L. des champs, L. des haies	4		4		4	3,5	4	4
Matricaires : M. camomille, M. discoïde, M. inodore	3	2	3,6	2	3	3	3,3	1
Mauve sylvestre de semis								2
Mercuriale annuelle	4	4	3,8	3	3,5	2,5	3,8	4
Morelle noire	4	2,5	2,4	1,5	1	1,2	2,5	1,5
Mourons : M des champs, M.femelle	3	2	2		1		2	4
Moutarde des champs ou Sanve	4	4	3,7	2	1	2,2	4	2
Moutarde noire								2
Muflier rubicond			4		1,5			
Myosotis des champs			2					2
Ortie brûlante					2			
Ortie royale	3,5	2	2,5		1		3	1
Panic à inflorescence dichotome	2,5	2,5		1,5	3,5	4		3
Panic capillaire	2	2	2,5	2	4	3		3
Panic faux-millet*	4	4	2	2	2	2	2,5	3

Panic pied de coq*	1,8	2	2	1,5	2	2,3	2	3
Pâturin annuel*	2	3	3,1	2	3	4	2	4
Pâturin commun	2	3	3,1	1		4	2	4
Pensée des champs et Violette tricolore	3,9	4	2,5	2	2,5	3,8	2,8	2
Phytolaque à dix étamines de semis				1	1			
Phytolaque à dix étamines installé					3			4
Plantains de semis : Pl. lancéolé, Pl. majeur					1	2	2	
Plantains installés : Pl. lancéolé, Pl. majeur	4					3,5		4
Pourpier maraîcher		2,5	2	2	2	3	2	1
Prêle des champs et Prêle géante					3,5	3,5		
Rapistre rugueux	4		3,5				4	
Ravenelle	4	4	3,7	2,5	1	2	4	1
Ray-grass* : R. d'Italie, R. anglais, Ivraie raide	2,1	3	4	3	4	4	3	4
Renoncule des champs et Renoncule des marais			1,7		1	3,3	2	
Renoncule rampante de semis					1			4
Renoncule rampante installée					3,5	3,5		4
Renouée des oiseaux	4	4	2,8	1	2,5	3,3	3	4
Renouée liseron	3,6	4	3,2	3	3	3,2	3	4
Renouée* persicaire et à feuilles de Patience*	3,8	3	2,7	2	1	1,3	2,5	2,5
Réséda raiponce			2			4	3,5	
Ronces installées					4			4
Rumex crépu et à feuilles obtuses de semis				1	2	1,5		2
Rumex crépu et à feuilles obtuses installés	4	4	4		3,5	4		4
Rumex Oseille et Rumex petite Oseille de semis					2	1,5		
Rumex Oseille et Rumex petite Oseille installés	4		4		3,5	4		4
Sabline à feuilles de Serpolet			2		1			
Scléranthe annuel			2		1			
Séneçon vulgaire*		3	4	2	2	1	4	2
Shérardie des champs			4		1	3		
Sicyos anguleux					2			
Souchet comestible	3				3	3,5		4
Spergule des champs			2		2	2		2
Stellaire intermédiaire ou Mouron des oiseaux	2,5	2,5	2,1	1,5	2	2,2	2,5	2,5
Tabouret des champs			1		1			3
Véronique à feuilles de Lierre		2						
Véroniques : V. de Perse, V. luisante, V. des champs, V. à f. de lierre			2,5	1	2,5	2	3	3
Véroniques sauf V. à f. de lierre : V. de Perse, V. luisante, V. des champs		3						
Vesce cultivée			4			2		1
Vesce de Bithynie								1

Vesce hérissée								1
Vulpie queue de rat						4		4
Vulpin des champs*	2,5	3	3,1	3	4	4	2	4

Source : Propre élaboration à partir des données par cultures tiré de Mamarot et Rodriguez (2003)

Note : les PSD sont présentées en début de tableau ; les autres adventices sont ensuite présentées par ordre alphabétique. Les couleurs classent les efficacités de bonnes (vert) à insuffisantes (rouge) en passant par des notes moyennes (jaune et orange). Les notes sont la moyenne des efficacités sur chaque culture sur lesquelles la SA est autorisée.

Des tableaux similaires sont produits et mis à jour par différentes structures. Ils peuvent légèrement différer en fonction des méthodologies retenues.

Annexe 5 : Usages autorisés du S-métolachlore, du diméthénamide-P et de la Pendiméthaline fin 2021

	S-métolachlore	Diméthénamide-P	Pendiméthaline
Ananas	x		
Betterave industrielle et fourragère	x	x	
Canne à sucre	x		x
Haricots écosés frais	x		
Haricots et Pois écosés frais	x		x
Haricots et pois non écosés frais	x		x
Maïs	x	x	x
Maïs doux	x	x	
Porte graine	x		x
Soja	x		x
Sorgho	x	x	x
Tournesol	x	x	x
Blé			x
Carotte			x
Céleris			x
Chicorées - Production de racines		x	
Choux			x
Choux à inflorescence		x	
Choux feuillus		x	
Choux pommés		x	
Crucifères oléagineuses		x	x
Cucurbitacées à peau non comestible			x
Cultures florales et plantes vertes			x
Fruits à pépins			x
Graines protéagineuses			x
Légumineuses fourragères			x
Légumineuses potagères (sèches)			x
Navet		x	
Oignon			x
Orge			x
Poireau		x	x
Pois écosés frais			x
Pomme de terre			x
Porte graine - Légumineuses fourragères			x
Porte graine - PPAMC, Florales et Potagères		x	
PPAMC			x
Riz			x

Salsifis			X
Seigle			X
Tabac			X
Tomate - Aubergine			X
Vigne			X

Source : Propre élaboration à partir du fichier transmis par l'ANSES le 12 octobre 2021 compilant l'ensemble des usages (autorisés et retirés) depuis la date de première autorisation de chaque produit phytosanitaire

Note : Les cultures pouvant recevoir au moins une des trois molécules sont listées dans la colonne de gauche. Les usages autorisés correspondent à du désherbage. Les usages du S-métolachlore sont présentés sur les premières lignes et sont surlignés en bleu.

Annexe 6 : Description des indicateurs DEPHY

Tableau 39 : Description des charges issues de DEPHY

Indicateur	Description
Charges opérationnelles (€/ha)	<p>Dépenses liées à l'achat des intrants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Semis ↳ Fertilisation (organique et minérale) ↳ Traitement des semences ↳ Irrigation ↳ Produits phytosanitaires ↳ Substrats ↳ Pots ↳ Autres intrants
Charges de mécanisation (€/ha)	<p>Dépenses liées à la mobilisation d'un ou plusieurs outils mécanisés :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Carburant ↳ Réparation ↳ Pneumatique ↳ Huiles ↳ Coûts fixes
Charges fixes de mécanisation (€/ha)	<p>Dépenses liées à l'amortissement du matériel :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Prix d'achat (P) ↳ Taux d'amortissement (T) ↳ Utilisation (U) <p>Les coûts fixes des charges de mécanisation sont donnés par :</p> $CF = \sum_m \frac{P_m \cdot 0.01 \cdot T_m}{U_m},$ <p>avec m les différents matériels.</p>
Charges de main d'œuvre tractoriste (€/ha)	<p>Dépenses liées au temps de travail de la main d'œuvre tractoriste :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Temps de travail tractoriste (18€/h)

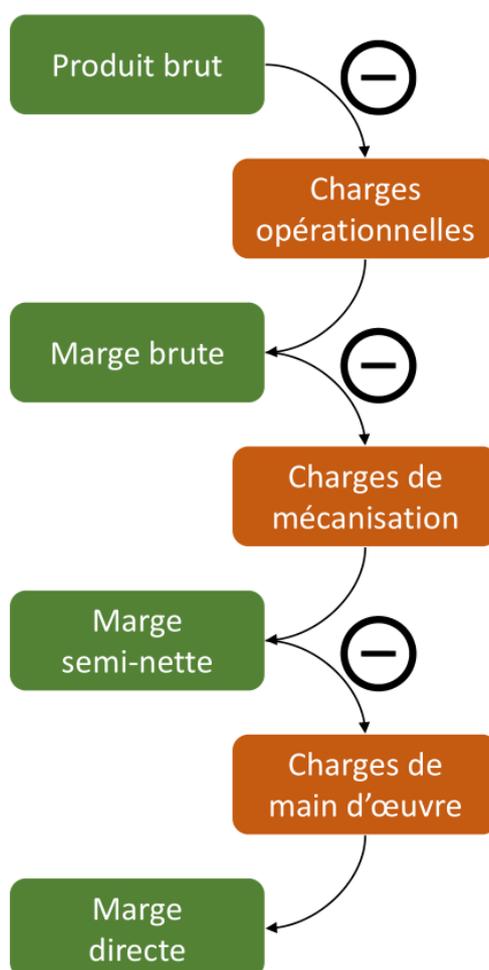
Source : Elaboration à partir de (Agrosyst, 2020).

Tableau 40 : Description des marges issues de DEPHY

Indicateur	Description
Produit brut (€/ha)	Produit dégagé par la vente des produits récoltés : ↳ Rendements × prix de vente
Marge brute (€/ha)	Différence entre produit brut et charges opérationnelles : ↳ Produit brut – charges opérationnelles
Marge semi-nette (€/ha)	Différence entre marge brute et charges de mécanisation : Marge brute – charges de mécanisation
Marge directe (€/ha)	Différence entre marge semi-nette et charges de main d'œuvre tractoriste : ↳ Marge semi-nette – charges de main d'œuvre tractoriste ¹¹⁶

Source : Elaboration à partir de (Agrosyst, 2020).

Figure 27 : Présentation générale des indicateurs de DEPHY



Source : Agrosyst, 2020.

¹¹⁶ En pratique, les charges de main d'œuvre manuelles sont mal renseignées dans DEPHY, et contiennent des valeurs manquantes. C'est pourquoi nous nous sommes restreints aux charges tractoristes.

Annexe 7 : Description des rotations dans DEPHY

Tableau 41 : Typologie de la rotation issue de DEPHY

Classe de rotation	Description de la rotation issue de DEPHY
Prairie temporaire	prairie temporaire >= 50 % assolement prairie temporaire < 50 % assolement
Maïs	maïs
Céréales à paille	céréales à paille/colza/maïs ou protéagineux
	céréales à paille hiver/colza
	céréales à paille/colza/tournesol
	céréales à paille/maïs (/tournesol)
	céréales à paille hiver+printemps/colza
Industrielle	successions avec betterave ou lin ou légumes de plein champ
	successions avec cultures porte graine
	successions avec pomme de terre
Autre	Pas de type rotation calculé
	Autre

Annexe 8 : Table des prix des récoltes millésimés utilisés pour l'analyse économique de DEPHY

NB : Ce référentiel a été construit à partir de différentes sources (DEPHY, Terres Inovia, etc.).

Tableau 42 : Table des prix des récoltes millésimés utilisés pour l'analyse économique de DEPHY

Campagne	Culture	Type d'agriculture	Prix	Unité
2006	Maïs Fourrage	Conventionnel	78,25	€/t
		Biologique	101,72	€/t
2007	Maïs Fourrage	Conventionnel	106,45	€/t
		Biologique	138,39	€/t
2008	Maïs Fourrage	Conventionnel	153	€/t
		Biologique	198,91	€/t
2009	Maïs Fourrage	Conventionnel	100,34	€/t
		Biologique	130,44	€/t
2010	Maïs Fourrage	Conventionnel	107,83	€/t
		Biologique	140,18	€/t
2011	Maïs Fourrage	Conventionnel	143,89	€/t
		Biologique	187,06	€/t
2012	Maïs Fourrage	Conventionnel	149,88	€/t
		Biologique	194,85	€/t
2013	Maïs Fourrage	Conventionnel	169,1	€/t
		Biologique	219,84	€/t
2014	Maïs Fourrage	Conventionnel	145,89	€/t
		Biologique	189,66	€/t
2015	Maïs Fourrage	Conventionnel	124,8	€/t
		Biologique	162,24	€/t
2016	Maïs Fourrage	Conventionnel	128,17	€/t
		Biologique	166,62	€/t
2017	Maïs Fourrage	Conventionnel	129,92	€/t
		Biologique	168,89	€/t
2018	Maïs Fourrage	Conventionnel	136,03	€/t
		Biologique	176,84	€/t
2019	Maïs Fourrage	Conventionnel	146,76	€/t
		Biologique	190,79	€/t
2020	Maïs Fourrage	Conventionnel	146,14	€/t
		Biologique	189,98	€/t
2021	Maïs Fourrage	Conventionnel	157	€/t
		Biologique	204,42	€/t
2006	Maïs Grain	Conventionnel	12,94	€/q
		Biologique	20,41	€/q

2007	Maïs Grain	Conventionnel	18,46 €/q
		Biologique	29,14 €/q
2008	Maïs Grain	Conventionnel	17,03 €/q
		Biologique	26,88 €/q
2009	Maïs Grain	Conventionnel	12,72 €/q
		Biologique	20,07 €/q
2010	Maïs Grain	Conventionnel	16,12 €/q
		Biologique	25,44 €/q
2011	Maïs Grain	Conventionnel	21,3 €/q
		Biologique	33,61 €/q
2012	Maïs Grain	Conventionnel	22,38 €/q
		Biologique	35,31 €/q
2013	Maïs Grain	Conventionnel	20,13 €/q
		Biologique	31,76 €/q
2014	Maïs Grain	Conventionnel	15,74 €/q
		Biologique	24,83 €/q
2015	Maïs Grain	Conventionnel	15,4 €/q
		Biologique	24,3 €/q
2016	Maïs Grain	Conventionnel	15,37 €/q
		Biologique	24,25 €/q
2017	Maïs Grain	Conventionnel	15,6 €/q
		Biologique	24,62 €/q
2018	Maïs Grain	Conventionnel	16,17 €/q
		Biologique	25,52 €/q
2019	Maïs Grain	Conventionnel	16,31 €/q
		Biologique	25,73 €/q
2020	Maïs Grain	Conventionnel	16,8 €/q
		Biologique	26,51 €/q
2021	Maïs Grain	Conventionnel	22,68 €/q
		Biologique	35,79 €/q
2006	Soja	Conventionnel	21,58 €/q
		Biologique	32,37 €/q
2007	Soja	Conventionnel	28,29 €/q
		Biologique	42,44 €/q
2008	Soja	Conventionnel	36,08 €/q
		Biologique	54,12 €/q
2009	Soja	Conventionnel	31,32 €/q
		Biologique	46,98 €/q
2010	Soja	Conventionnel	36,43 €/q
		Biologique	54,65 €/q
2011	Soja	Conventionnel	39,59 €/q
		Biologique	59,39 €/q
2012	Soja	Conventionnel	47,35 €/q

		Biologique	71,02 €/q
2013	Soja	Conventionnel	43,24 €/q
		Biologique	64,86 €/q
2014	Soja	Conventionnel	41,54 €/q
		Biologique	62,31 €/q
2015	Soja	Conventionnel	36,55 €/q
		Biologique	54,83 €/q
2016	Soja	Conventionnel	37,31 €/q
		Biologique	55,96 €/q
2017	Soja	Conventionnel	36,3 €/q
		Biologique	54,46 €/q
2018	Soja	Conventionnel	33,92 €/q
		Biologique	50,87 €/q
2019	Soja	Conventionnel	33,69 €/q
		Biologique	50,54 €/q
2020	Soja	Conventionnel	36,29 €/q
		Biologique	54,43 €/q
2021	Soja	Conventionnel	50,69 €/q
		Biologique	76,03 €/q
2006	Tournesol	Conventionnel	25,38 €/q
		Biologique	33,05 €/q
2007	Tournesol	Conventionnel	41,97 €/q
		Biologique	54,65 €/q
2008	Tournesol	Conventionnel	41,74 €/q
		Biologique	54,35 €/q
2009	Tournesol	Conventionnel	27,69 €/q
		Biologique	36,05 €/q
2010	Tournesol	Conventionnel	42,55 €/q
		Biologique	55,4 €/q
2011	Tournesol	Conventionnel	45,04 €/q
		Biologique	58,65 €/q
2012	Tournesol	Conventionnel	54,95 €/q
		Biologique	71,55 €/q
2013	Tournesol	Conventionnel	41,4 €/q
		Biologique	53,9 €/q
2014	Tournesol	Conventionnel	33,1 €/q
		Biologique	43,1 €/q
2015	Tournesol	Conventionnel	38,4 €/q
		Biologique	50 €/q
2016	Tournesol	Conventionnel	36,79 €/q
		Biologique	47,9 €/q
2017	Tournesol	Conventionnel	34,64 €/q
		Biologique	45,1 €/q

2018	Tournesol	Conventionnel	31,45 €/q
		Biologique	40,95 €/q
2019	Tournesol	Conventionnel	32,49 €/q
		Biologique	42,3 €/q
2020	Tournesol	Conventionnel	37,06 €/q
		Biologique	42,25 €/q
2021	Tournesol	Conventionnel	53,72 €/q
		Biologique	69,95 €/q

Annexe 9 : Hypothèses de la pondération par les scores de propension

Comme beaucoup de méthodes d'estimations statistiques paramétriques, l'estimation d'effets moyens via la pondération par les scores de propension repose sur quelques hypothèses qu'il est important de vérifier (Hirano *et al.*, 2003). La première de ces hypothèses, dite hypothèse de non-confusion (*unconfoundedness assumption*, Rosenbaum et Rubin, 1983), est que toutes les variables affectant à la fois le traitement et la variable d'intérêt (le rendement, par exemple) sont observées. En pratique, cette hypothèse est intenable, et l'inclusion (ou non) de facteurs confondants dans le modèle d'estimation des scores de propension est largement faite i) selon les avis d'experts, et ii) en fonction des données disponibles.

Une seconde hypothèse est qu'il ne doit pas être possible d'identifier de manière certaine si une observation (parcelle dans notre cas) a ou non reçu le traitement (S-métolachlore dans notre cas) de manière certaine à partir des covariables incluses dans le modèle d'estimation des scores de propensions. Ces derniers étant définis comme la probabilité de recevoir le traitement sachant les covariables, il ne faut donc pas que l'on obtienne des scores de propension à 0 ou à 1. Le [Tableau 43](#) donne les valeurs maximales et minimales des estimations des scores de propensions utilisées pour l'analyse, en reprenant la notation introduite en partie [6.1](#).

Tableau 43 : Valeurs minimum et maximum des scores de propension estimés

Culture	Alternative	Valeur minimale des e_p	Valeur maximale des e_p
Maïs grain	Chimique	0,0000121	0,894
	Non-chimique	0,049	0,992
Maïs fourrage	Chimique	0,000001	0,867
	Non-chimique	0,00000144	0,999
Soja	Chimique	0,025	0,999
	Non-chimique	0,005	0,999
Tournesol	Chimique	0,00000219	0,613
	Non-chimique	0,016	0,998

On constate que, si des scores de 0 ou de 1 ne sont jamais atteints (ce qui nous permet de respecter la seconde hypothèse), les minimums et maximums peuvent parfois s'en approcher très largement. En pratique, il est recommandé d'exclure de l'analyse les parcelles ayant un score de propension trop extrême (trop proche de 0 ou de 1), puisque ces dernières, minoritaires, pourraient se voir attribuer un poids extrêmement élevé, faussant ainsi

l'estimation de la variable d'intérêt (Lee *et al.*, 2011 ; Stürmer *et al.*, 2014). Ainsi, nous avons donc systématiquement exclu de l'analyse les parcelles ayant un score de propension en dehors de l'intervalle [0,05 ; 0,95]. Le **Tableau 44** donne le nombre de parcelles exclues par culture.

Tableau 44 : Parcelles exclues de l'analyse

Culture	Alternative	Nombre de parcelles exclues
Maïs grain	Chimique	14
	Non-chimique	49
Maïs fourrage	Chimique	105
	Non-chimique	31
Soja	Chimique	13
	Non-chimique	92
Tournesol	Chimique	3
	Non-chimique	60

Enfin, une troisième hypothèse importante suppose que les covariables utilisées pour l'estimation des scores de propension soient équilibrées après pondération. Les covariables sont considérées comme équilibrées si leur moyenne, ajustée par les scores de propension, dans le groupe traité (le groupe 1) et le groupe non-traité (les groupes 2 et 4) sont suffisamment proches. Intuitivement, on comprend aisément que si toutes les covariables sont équilibrées entre le groupe traité et le groupe non-traité, alors les parcelles du premier sont statistiquement proches, ou en d'autres termes, comparables, aux parcelles du second, et au regard de ces covariables. La manière la plus largement utilisée pour vérifier l'équilibre des covariables est le calcul de la différence de moyennes standardisées (Austin, 2009 ; Zhang *et al.*, 2019).

L'objectif est alors de s'assurer que ces différences de moyennes standardisées soient, après pondération, aussi proches de 0 que possible. Dans la littérature, différents seuils existent et sont débattus. Selon les deux plus répandus, on considère ainsi qu'une covariable est équilibrée si sa différence de moyenne standardisée après pondération est inférieure (en valeur absolue) à 0,25 (Stuart, 2010) ou inférieure à 0,1 (Austin, 2011). Nous avons choisi d'appliquer le critère le plus strict, de 0,1, tout en tolérant des exceptions tant qu'elles restent rares et inférieures au seuil de 0,25. Les pages suivantes donnent les résultats de la vérification de l'équilibre des covariables pour chacune des analyses menées (chaque culture + type d'alternative). En outre, le **Tableau 45** recense et décrit les covariables utilisées pour l'estimation des scores de propension.

Tableau 45 : Description des covariables incluses dans l'estimation des scores de propension

Nom de la covariable	Description
domaine_campagne	Année de la campagne (de 2009 à 2021)
rotation type	Typologie des parcelles selon leurs rotations-types : -> cereales_paille : rotation reposant principalement sur des cultures de céréales à paille (colza, tournesol...) -> prairie_tempo : rotation reposant sur des prairies temporaires -> industriel : rotation reposant sur des cultures industrielles (pomme de terre, betterave...) -> mais_intensif : rotation n'incluant que du maïs -> autre : autres types de rotations
res_adventices	Niveau de résistance des principales adventices incluses dans le spectre du S-métolachlore (vulpins, ivraies, panic, sétaires, digitales, chénopode) au sein du département de la parcelle, moyenne des scores de fréquence de détection de chaque espèce
t_q	Température moyenne (*)
preliq_q	Précipitations liquides (*)
swi_q	Indice d'humidité des sols (*)
hu_q	Humidité relative (*)
ssi_q	Rayonnement visible (*)
evap_q	Evapotranspiration réelle (*)
wg_racine_q	Contenu en eau liquide dans la couche racinaire (*)
runc_q	Ruissellement (*)
AWC	Capacité de rétention d'eau des sols (**)
Sand	Teneur des sols en argile (%) (**)
Silt	Teneur des sols en limon (%) (**)
Clay	Teneur des sols en sable (%) (**)
CN	ratio C/N (**)
pH	pH dans l'eau (**)

typo_rural

Typologie de la ruralité, associé à la parcelle via son code commune INSEE :

-> **F_CVLV_DYN** : Campagnes des villes, du littoral et des vallées urbanisées ; densifiées, en périphérie des villes, à très forte croissance résidentielle et économie dynamique

-> **F_CVLV_DIF** : Campagnes des villes, du littoral et des vallées urbanisées ; diffuses, en périphérie des villes, à croissance résidentielle et dynamique économique diversifiée

-> **F_CVLV_PRES** : Campagnes des villes, du littoral et des vallées urbanisées ; densifiées, du littoral et des vallées, à forte croissance résidentielle et à forte économie présentielle

-> **F_C_AI** : Campagnes agricoles et industrielles ; sous faible influence urbaine

-> **F_CFD_PRESA** : Campagnes vieilles à très faible densité ; faibles revenus, économie présentielle et agricole

-> **F_CFD_PRESTOU** : Campagnes vieilles à très faible densité ; faibles revenus, croissance résidentielle, économie présentielle et touristique

-> **F_CFD_ESERV** : Campagnes vieilles à très faible densité ; faibles revenus, croissance résidentielle, économie présentielle et touristique, très fort éloignement des services d'usage courant

* Moyennes annuelles de la petite région agricole à laquelle la parcelle est rattachée

** Moyennes annuelles de la petite région agricole à laquelle la parcelle est rattachée ; valeurs prédites à partir de mesures européennes

Figure 28 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives chimiques - maïs grain

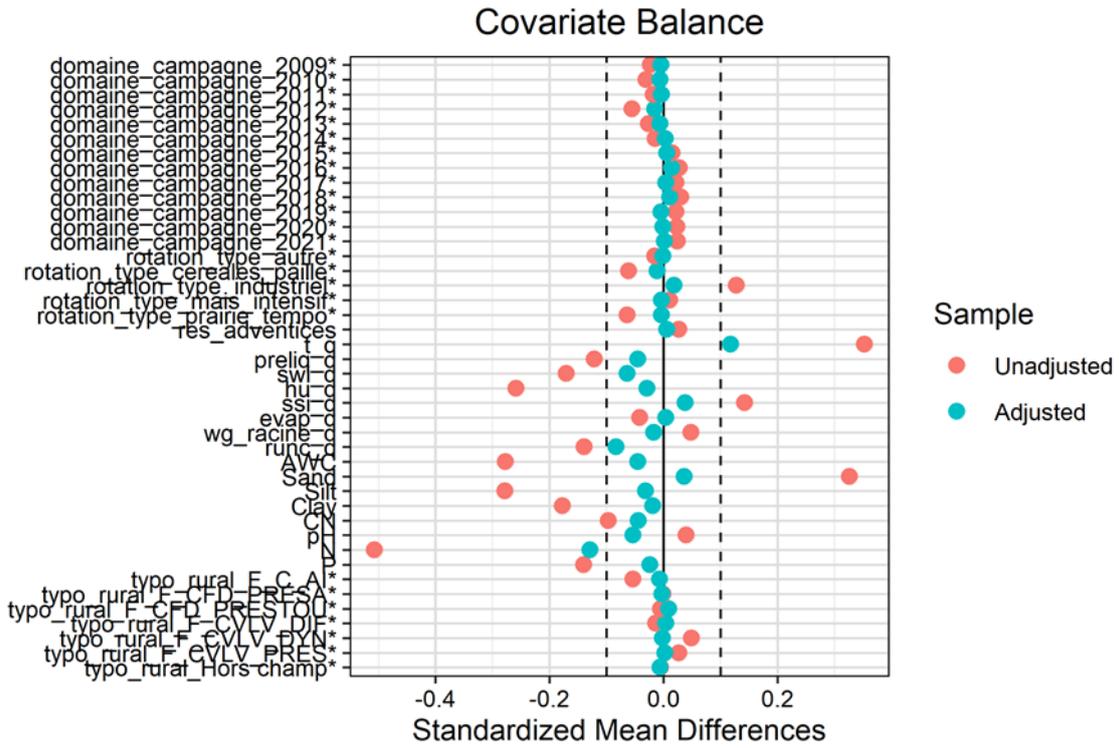


Figure 29 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives non-chimiques - maïs grain

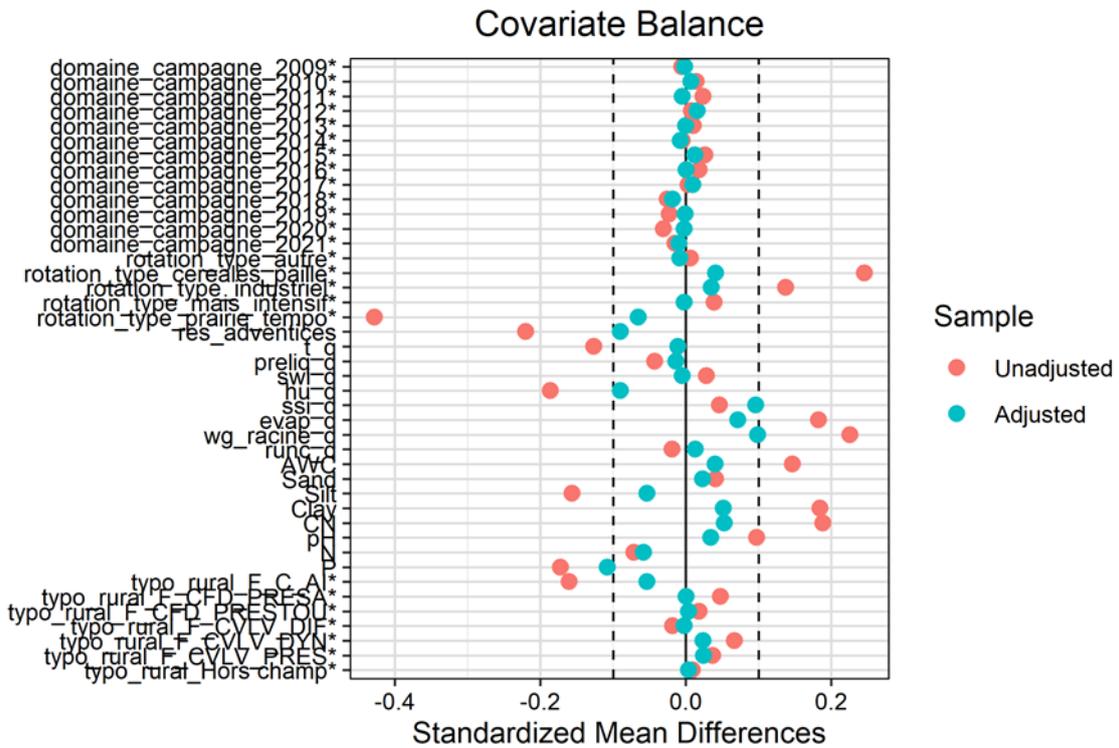


Figure 30 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives chimiques - maïs fourrage

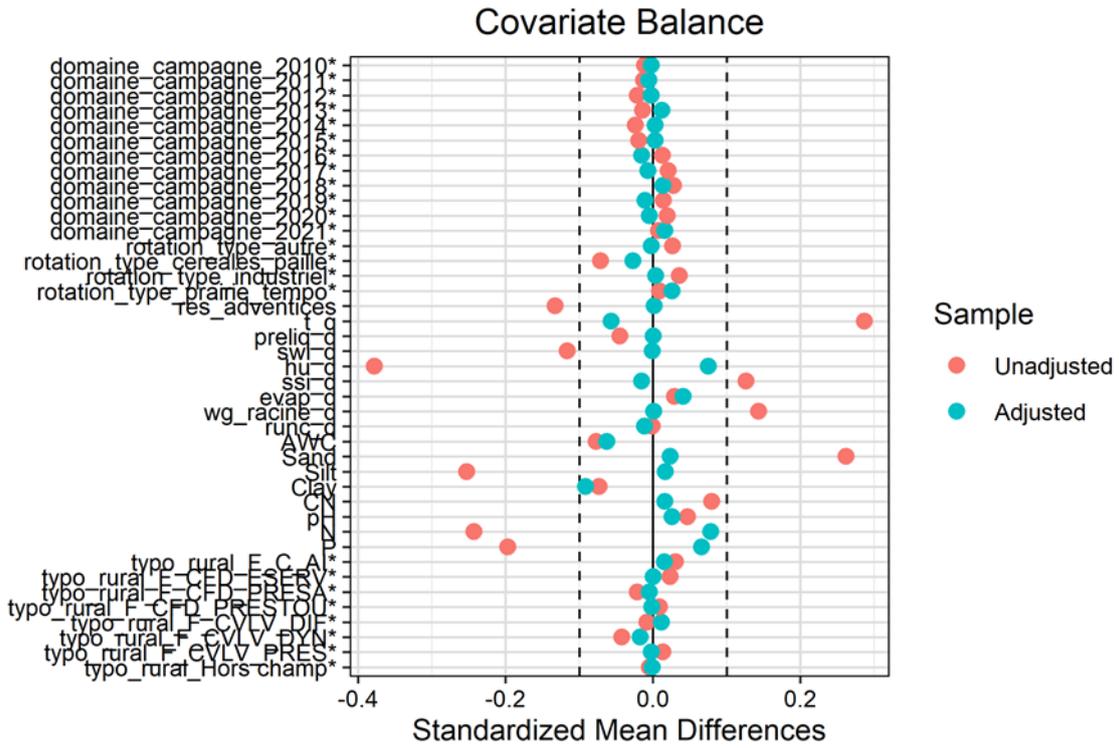


Figure 31 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives non-chimiques - maïs fourrage

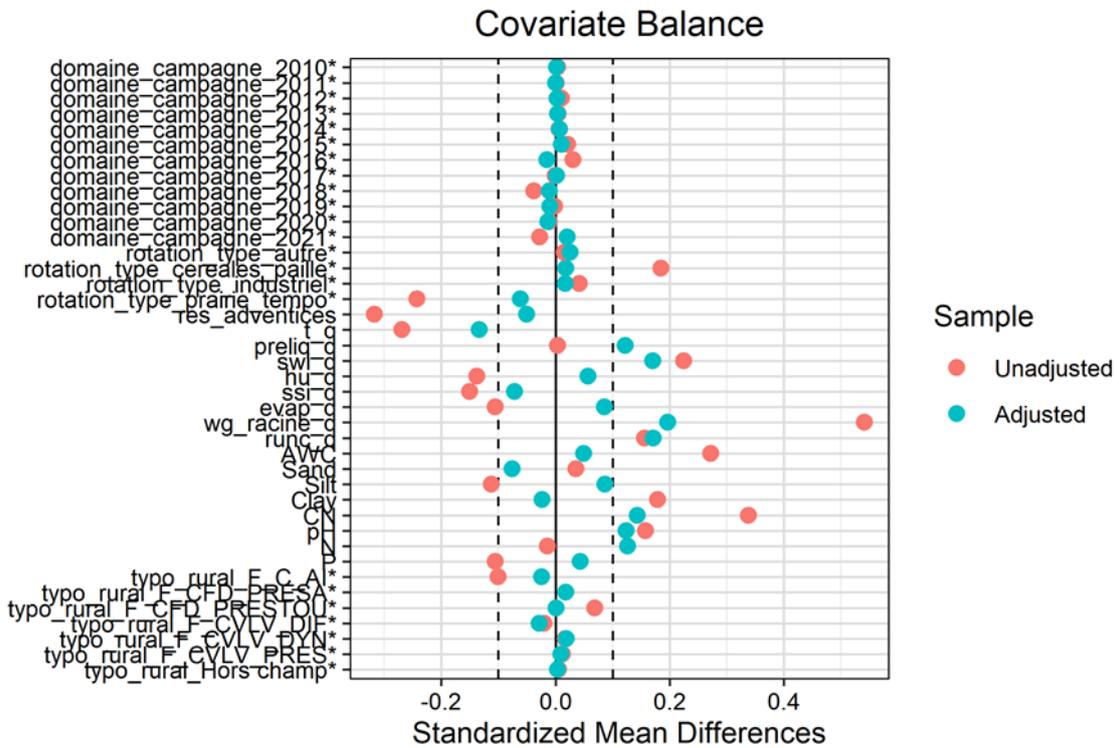


Figure 32 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives chimiques - soja

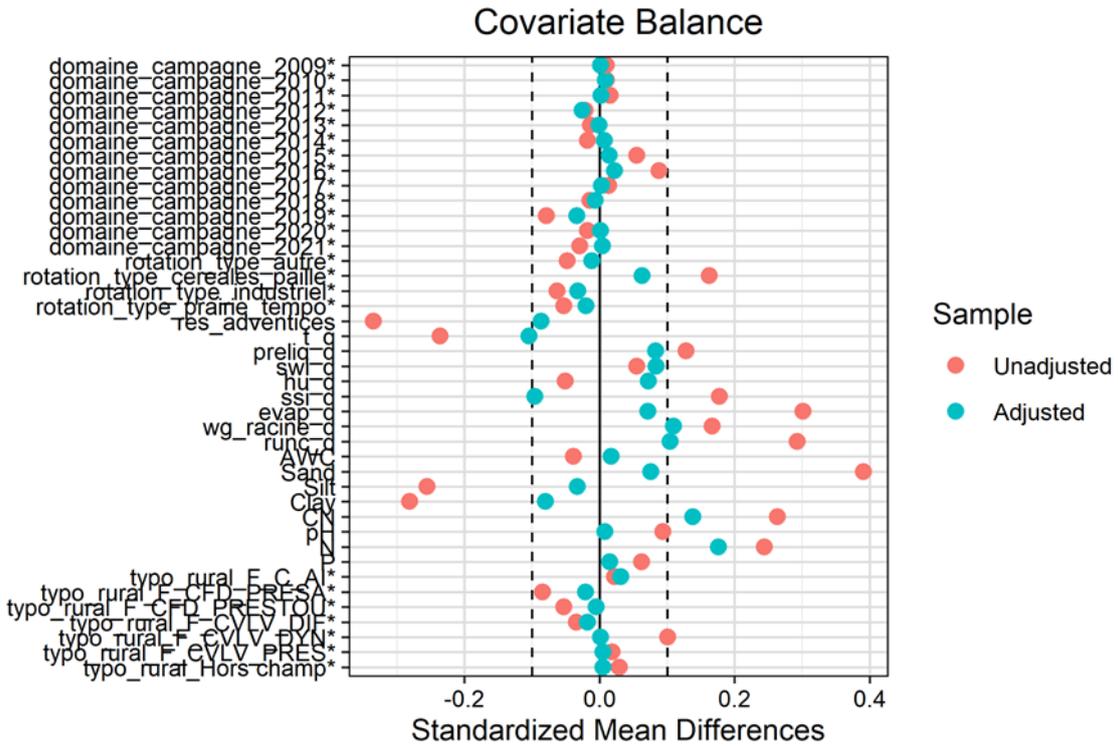


Figure 33 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives non-chimiques - soja

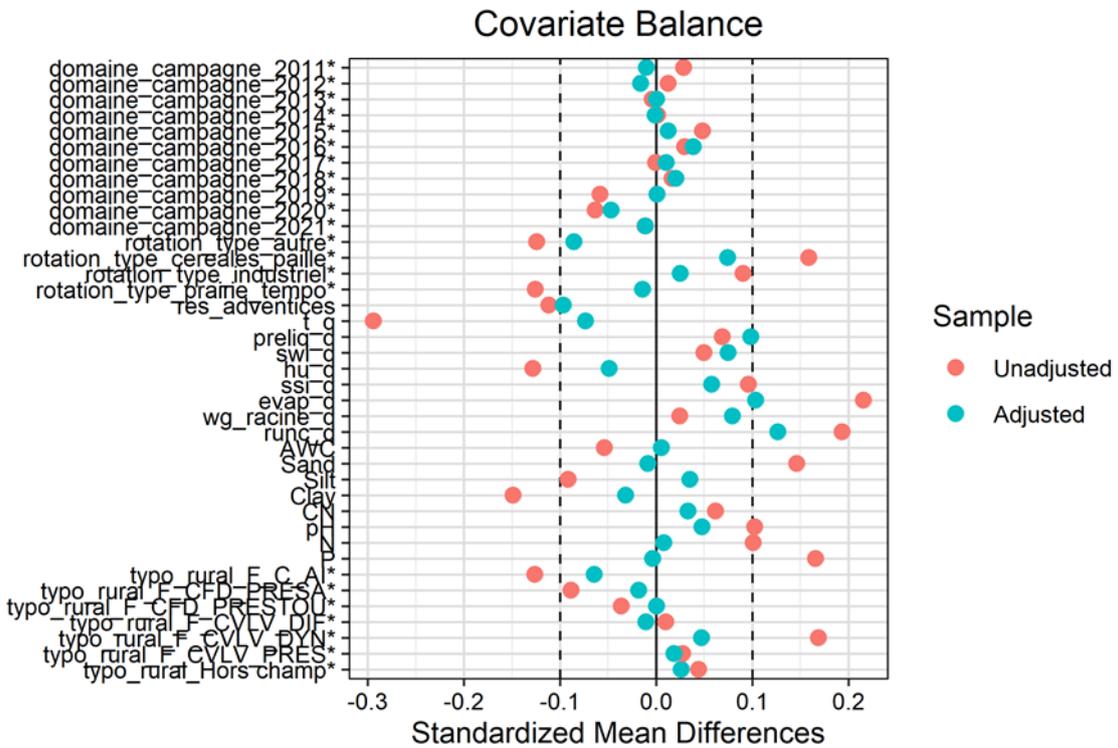


Figure 34 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives chimiques - tournesol

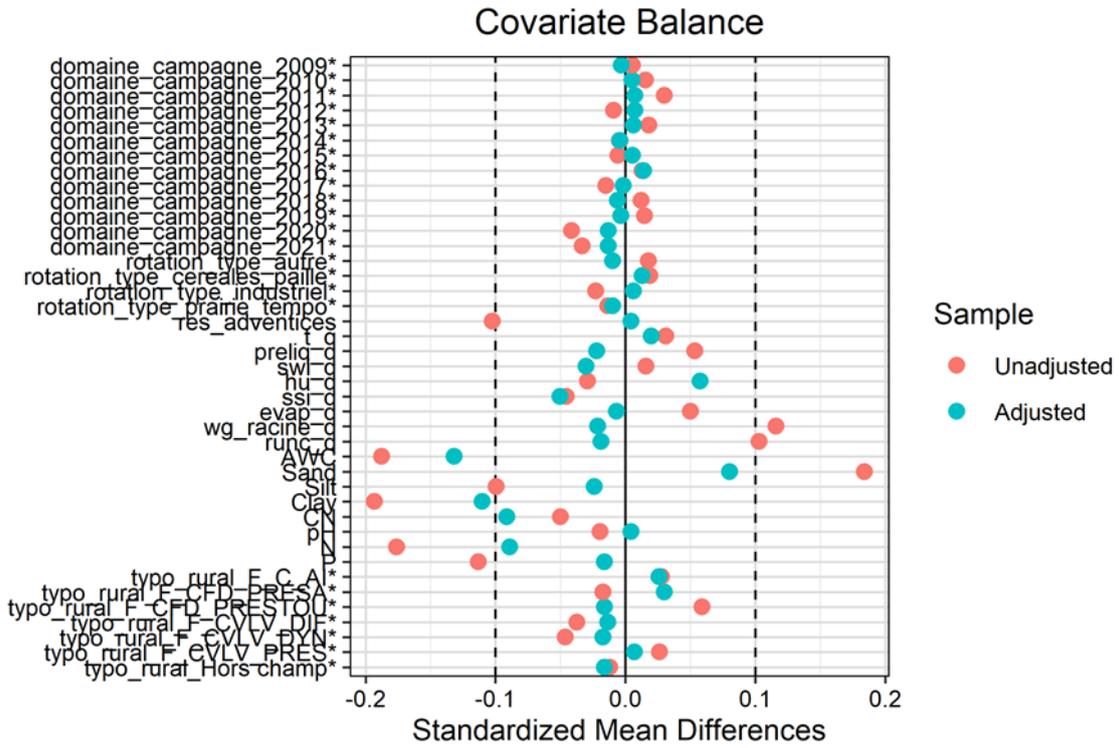
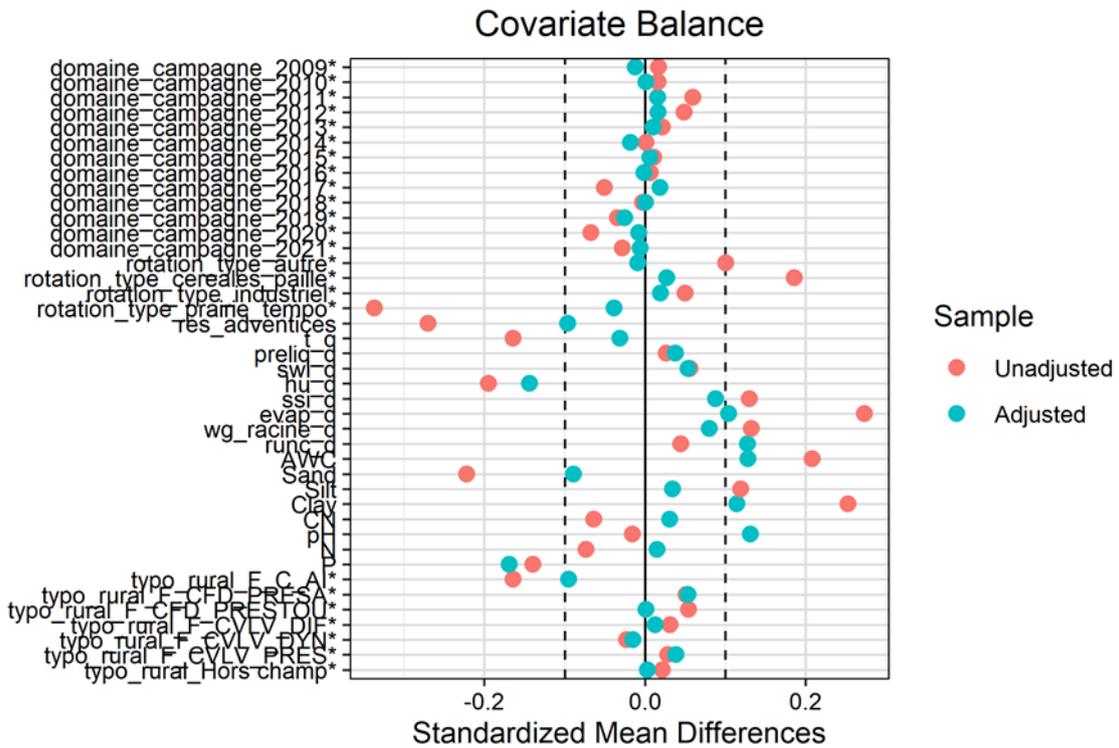
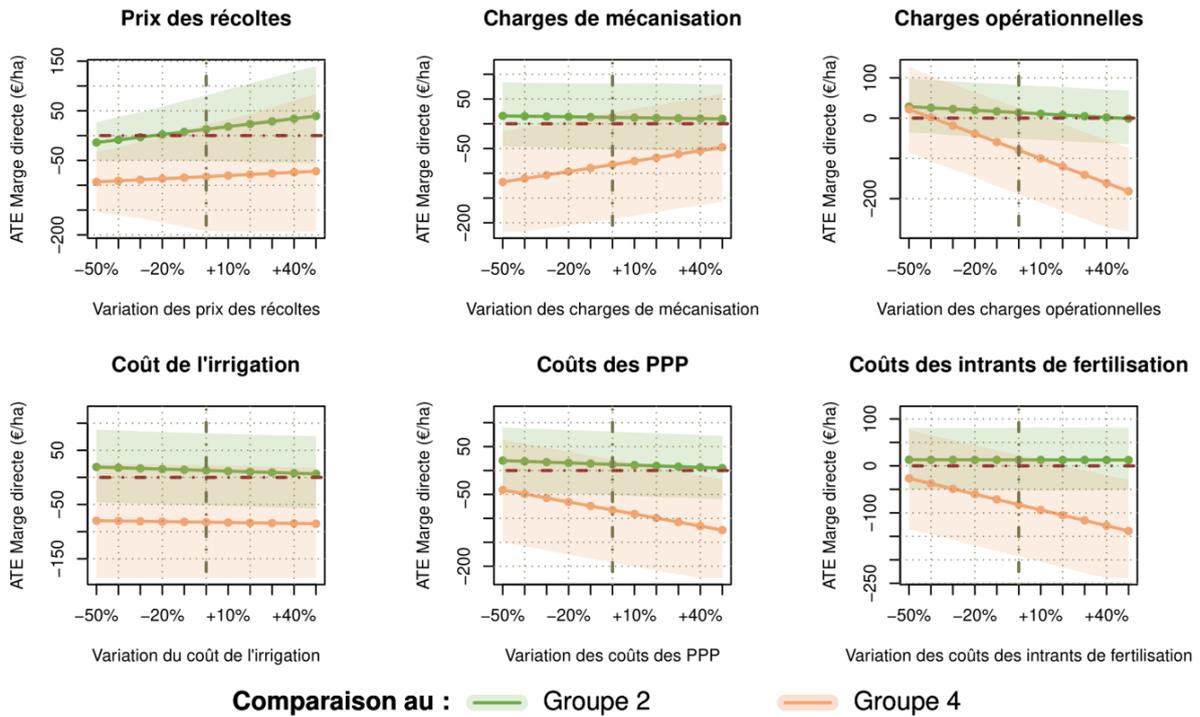


Figure 35 : Equilibre des covariables pour la comparaison aux alternatives non-chimiques - tournesol

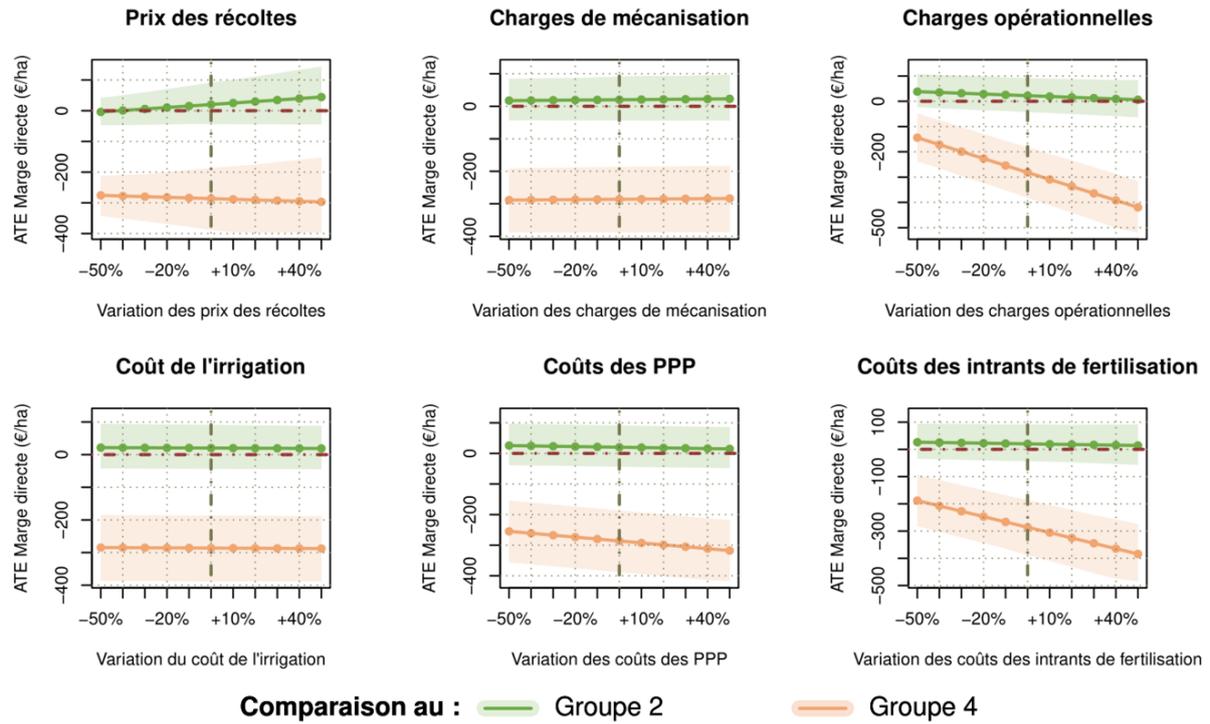


Annexe 10 : Détail des résultats de l'analyse de sensibilités menée sur les estimations des performances économiques des parcelles avec et sans S-métolachlore

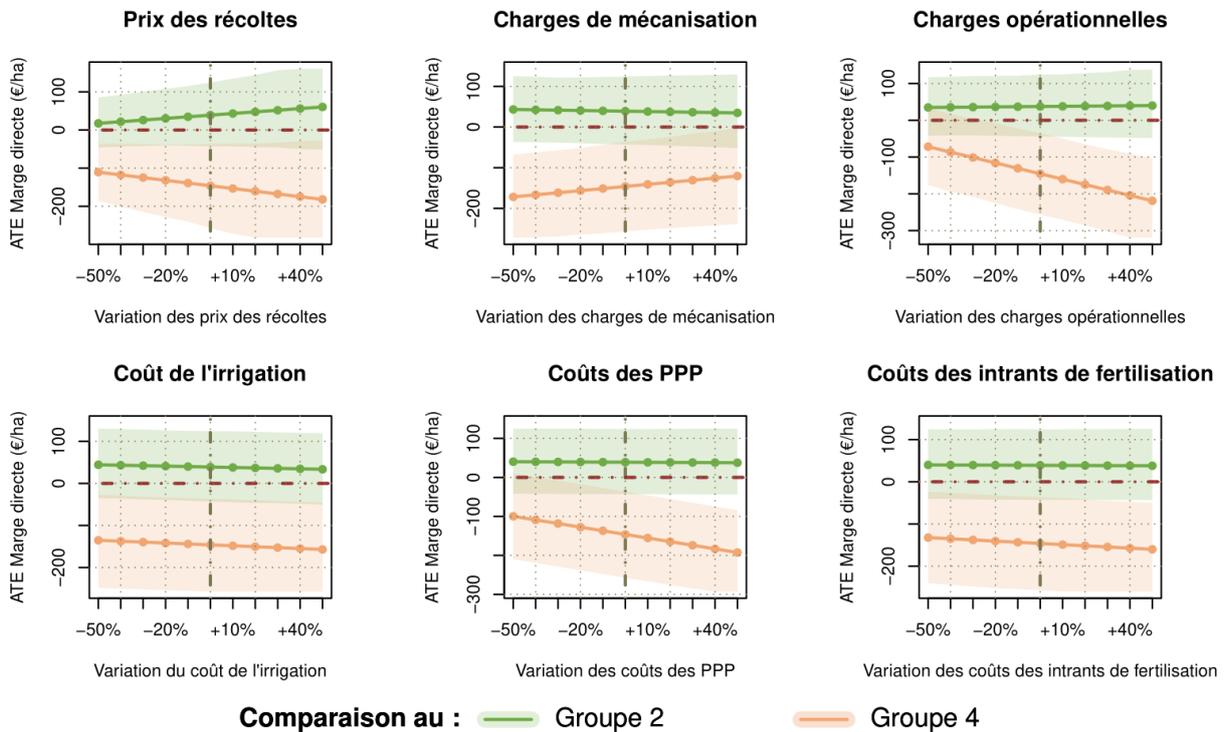
Maïs grain



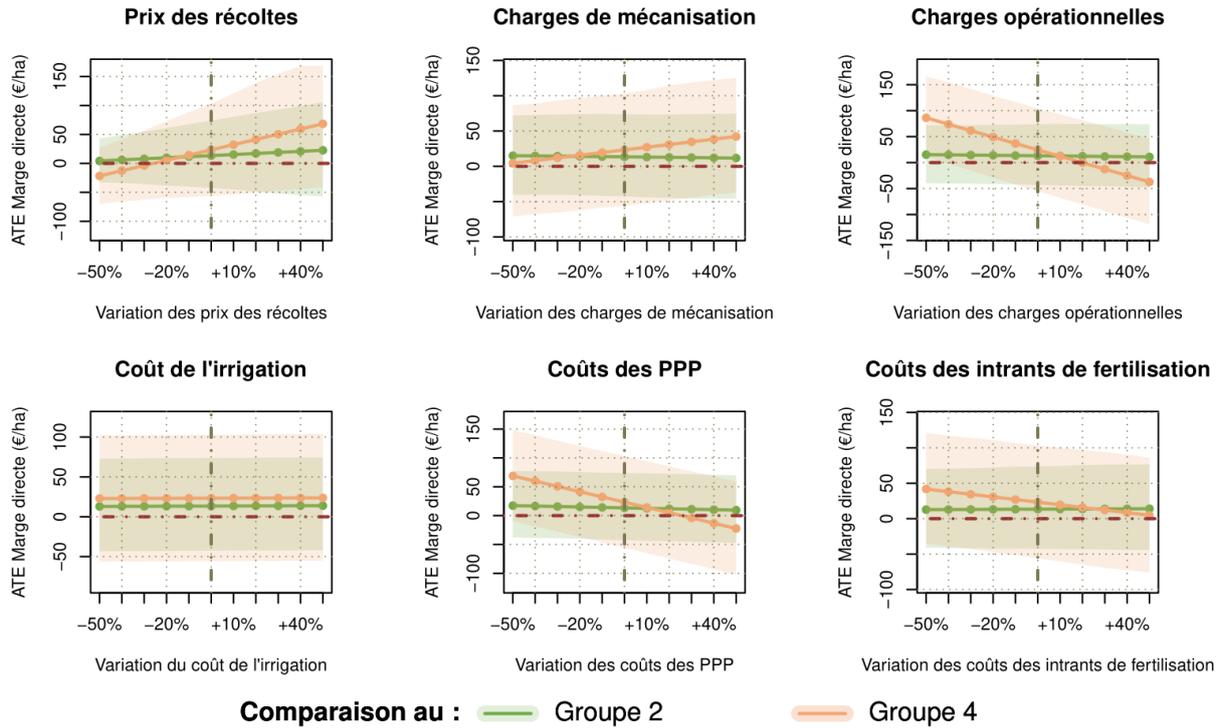
Maïs fourrage



Soja



Tournesol



Annexe 11 : Détails de la comparaison du S métolachlore à ses potentielles alternatives chimiques

Diméthénamide-P

Au sein des données DEPHY, et de nos trois potentiels substitués, le dmta-P est la molécule la plus répandue. Pour cela, l'analyse par score de propension permet des estimations relativement précises. Ces dernières sont présentées dans le [Tableau 46](#) pour le maïs grain et dans le [Tableau 47](#) pour le maïs fourrage.

Tableau 46 : Comparaison S-métolachlore - diméthénamide-P - maïs grain

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
S-métolachlore	572	96,65	2,35	0,22	3,03	1,74	388,29
Diméthénamide-P	330	94,76	2,45	0,28	3,02	1,87	391,27
ATE		1,88	-0,1	-0,06	0,01	-0,13	-2,98
Ecart-type		2,29	0,12	0,04	0,09	0,06	14,73
Significativité		NS	NS	NS	NS	*	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
S-métolachlore	300,05	90	103,59	1616,31	1228,02	824,38
Diméthénamide-P	295,02	88,31	100,78	1598,16	1206,9	811,11
ATE	5,03	1,69	2,81	18,14	21,12	13,27
Ecart-type	9,25	2,9	4,47	46,15	46,53	47,02
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY

Tableau 47 : Comparaison S-métolachlore - diméthénamide-P - maïs fourrage

	Nombre de parcelles	Rendement (t/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
S-métolachlore	330	13,45	2,35	0,17	2,27	1,47	408,01
Diméthénamide-P	321	13,67	2,17	0,21	2,49	1,67	377,37
ATE		-0,22	0,17	-0,04	-0,22	-0,2	30,63
Ecart-type		0,32	0,13	0,05	0,07	0,05	23,93
Significativité		NS	NS	NS	**	***	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
S-métolachlore	318,61	106,81	91,92	1777,42	1369,42	958,88
Diméthénamide-P	322,37	106,39	96,94	1801,17	1423,8	1004,49
ATE	-3,76	0,42	-5,02	-23,75	-54,39	-45,61
Ecart-type	9,42	3,77	4,57	43,02	47,87	48,26
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : Non significatif

Note : pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%.

Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

Dans un cas comme dans l'autre, on ne trouve aucune différence significative d'ordre économique, seulement quelques-unes d'ordre technique. Globalement, les IFT total et herbicides ont tendance à être plus élevés lorsque la parcelle est traitée au dmta-P plutôt qu'au S-métolachlore. L'étude de l'équilibre des covariables pré et post-pondération (ci-après) montre un bon respect des hypothèses de la méthode, suggérant qu'il existe un grand nombre de situations communes à l'utilisation du S-métolachlore comme du dmta-P (bien que, dans l'ensemble, on constate que ce dernier a plus tendance à être utilisé sur des sols argileux ayant une forte capacité de rétention d'eau, contrairement au S-métolachlore étant plus familier des sols plutôt sableux). L'absence de surcoût et les larges conditions d'utilisation du dmta-P suggèrent un risque assez fort de report sur ce dernier en cas d'interdiction du S-métolachlore.

Figure 36 : Equilibre des covariables pour la comparaison entre S-métolachlore et dmta-P - maïs grain

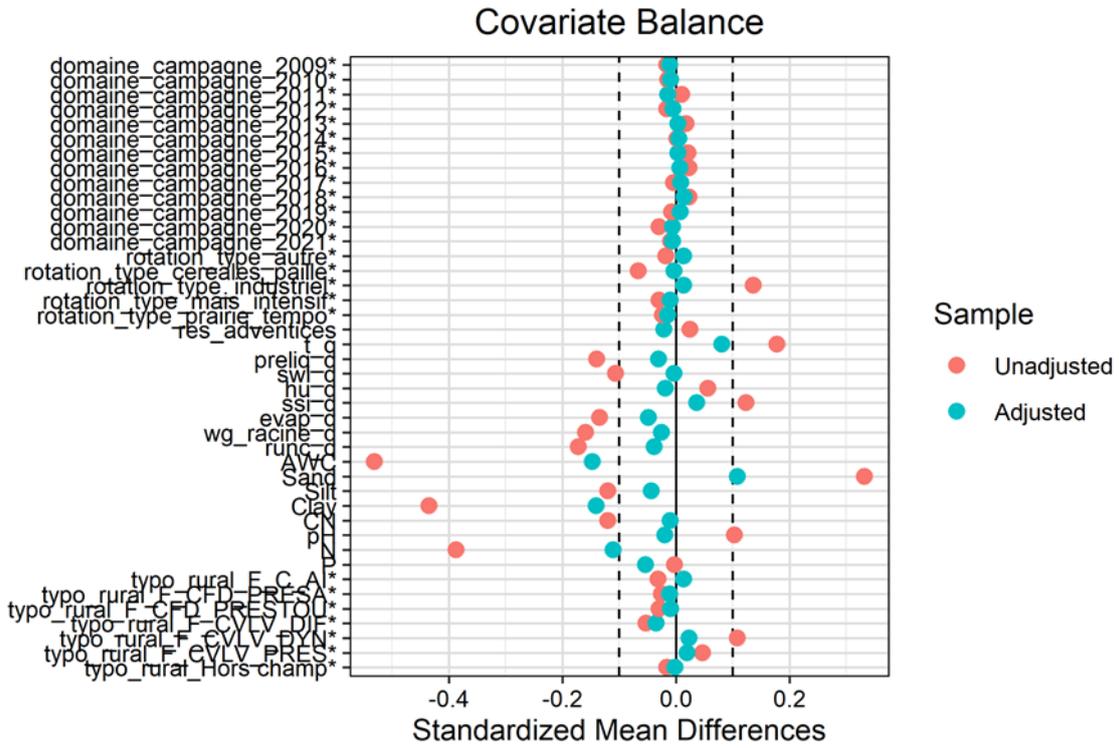
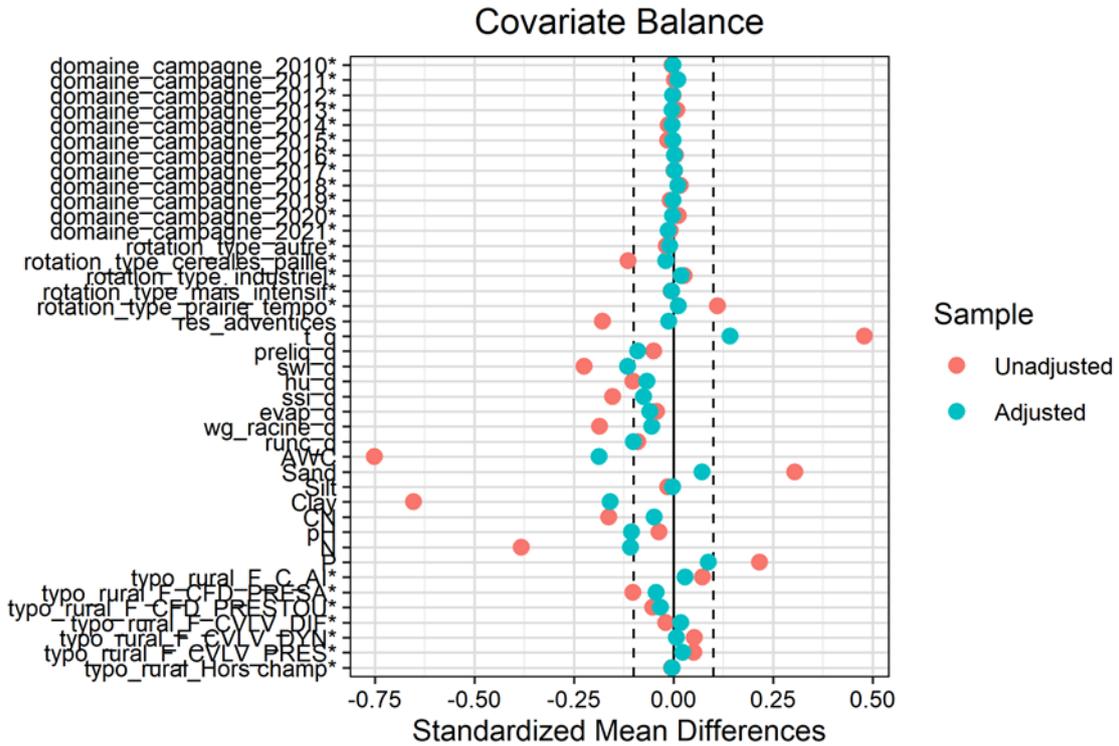


Figure 37 : Equilibre des covariables pour la comparaison entre S-métolachlore et dmta-P - maïs fourrage



Pendiméthaline

A la différence du dmta-P, le pendiméthaline est largement moins représentée dans DEPHY. De ce fait, seul un faible nombre de parcelles est considéré pour l'analyse, ce qui réduit grandement la précision des estimations. Les tableaux [Tableau 48](#) et [Tableau 49](#) présentent tout de même les résultats. Notons le faible nombre de parcelles en maïs grain : une partie de l'explication tient au faible nombre de parcelles traitées à la pendiméthaline. En revanche, le nombre de parcelles recevant du S-métolachlore est réduit artificiellement par la méthode d'estimation : il est en effet recommandé de supprimer de l'analyse les parcelles ayant un score de propension trop proche de 0 ou 1, puisque ces dernières sont trop peu comparables aux parcelles de l'autre groupe. Ici, bon nombre de parcelles ont été ainsi enlevées. Ceci a un impact majeur sur la précision des estimations, qui baisse drastiquement.

Tableau 48 : Comparaison S-métolachlore - pendiméthaline - maïs grain

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
S-métolachlore	182	98,65	2,33	0,26	2,88	1,7	379,23
Pendiméthaline	54	98,64	2,38	0,13	3,29	2,05	394,19
ATE		0	-0,05	0,13	-0,41	-0,34	-14,97
Ecart-type		5,18	0,31	0,06	0,18	0,15	27,46
Significativité		NS	NS	*	*	*	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
S-métolachlore	306,27	93,87	102,76	1727,2	1347,97	938,94
Pendiméthaline	322,25	107,22	114,12	1754,98	1360,79	924,43
ATE	-15,97	-13,35	-11,35	-27,78	-12,82	14,51
Ecart-type	21,23	8,67	9,83	119,6	118,36	117,79
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note : NS : Non significatif. Pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

Tableau 49 : Comparaison S-métolachlore - pendiméthaline - maïs fourrage

	Nombre de parcelles	Rendement (t/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
S-métolachlore	272	13,37	2,48	0,17	2,24	1,44	429,56
Pendiméthaline	95	12,98	2,02	0,13	2,28	1,47	361,41
ATE		0,39	0,46	0,04	-0,04	-0,03	68,16
Ecart-type		0,5	0,26	0,06	0,1	0,09	39,61
Significativité		NS	NS	NS	NS	NS	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
S-métolachlore	325,81	109,51	93,74	1761,28	1331,72	912,16
Pendiméthaline	333,36	113,34	104,84	1701,65	1340,24	902,04
ATE	-7,55	-3,82	-11,1	59,64	-8,52	10,13
Ecart-type	17,57	8,53	9,91	65,8	77,19	81,6
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note : NS : Non significatif. Pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p -valeur $\leq 0,001$), ** = fortement significatif (p -valeur $\leq 0,01$), * = faiblement significatif (p -valeur $\leq 0,05$).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

Le faible nombre de parcelles gardées pour l'analyse, réduisant la précision des estimations, ne facilite pas la tâche, mais on ne constate pas de différence de marge directe entre parcelles traitées au S-métolachlore et pendiméthaline. En maïs fourrage, aucun des indicateurs considérés ne montre de différence significative. Le fait que les covariables ne soient pas tout à fait à l'équilibre (au regard du seuil le plus restrictif de 0,1, tout en respectant le seuil moins restrictif de 0,25 ; voir ci-après) semble indiquer que les conditions d'utilisation de la pendiméthaline et du S-métolachlore sont assez différentes. On peut préciser ces différences en étudiant l'équilibre des covariables qui souligne que la pendiméthaline est plutôt utilisée sur sol argileux et à forte capacité de rétention d'eau. Le S-métolachlore se retrouve surtout dans les parcelles soumises à une forte température moyenne, avec un sol sableux. On peut donc s'attendre à un report partiel sur la pendiméthaline, en cas d'interdiction du S-métolachlore, mais seulement dans certaines situations où la première est efficace.

Figure 38 : Equilibre des covariables pour la comparaison entre S-métolachlore et pendiméthaline - maïs grain

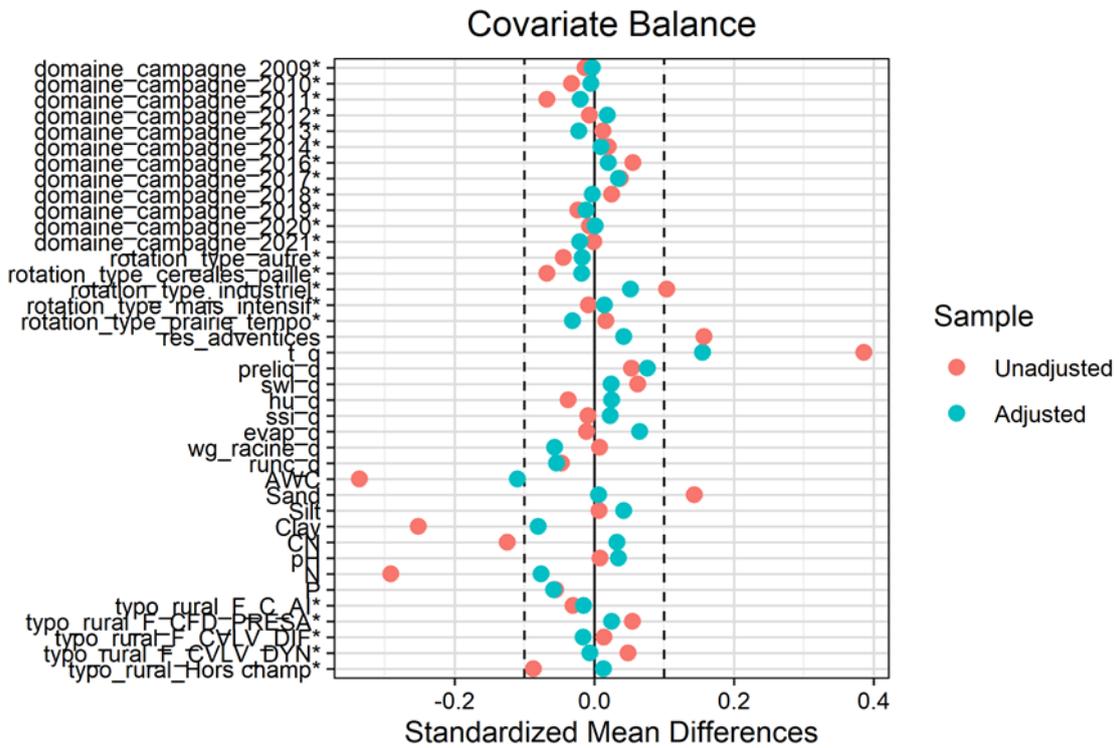
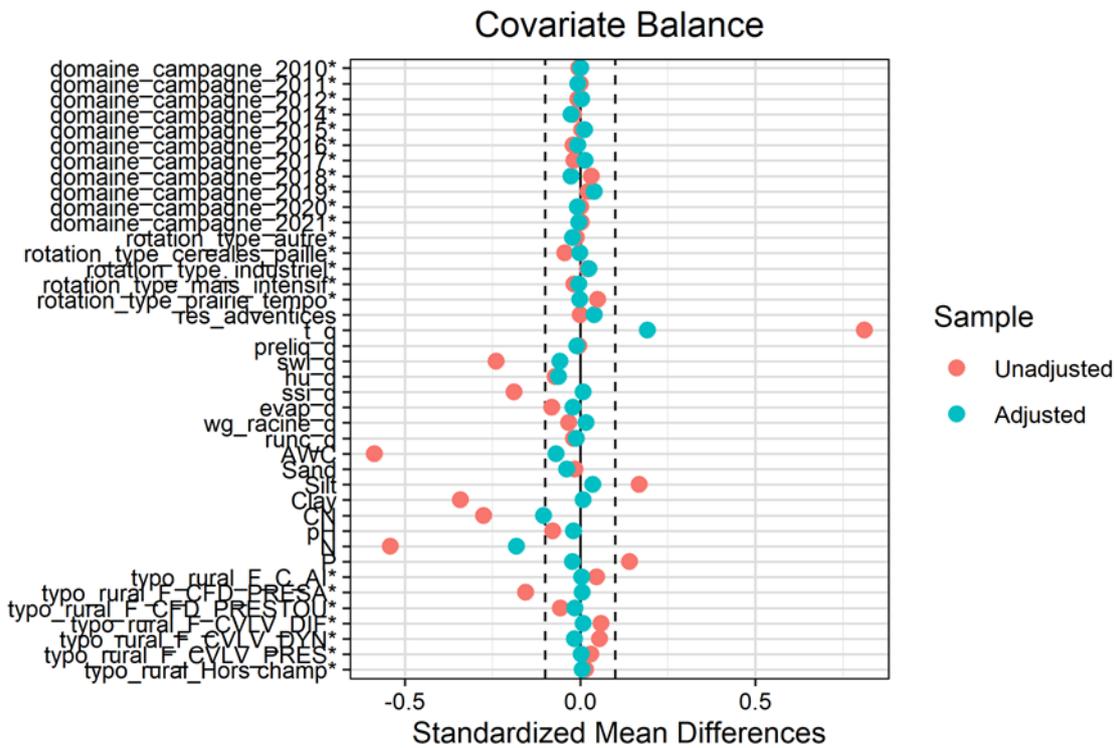


Figure 39 : Equilibre des covariables pour la comparaison entre S-métolachlore et pendiméthaline - maïs fourrage



Sulcotrione

Si elle est plus présente dans DEPHY que la pendiméthaline, la sulcotrione n'est pas non plus aussi largement utilisée que la dmta-P. En conséquence, le niveau de précision des estimations est intermédiaire, supérieur à ce que l'on a pour le maïs grain pour la pendiméthaline, mais inférieur au dmta-P. Le niveau d'équilibre des covariables est également comparable à celui de la pendiméthaline. Le résultat des estimations est donné dans les tableaux [Tableau 50](#) et [Tableau 51](#).

Tableau 50 : Comparaison S-métolachlore - sulcotrione - maïs grain

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
S-métolachlore	389	103,9	2,64	0,25	2,95	1,72	415,49
Sulcotrione	180	94,86	2,77	0,27	2,69	1,52	379,16
ATE		9,03	-0,12	-0,01	0,26	0,2	36,33
Ecart-type		3,95	0,25	0,08	0,12	0,09	20,75
Significativité		*	NS	NS	*	*	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
S-métolachlore	319,46	94,34	111,09	1807,15	1391,66	961,1
Sulcotrione	318,82	99,38	114,96	1693,6	1314,44	880,66
ATE	0,65	-5,04	-3,87	113,55	77,22	80,44
Ecart-type	12,4	5,05	13,87	82,1	76,88	83,29
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note : NS : Non significatif. Pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p -valeur $\leq 0,001$), ** = fortement significatif (p -valeur $\leq 0,01$), * = faiblement significatif (p -valeur $\leq 0,05$).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

Tableau 51 : Comparaison S-métolachlore - sulcotrione - maïs fourrage

	Nombre de parcelles	Rendement (t/ha)	Fréquence de travail au sol hors labour	Fréquence de désherbage mécanique	IFT chimique total	IFT herbicides	Charges opérationnelles (€/ha)
S-métolachlore	200	13,72	2,72	0,21	2,38	1,54	431,54
Sulcotrione	88	13,8	2,65	0,18	2,26	1,37	376,08
ATE		-0,08	0,07	0,03	0,12	0,18	55,46
Ecart-type		0,41	0,36	0,08	0,09	0,09	30,6
Significativité		NS	NS	NS	NS	*	NS

	Charges de mécanisation (€/ha)	Consommation de carburant (l/ha)	Coût de la main d'œuvre tractoriste (€/ha)	Produit brut (€/ha)	Marge brute (€/ha)	Marge directe (€/ha)
S-métolachlore	327,33	109,93	96,01	1825,99	1394,44	971,1
Sulcotrione	309,37	100,26	87,31	1857,78	1481,69	1085,01
ATE	17,96	9,67	8,7	-31,79	-87,25	-113,91
Ecart-type	16,87	6,05	6,18	58,11	64,84	77,82
Significativité	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note : NS : Non significatif. Pour une colonne, le groupe en vert présente une valeur significativement supérieure ; en orange, significativement inférieure. Si aucune différence significative n'existe, la colonne est grisée. Le seuil de significativité retenu est de 5%. Pour la significativité : *** = très fortement significatif (p-valeur ≤ 0,001), ** = fortement significatif (p-valeur ≤ 0,01), * = faiblement significatif (p-valeur ≤ 0,05).

Source : propre élaboration à partir des données issues du réseau DEPHY.

En maïs grain, on constate une différence de rendement significative en faveur des parcelles traitées au S-métolachlore. Des différences d'IFT apparaissent en grain et fourrage, mais l'analyse ne met pas en évidence de surcoût global à l'utilisation de la sulcotrione, avec néanmoins des écart-types élevés, traduisant une mauvaise précision d'estimation. En revanche, comme pour la pendiméthaline, on constate que l'équilibre des covariables n'est pas parfaitement respecté (au regard du seuil de 0,1, tout en respectant le seuil moins restrictif de 0,25 ; voir ci-après), ce qui suggère là aussi des conditions d'utilisation différentes. Plus précisément, on voit que le S-métolachlore est utilisé sur des parcelles généralement plus sableuses, et soumises à une température plus élevée que la sulcotrione, qui se retrouve, elle, dans les parcelles ayant des sols riches en limon et étant dans des conditions plus humides. On peut donc s'attendre à un report partiel sur la sulcotrione en cas d'interdiction du S-métolachlore, notamment en présence de conditions humides.

Figure 40 : Equilibre des covariables pour la comparaison entre S-métolachlore et sulcotrione - maïs grain

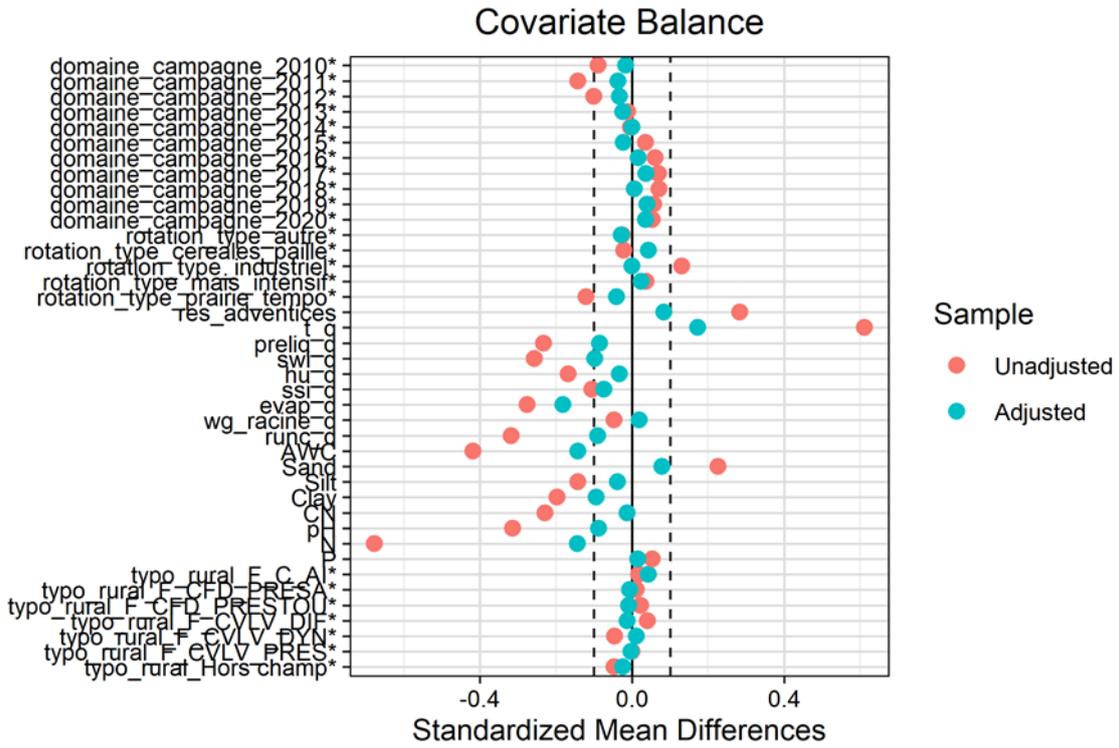
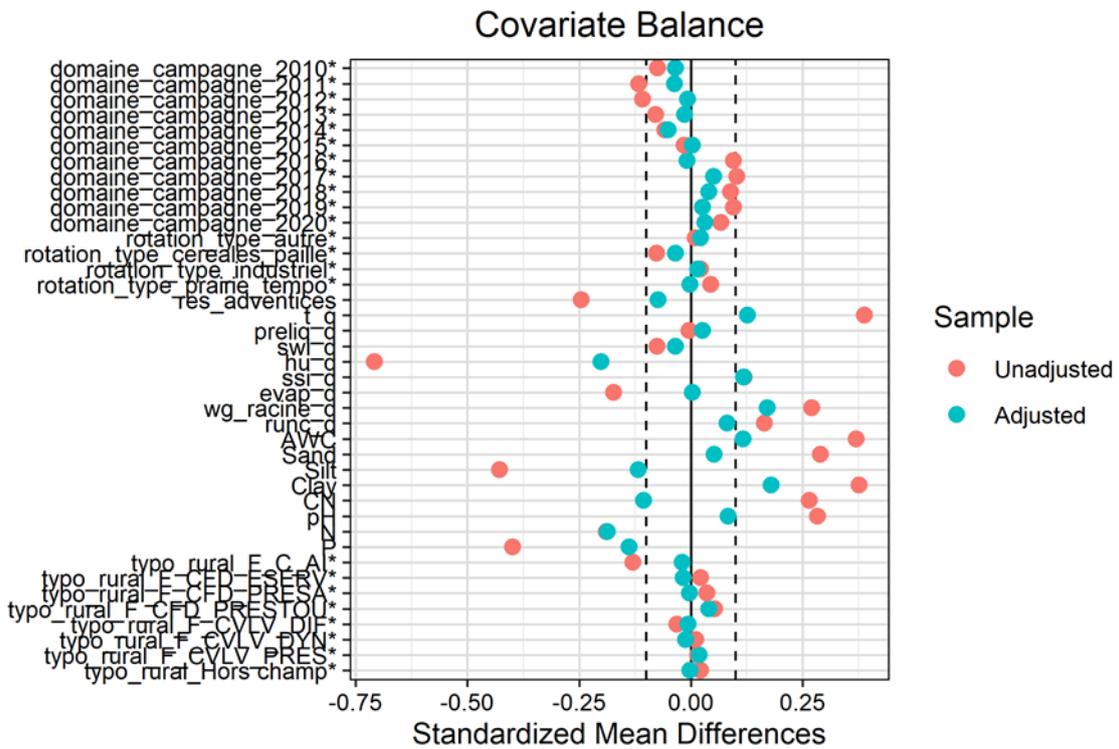


Figure 41 : Equilibre des covariables pour la comparaison entre S-métolachlore et sulcotrione - maïs fourrage



Annexe 12 : Montant de redevance pour pollution diffuse (RPD) et niveaux d’alerte pour la santé humaine et l’environnement des principaux herbicides

Le **Tableau 52** ci-dessous contient, pour une sélection des herbicides les plus utilisés en France en 2020, le montant de redevance pour pollution diffuse (RPD), ainsi qu’un niveau d’alerte sur la santé humaine, le profil écotoxicologique, et le devenir dans l’environnement.

Le montant de la RPD a été obtenu en croisant la liste des substances concernées, par catégorie, issue de l’arrêté du 19 novembre 2021 du Ministère de la Transition Ecologique, aux montants de RPD associés à chaque catégorie définis par l’article L. 213-10-8 du code de l’environnement.

Les niveaux d’alertes sont issus des données de la Pesticide Properties DataBase¹¹⁷ (Lewis *et al.*, 2016), qui attribue à chaque substance active un niveau d’alerte entre faible, modéré et fort, pour la santé humaine, l’écotoxicité, et le devenir de la molécule dans l’environnement. Ce travail d’évaluation du niveau de danger d’une substance chimique ne constitue qu’une première approche simplifiée, et d’autres méthodes plus fines et plus complètes existent, comme le recours aux outils GreenScreen® for Safer Chemicals (Heine et Franjevic, 2013) ou Quick Chemical Assessment Tool (Stone, 2016). Ces outils sont par ailleurs habituellement mobilisés par l’Anses dans ses travaux sur la comparaison des alternatives à certaines molécules (Anses, 2020).

¹¹⁷ <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/>

Tableau 52 : Niveaux d'alerte et montants de RPD des principaux herbicides

Substance	Santé humaine	Ecotoxicité	Diffusion dans l'environnement	Montant Redevance Pollution Diffuse
Propyzamide				11,5
Aclonifen				9
Sulcotrione				9
Mésotrione				9
Isoxaflutole				9
Chlortoluron				9
Métazachlore				9
Pinoxaden				9
Triflusulfuron				9
Foramsulfuron				9
Pendiméthaline				5,5
Triallate				3
Terbuthylazine				3
Diméthachlore				3
S-métolachlore				3
Métamitron				3
Flufénacet				3
Phenmédiophame				3
Ethofumésate				3
Nicosulfuron				3
Quinmércac				3
Prosulfocarbe				3
Diméthénamide-P				3
Napropamide				3
Triclopyr				0,9
2,4-D				0,9
Diflufenican				0,9
Dicamba				0,9

Niveau d'alerte faible
 Niveau d'alerte modéré
 Niveau d'alerte fort

Source : Lewis et al., 2016