Alternatives au prosulfocarbe et étude de leur mobilisation

Xavier Reboud, Benjamin Fayolle, Margot Tysebaert

▶ **To cite this version:**

Xavier Reboud, Benjamin Fayolle, Margot Tysebaert. Alternatives au prosulfocarbe et étude de leur mobilisation. INRAE. 2023, 146 p. hal-04050806

HAL Id: hal-04050806
https://hal.inrae.fr/hal-04050806

Submitted on 2 Oct 2023

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 prosulfocarbe et étude de leur mobilisation

17 MARS 2023

Xavier Reboud
Margot Tysebaert
Benjamin Fayolle

INRAE

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 :

Ce travail n'aurait 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.

Ces remerciements ne les engagent en rien, eux ou leur structure de rattachement, par rapport à ce travail et ses conclusions.

Nous souhaitons remercier particulièrement Jean-Noël Aubertot (INRAE), Maud Blanck (INRAE), Berenger Vuittenez (INRAE), Nicolas Chartier (Idèle, Réseau DEPHY ECOPHYTO), Bruno Chauvel (INRAE), Nathalie Delame (INRAE-AgroParisTech), Christian Huyghe (INRAE), Florence Jacquet (INRAE), Chloé Latapie (INRAE), Fabrice Martin (INRAE), Thibault Peyrard (INRAE) et Lionel Védrine (INRAE).

Nous avons également pu échanger avec un certain nombre d'experts à différentes étapes de ce travail. Nous souhaitons ainsi remercier ici ces personnes, rattachées aux structures suivantes : Anses, équipe Agrosyst d'INRAE, Chambres d'agriculture (Chambre d'agriculture de la Somme, de Normandie, du Nord, du Nord-Pas-de-Calais et des Pays de la Loire), Direction d'Appui aux Politiques Publiques d'INRAE, FNAB, INAO, Ingénieurs du Réseau DEPHY, Ministères, SCIC Douar Den, experts en production de semences, Syngenta et Phyteis, diverses structures (gouvernementales et/ou instituts de recherche) en Belgique et au Danemark, et autres collègues scientifiques.

Pour citer ce document :

Reboud X., Tysebaert M. et Fayolle B. (2023) Alternatives au prosulfocarbe et étude de leur mobilisation. INRAE. 17 mars 2023. 146 p. hal-04050806v2. DOI : 10.17180/brid-jn6o

Table des matières

Table des matières 3
Liste des figures 7
Liste des tableaux 8
Liste des abréviations 9
Résumé exécutif 11
1. Introduction 16
1.1. Commande 16
1.2. Cadre règlementaire 16
1.3. Contexte 17
1.4. L'approche employée 17
1.1.1. Les bases de données mobilisées 17
1.1.2. Revue de littérature et échanges complémentaires 18
1.5. Les grandes étapes de ce rapport 19
2. Caractéristiques du prosulfocarbe et niveau d'utilisation 20
2.1. Caractéristiques du prosulfocarbe 20
2.1.1. Spectre d'action 20
2.1.2. Stades d'application 21
2.1.3. Phytotoxicité 21
2.1.4. Mentions de danger 21
2.1.5. Usages autorisés 21
2.1.6. Produits commerciaux autorisés 22
2.2. Evolution des tonnages de prosulfocarbe 24
2.3. Raisons du recours croissant au prosulfocarbe 26
2.3.1. La montée des résistances de certaines adventices 26
2.3.2. Le retrait de certaines molécules 27
2.3.3. Le durcissement de la règlementation sur d'autres molécules 27
2.3.4. La non tolérance de certaines variétés de blé au chlortoluron 28
2.3.5. La simplification des rotations et l'agrandissement des exploitations agricoles 28
2.3.6. Un coût plus faible que d'autres matières actives 28
2.4. Evaluation du degré de dépendance de l'agriculture au prosulfocarbe 29

2.4.1. Rappel sur la méthodologie développée : indicateur de tension 29
2.4.2. Résultats 31
2.5. Répartition des usages 34
2.5.1. Usages majoritaires 34
2.5.2. Cas des semences 37
3. Eléments de diagnostic de la situation actuelle 39
3.1. Une molécule volatile et sensible à la dérive 39
3.2. Présence et contaminations 39
3.2.1. Présence dans l'air 40
3.2.2. Quantification dans l'eau 40
3.2.3. Présence dans les sols 41
3.2.4. Contaminations de cultures 41
3.3. Changements règlementaires 42
3.3.1. En France 42
3.3.2. Autres pays européens 44
3.4. Des contaminations qui persistent néanmoins 47
3.5. Le cas de la plaine d'Aunis 48
4. Alternatives au prosulfocarbe et impacts technico-économiques de leur mobilisation sur les exploitations agricoles 50
4.1. Méthodologie 50
4.1.1. Objectifs et mobilisation des Enquêtes Pratiques culturales 50
4.1.2. Quatre groupes d'étude 50
4.1.3. Méthodologie des scores de propension 52
4.1.4. Construction d'indicateurs économiques pour les données PK 53
4.1.5. Exemple de lecture des résultats de l'analyse 54
4.2. Alternatives chimiques 55
4.2.1. Groupe 1 vs. Groupe 2 56
4.2.2. Zoom sur quelques alternatives chimiques 62
4.2.3. Synthèse 66
4.3. Alternatives non chimiques 67
4.3.1. Groupe 1 vs. Groupe 4 68
4.3.2. Groupe 1 vs. Groupe 3 72

4.3.3. Synthèse 76
4.4. Analyses de sensibilité 77
4.5. Vers une moindre dépendance au prosulfocarbe 83
4.5.1. Cas des céréales d'hiver 83
4.5.2. Cas des pommes de terre 90
4.5.3. Cas des porte-graines : une situation très tendue 95
5. Scénarios de baisse des doses : quelles options pour la réglementation ? 97
5.1. Scénarios étudiés 97
5.1.1. Scénario A : emploi du prosulfocarbe un an sur deux uniquement 97
5.1.2. Scénario B : généralisation du décalage de la date de semis sur blé d'hiver 99
5.1.3. Scénario C : emploi du prosulfocarbe uniquement sur le rang en pomme de terre 100
5.2. Résultats 101
6. Conclusion et perspectives 103
Bibliographie 112
Annexes 119
Annexe 1 : Saisine 119
Annexe 2 : Comparaison du RPG, de la SAA d'Agreste et des données de l'Agence Bio pour 2021 121
Annexe 3 : Description des facteurs confondants pris en compte pour l'analyse technico-économique 122
Annexe 4 : Respect des hypothèses de modélisation pour l'analyse technico-économique 124
Groupe 1 vs groupe 2 124
Groupe 1 vs groupe 3 129
Groupe 1 vs groupe 4 132
Annexe 5 : Détails de l'analyse technico-économique pour des molécules identifiées comme substituables au prosulfocarbe 135
Flufénacet – Blé tendre 135
Flufénacet – Orge 135
Chlortoluron – Blé tendre 136
Chlortoluron – Orge 136
Pendiméthaline – Blé tendre 137

Pendiméthaline – Orge 137
Pyroxsulame – Blé tendre 138
Métribuzine – Pomme de terre 138
Clomazone – Pomme de terre 139
Aclonifen – Pomme de terre 139
Annexe 6 : Séries chronologiques utilisées pour l'analyse de sensibilité 140
Annexe 7 : Détails des estimations pour le scénario A 142
Résumé 145

Liste des figures

Figure 1 : Evolution des quantites de prosulfocarbe vendues (en tonnes de matiere active) et principaux herbicides interdits de 2008 a 2021 24
Figure 2 : Surfaces des principales cultures pouvant recevoir du prosulfocarbe 25
Figure 3 : Quantites de prosulfocarbe achetees par code postal en 2021 26
Figure 4 : Ratio Qsa/QMC au code postal pour le prosulfocarbe en 2021 31
Figure 5 : Relation entre quantites achetees (Qsa) et quantites achetables (QMC) pour le prosulfocarbe en 2021 32
Figure 6 : Pentes des regressions lineaires pour un ensemble d'herbicides des cereales et de la pomme de terre 33
Figure 7 : Proportion des surfaces traitees au prosulfocarbe par culture, en 2011, 2014 et 2017 36
Figure 8 : Quantites totales extrapolees de prosulfocarbe utilisees par culture en 2011, 2014 et 2017 37
Figure 9 : Evolution des quantites vendues de prosulfocarbe et isoproturon en Belgique de 1995 a 2020 (en tonnes) 45
Figure 10 : Niveau d'utilisation du prosulfocarbe dans les codes postaux de la plaine d'Aunis 49
Figure 11 : Analyse de sensibilite - ble tendre - groupe 1 vs groupe 2 80
Figure 12 : Analyse de sensibilite - ble tendre - groupe 1 vs groupe 3 81
Figure 13 : Analyse de sensibilite - ble tendre - groupe 1 vs groupe 4 82
Figure 14 : Analyse de sensibilite - pomme de terre - groupe 1 vs groupe 2 83
Figure 15 : Baisse des volumes de prosulfocarbe selon differents scenarios reglementaires 101

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : SPECTRE D'ACTION DU PROSULFOCARBE 20
TABLEAU 2 : USAGES PASSES ET ACTUELS DU PROSULFOCARBE 22
TABLEAU 3 : QUANTITES DE PROSULFOCARBE VENDUES EN FRANCE EN 2021 PAR PRODUIT COMMERCIAL 23
TABLEAU 4 : REPARTITION DES USAGES DU PROSULFOCARBE EN 2017 35
TABLEAU 5 : GROUPES UTILISES POUR L'ANALYSE DES ENQUETES PK 51
TABLEAU 6 : EXEMPLE FICTIF DE TABLEAU DE RESULTATS DES ANALYSES TECHNICO-ECONOMIQUES POUR UNE CULTURE DONNEE 54
TABLEAU 7 : CODE COULEUR DE LA CONFIANCE DANS LES EFFETS ESTIMES 55
TABLEAU 8 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 2 EN BLE TENDRE 57
TABLEAU 9 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 2 EN BLE DUR 58
TABLEAU 10 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 2 EN ORGE 59
TABLEAU 11 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 2 EN TRITICALE 60
TABLEAU 12 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 2 EN POMME DE TERRE 61
TABLEAU 13 : SPECTRES D'EFFICACITE DE DIFFERENTES MOLECULES ET ASSOCIATIONS EN CEREALES ET POMME DE TERRE 64
TABLEAU 14 : SYNTHESE DES DIFFERENCES SIGNIFICATIVES POUR LES INDICATEURS TECHNICO-ECONOMIQUES ENTRE LE PROSULFOCARBE ET SES ALTERNATIVES POTENTIELLES 65
TABLEAU 15 : MONTANT DE RPD DES PRINCIPALES ALTERNATIVES CHIMIQUES AU PROSULFOCARBE CIBLEES 67
TABLEAU 16 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 4 EN BLE TENDRE 69
TABLEAU 17 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 4 EN ORGE 70
TABLEAU 18 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 4 EN TRITICALE 71
TABLEAU 19 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 3 EN BLE TENDRE 73
TABLEAU 20 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 3 EN ORGE 74
TABLEAU 21 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE GROUPE 3 EN TRITICALE 75
TABLEAU 22 : VALEURS DES INDICES DE PRIX UTILISES POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITE 79
TABLEAU 23 : LEVIERS POUR UNE MOINDRE DEPENDANCE DES CEREALES D'HIVER AU PROSULFOCARBE ET FREINS ASSOCIES 84
TABLEAU 24 : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DE L'IMPACT DU DECALAGE DE LA DATE DU SEMIS EN CEREALES D'HIVER 89
TABLEAU 25 : DESCRIPTION METEOROLOGIQUES DES AUTOMNES 2014 ET 2017 90
TABLEAU 26 : LEVIERS POUR UNE MOINDRE DEPENDANCE DES POMMES DE TERRE AU PROSULFOCARBE ET FREINS ASSOCIES 92
TABLEAU 27 : SURFACES MOYENNES EXPRIMEES EN HECTARE PAR COUPLE CULTURE-PRECEDENT SUR LES 5 DERNIERES CAMPAGNES DU RPG (I.E. DE 2016/17 A 2020/21) 98
TABLEAU 28 : LISTE DES VALEURS RETENUES POUR LE SCENARIO A 99
TABLEAU 29 : LISTE DES VALEURS RETENUES POUR LE SCENARIO B 100
TABLEAU 30 : EXEMPLES D'ACTIONS POUVANT CONCOURIR A LA REDUCTION DU RECOURS AU PROSULFOCARBE 108
TABLEAU 31 : COMPARAISON DES SURFACES TOTALES EN FRANCE ISSUES DU RPG ET DE LA SAA D'AGRESTE EN 2021 121
TABLEAU 32 : COMPARAISON DES SURFACES EN AB EN FRANCE ISSUES DU RPG AB ET DES DONNEES DE L'AGENCE BIO EN 2021 121

Liste des abréviations

AASQA : Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air

AB : Agriculture Biologique

ACCase : Acetyl CoA Carboxylase

ACTA : Association de coordination technique agricole

Agreste : marque des publications du SSP

ALS : Aceto-Lactate Synthase

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

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

ATE : *Average Treatment Effect*

BNVD : Banque Nationale des Ventes des Distributeurs de produits phytopharmaceutiques

CASD : Centre d'Accès Sécurisé aux Données

CEPP : Certificats d'Economie de Produits Phytopharmaceutiques

Ctifl : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

DFF : Diflufénican

DGAL : Direction Générale de l'Alimentation

ECHA : Agence Européenne des Produits Chimiques

EDCH : Eaux à Destination de la Consommation Humaine

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

ESDAC : *European Soil Data Centre*

ETA : Entreprise de Travaux Agricoles

FNAB : Fédération Nationale d'Agriculture Biologique

HRAC : *Herbicide Resistance Action Committee*

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements

INAO : Institut National de l'Origine et de la qualité

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

INSEE : Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques

IPPAP : Indice mensuel des prix agricoles à la production

IPAMPA : Indice des prix d'achat des moyens de production agricole

ITEIPMAI : Institut technique interprofessionnel des plantes à parfum, médicinales et aromatiques

JOUE : Journal Officiel de l'Union Européenne

LMR : Limite Maximale de Résidus

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

MTE : Ministère de la Transition Ecologique

ODR : Observatoire du Développement Rural

PAC : Politique Agricole Commune

PK : Pratiques culturales (pour 'Enquête PK')

QMC : Quantité Maximale Consommable

R&D : Recherche et Développement

RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole

RPD : Redevance Pollution Diffuse

RPG : Registre Parcellaire Graphique

RSE : Responsabilité Sociétale des Entreprises

SA : Substance Active

SAA : Statistique Agricole Annuelle

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

SAU : Surface Agricole Utilisée

SI : Système d'Information

SSP : Service de la Statistique et de la Prospective (du MASA)

UE : Union Européenne

Résumé exécutif

En France, en 2021, le prosulfocarbe est la troisième substance active la plus vendue dans le pays (en kilogrammes de matière active) et le deuxième herbicide après le glyphosate. Cet herbicide racinaire est employé de la prélevée à la post-levée précoce des adventices ; majoritairement en automne sur céréales d'hiver et au printemps sur pomme de terre. Il est apprécié pour son efficacité sur un certain nombre de graminées telles que les ray-grass, pâturins, agrostis, vulpie et quelques dicotylédones telles que géraniums, stellaires, véroniques. Si la règlementation concernant le glyphosate devait évoluer dans un avenir proche, le prosulfocarbe pourrait devenir la première matière active herbicide utilisée en France.

En 2021, 6 522 tonnes de prosulfocarbe ont été vendues en France. Le recours au prosulfocarbe est croissant ces dernières années ; les tonnages ont été multipliés par six depuis 2010 et les quantités vendues ont augmenté d'environ 800 tonnes entre 2020 et 2021. Pourtant, ces dernières années, les surfaces cultivées avec des cultures pouvant être traitées au prosulfocarbe restent assez stables. Ce recours croissant s'explique notamment par (i) la montée de résistances de certaines adventices comme les ray-grass à d'autres familles d'herbicides telles que les inhibiteurs de l'ALS et de l'ACCase, (ii) le retrait de certaines molécules telles que l'isoproturon en 2016/17, (iii) le durcissement des conditions d'utilisation d'autres molécules telles que le chlortoluron, (iv) la poursuite de la simplification des rotations et l'agrandissement des exploitations agricoles avec moins de recours au labour, (v) un coût attractif des produits à base de prosulfocarbe relativement à d'autres matières actives.

Le recours au prosulfocarbe en France est plus systématique que pour nombre d'autres herbicides. Dans le cadre de cette étude, nous avons développé un indicateur illustrant le niveau de dépendance de l'agriculture à une substance active. Nous l'avons calculé pour une trentaine d'herbicides utilisables en céréales et/ou en pomme de terre. Avec une valeur de 0,44, le prosulfocarbe est le quatrième herbicide avec le score le plus élevé. L'agriculture française présente ainsi un niveau de dépendance au prosulfocarbe très supérieur aux principaux herbicides utilisés pour des cultures similaires.

En 2017, environ 70% des volumes de prosulfocarbe étaient employés sur céréales d'hiver. 25% des surfaces cultivées en blé tendre étaient traitées au prosulfocarbe ; aujourd'hui certains experts estiment qu'environ la moitié des surfaces cultivées en blé tendre en reçoivent. Cette même année, deux tiers des surfaces cultivées en pomme de terre étaient traitées au prosulfocarbe, ce qui représentait alors environ 5% des volumes de prosulfocarbe utilisés dans le pays**. En dehors des grandes cultures, la production de semences concerne de petites surfaces et de petits volumes de prosulfocarbe. Néanmoins, ces cultures sont aujourd'hui très dépendantes de cet herbicide.** Cela est notamment lié aux cahiers des charges particulièrement contraignants qui imposent l'utilisation de cet herbicide pour assurer un haut niveau de pureté des récoltes.

Les quantités utilisées et la sensibilité du prosulfocarbe à la dérive et à la volatilisation entrainent des pollutions de différents compartiments environnementaux tels que l'air et les eaux de surface ainsi que des contaminations de cultures qui doivent être déclassées ou détruites, qu'elles soient biologiques ou conventionnelles. L'Anses (2017) fait état de ce type de contaminations : (i) la DGAL (Direction Générale de l'Alimentation) détecte depuis 2013 la présence de prosulfocarbe sur des cultures sans usages autorisés de produits à base de prosulfocarbe, (ii) de 2008 à 2013, le prosulfocarbe fait partie des 20 molécules les plus détectées dans l'air ambiant lors des campagnes des AASQA, et (iii)

de 2007 à 2015, le prosulfocarbe présente des niveaux de quantification assez élevés au niveau national dans les eaux de surface.

Ces évènements ont conduit à des modifications des AMM des produits à base de prosulfocarbe en France en 2017 puis de nouveau en 2018. En 2017, il devient obligatoire de recourir à du matériel de pulvérisation homologué pour limiter la dérive. En 2018, s'ajoute l'obligation d'attendre la récolte d'un certain nombre de cultures non cibles[1] présentes dans un rayon de 1 km des parcelles à traiter au prosulfocarbe avant l'application de ce dernier. Cette distance est réduite à 500 m en cas d'impossibilité de report du traitement selon certaines conditions : le produit doit alors être appliqué le matin avant 9 heures ou le soir après 18 heures, en conditions de température faible et d'hygrométrie élevée. On notera le caractère exceptionnel de cette situation qui conduit à ce que la possibilité d'utiliser un produit soit conditionnée aux actions d'autres personnes et pas seulement à l'adéquation aux conditions d'applications. Par ailleurs, Syngenta, propriétaire d'un certain nombre d'AMM à base de prosulfocarbe, propose aux agriculteurs d'utiliser gratuitement son outil Quali'Cible pour les aider à savoir si leur parcelle peut être traitée au prosulfocarbe au vu des cultures avoisinantes. Si cet outil semble préconisé par les conseillers sur le terrain, nous n'avons pas réussi à obtenir d'information quant à son niveau d'utilisation et de suivi des préconisations. Par ailleurs, s'il semble aisé d'y inclure des cultures pérennes telles que des vergers, l'ajout de cultures annuelles semblent plus compliqué. D'autres pays européens ont aussi récemment modifié les conditions d'utilisation des produits à base de prosulfocarbe ; c'est notamment le cas de la Belgique courant 2021.

Malgré ces durcissements règlementaires, de nouvelles contaminations ont été observées. Le recours au prosulfocarbe étant croissant, ces contaminations risquent de perdurer, voire d'augmenter. On peut donc se demander si ces nouvelles règles sont suffisamment strictes pour stopper les contaminations et si les contrôles permettent *a minima* de les freiner. A titre d'exemple, les récoltes 2020 de sarrasin biologique de 14 producteurs de la coopérative Biocer ont dû être détruites ; cela représente les deux tiers des récoltes de sarrasin de la coopérative cette année-ci et les pertes économiques sont chiffrées à 80 000€. Un problème majeur réside dans l'impossibilité de certifier l'origine des contaminations ; ainsi, les agriculteurs concernés par ces pertes ne sont pas indemnisés. Ces phénomènes concernent aussi les cultures conventionnelles qui sont également souvent détruites en cas de détection de prosulfocarbe car la LMR, qui est proche du seuil de détection, est alors souvent dépassée.

Par ailleurs, Atmo Nouvelle-Aquitaine révèle en juillet 2022 que le prosulfocarbe a atteint en 2021 des niveaux jamais observés précédemment en France dans l'air au niveau de la Plaine d'Aunis (Charente-Maritime). Rappelons qu'il n'existe pas à ce jour en France de seuil réglementaire sur la contamination en pesticides dans l'air. La concentration constatée de prosulfocarbe dans l'air en France semble avoir augmenté depuis 2019. Dans la plaine d'Aunis, sa concentration moyenne hebdomadaire a atteint 20 ng/m^3 en 2021, ce qui est 7 fois plus élevé que sur les autres sites en grandes cultures de la région ayant fait l'objet de mesures. En termes de volumes de prosulfocarbe employés par code postal dans cette région, la plaine d'Aunis ne fait pas partie des régions les plus « consommatrices ». Le ratio décrivant le niveau de dépendance de l'agriculture de la région à cette

[1] Cultures fruitières : pommes, poires ; cultures légumières : mâche, épinard, cresson des fontaines, roquette, jeunes pousses ; cultures aromatiques : aneth, cerfeuil, coriandre, livèche, menthe, persil et thym ; cultures médicinales : artichaut, bardane, cassis (bourgeons), cardon, chicorée, mélisse, piloselle, radis noir et sauge officinale ; cultures à graines : chia, quinoa, sarrasin.

molécule n'apparaît pas non plus comme le plus élevé : environ un tiers du territoire français est plus en tension. Ainsi, il existe probablement d'autres situations comparables à celle de la plaine d'Aunis en France. Le Sénat rapporte l'avis de l'Anses du 22 juillet 2022 selon lequel l'inhalation d'air ambiant contenant 274 ng/m^3 de prosulfocarbe ne constitue pas une alerte au titre de la pharmacovigilance[2] (Sénat, 2022). Le MASA a néanmoins demandé à l'Anses de vérifier que l'exposition des habitants à proximité des zones traitées ne conduisait pas à des risques pour leur santé ; au moment de la publication de ce rapport, la réponse de l'Anses n'a pas encore été publiée. Par ailleurs, il n'est pas dans nos missions de (i) faire état des impacts potentiels du prosulfocarbe sur la santé humaine, au-delà de constater les phrases de risque associées aux AMM, ni de (ii) discuter de tous les facteurs qui pourraient éventuellement moduler les effets potentiels du prosulfocarbe sur l'environnement, la santé, etc. [3]

C'est sur cette base que nous avons engagé notre travail pour i) recenser des alternatives chimiques et non chimiques au prosulfocarbe, 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. 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 prosulfocarbe. Ces analyses ont été menées sur les données des Enquêtes Pratiques Culturales (dites « PK ») Grandes cultures 2017. Une méthodologie a été développée dans le cadre de cette étude afin, à partir des données techniques présentes dans ces enquêtes, de reconstituer une estimation des résultats économiques associés (Fayolle *et al.*, 2023). Ces résultats pourront être comparés ultérieurement à ceux obtenus sur les nouvelles données de ces enquêtes qui portent sur la campagne 2021 et dont la publication est prévue au second semestre 2023. **La mobilisation des alternatives chimiques identifiées n'implique pas de variation de marge directe par unité de surface à l'échelle de la parcelle, que ce soit pour les céréales d'hiver comme pour les pommes de terre. Une potentielle interdiction du prosulfocarbe se traduirait probablement par un report d'utilisation sur un nombre restreint de molécules.** En céréales, il s'agit notamment du flufénacet et ses associations avec le diflufénican, la pendiméthaline, ou encore l'aclonifen en blé tendre. Des associations entre pendiméthaline et diflufénican sont également à anticiper ; le chlortoluron en sol non drainé. En pomme de terre, la métribuzine et ses associations pourraient apparaître comme solutions ; or l'avenir de cette molécule est incertain puisqu'elle est candidate à la substitution. Sa période d'approbation à l'échelle européenne court jusqu'au 31 juillet 2023. Le métobromuron, le rimsulfuron et la clomazone pourraient absorber une partie du report en fonction du degré d'infestation en graminées et du statut de possible résistance aux inhibiteurs de l'ALS (rimsulfuron). La métribuzine, la pendiméthaline, le chlortoluron, le flufénacet, le diflufénican et l'aclonifen sont candidates à la substitution et leur avenir reste donc incertain. Enfin, le diflufénican et

[2] Selon la réponse du Sénat, cette valeur correspond à la plus haute valeur mesurée dans la plaine d'Aunis ; il conduit à une exposition à 1,05% de la valeur toxicologique de référence du prosulfocarbe.

[3] Par exemple : les conditions climatiques de la plaine d'Aunis jouent-t-elle un rôle sur la manière dont la molécule se comporte dans cette région ?

le flufénacet sont déjà en situation de forte tension sur le territoire national en étant respectivement premier et troisième dans le classement des molécules des céréales d'hiver et de la pomme de terre les plus en tension, devant le prosulfocarbe.

En ce qui concerne les alternatives non chimiques, deux comparaisons sont possibles. La première implique de comparer des systèmes conventionnels utilisant du prosulfocarbe à des systèmes en AB. La seconde implique de comparer des systèmes utilisant du prosulfocarbe à des systèmes n'utilisant aucun herbicide de synthèse mais n'étant pas nécessairement en AB puisque pouvant recourir à d'autres pesticides (fongicides et/ou insecticides) et à la fertilisation minérale. Dans le premier cas, les systèmes de culture comparés ont des logiques très différentes. Pour les céréales conduites en AB, les pertes de rendements, de 35 à 50% selon les cultures, sont totalement ou partiellement compensées *via* deux mécanismes : (i) la baisse des charges opérationnelles et (ii) les prix supérieurs en AB. Cette différence de prix est particulièrement marquée en blé tendre, pour lequel la perte de rendement est alors compensée. **Ainsi, l'analyse menée sur les données des Enquêtes PK 2017 n'identifie pas de variation de marge directe par unité de surface à l'échelle de la parcelle pour le blé tendre. En orge et triticale, cette marge est sensiblement plus faible en AB qu'en conventionnel mobilisant du prosulfocarbe.** Dans le second cas, les pertes de rendement, entre 10 et 20% selon les cultures, sont compensées par une réduction générale des charges : baisse des charges opérationnelles de 20 à 40% selon les cultures et baisse des charges de mécanisation jusqu'à 15% selon les cultures. **Ainsi, l'analyse menée sur les données des Enquêtes PK 2017 n'identifie pas de variation de marge directe par unité de surface à l'échelle de la parcelle pour le blé tendre et l'orge ; elle est inférieure d'environ 80 €/ha pour le triticale.**

Si la poursuite du développement de l'AB jusqu'à 25% de la SAU d'ici 2030 selon le calendrier du Green Deal doit concourir à diminuer la dépendance au prosulfocarbe, la mobilisation d'un ensemble de leviers agronomiques doit pouvoir également y contribuer. En céréales d'hiver, il s'agit notamment de l'allongement et la diversification des rotations, du recours à des variétés plus adaptées, des associations d'espèces cultivées, de la gestion des menues-pailles, de semis dans un couvert vivant, de faux-semis, d'écimage, de désherbage mécanique impliquant éventuellement un écartement plus large, ou encore d'un retard de semis de 15 jours. En blé tendre, un tel décalage s'accompagne d'une baisse d'IFT de 10 à 20% et d'une baisse des doses moyennes de prosulfocarbe de l'ordre de 600 à 800 g/ha, soit 25 à 40%. De plus, il permet de réduire les contaminations de cultures avoisinantes qui seraient récoltées avant utilisation de l'herbicide. Néanmoins, ce décalage s'accompagne également d'une baisse de rendement de 4 q/ha, soit une baisse entre 5 et 10%, et une baisse de marge directe par unité de surface à l'échelle de la parcelle de 70 à 80 €/ha. En pomme de terre, le désherbage 100% mécanique peut être envisagé ainsi qu'une combinaison de chimie localisée sur le rang à un désherbage mécanique en inter-buttes. Le désherbage mécanique peut aussi être envisagé en rattrapage d'un désherbage chimique en prélevée. **Des freins à la mobilisation de ces différents leviers existent néanmoins.** Il peut notamment s'agir d'un manque d'attractivité et de débouchés pour les cultures de diversification, de conditions pédoclimatiques limitant les plages de certaines interventions dans les parcelles, des impacts négatifs sur les rendements, des débits de chantiers plus lents ou encore la nécessité de recourir à du matériel coûteux. **Des solutions existent et impliquent l'ensemble de maillons des filières au-delà des seuls agriculteurs.** Il s'agit par exemple d'impliquer la recherche afin de produire de nouvelles références sur certaines alternatives envisagées, des coopératives afin de commercialiser les variétés couvrantes et adaptées à des semis tardifs et d'assurer des débouchés et du conseil technique aux agriculteurs diversifiant leur rotation

ou cherchant un accompagnement dans la conduite de cultures en association, les constructeurs de matériels agricoles afin de développer et rendre accessibles des outils, etc.

Nous avons exploré trois scénarios réglementaires hypothétiques : (i) limitation de l'usage du prosulfocarbe à une campagne sur deux en céréales d'hiver et pomme de terre, (ii) décalage de 15 jours de la date de semis en blé d'hiver et (iii) recours à la chimie uniquement sur le rang en pomme de terre. La combinaison de ces trois scénarios fait baisser les quantités de prosulfocarbe employés à l'échelle française d'au maximum 1 870 tonnes, soit moins de 30% des quantités de 2021. Cela ramènerait les volumes de prosulfocarbe proches de leur niveau de 2017, quand les buses antidérive ont été imposées. **Par ailleurs, cela ne permet pas de répondre aux objectifs du Pacte Vert qui vise une baisse de 50% de l'utilisation des produits phytosanitaires à l'horizon 2030.**

Pour conclure, la réalisation de cette étude nous a conduit à identifier quelques limites (i) relatives au cas du prosulfocarbe et (ii) de portée plus générale.

Nous avons notamment fait face à l'absence de base de données regroupant à la fois des indicateurs techniques et économiques. Le réseau DEPHY donne accès à ces deux types d'indicateurs ; nous avons néanmoins souhaité mobiliser plutôt les Enquêtes Pratiques culturales, plus représentatives de la Ferme France, quitte à reconstituer une estimation des indicateurs économiques. Nous avons travaillé sur la seule année 2017 et il s'avèrerait sans doute pertinent (i) de disposer de plusieurs années afin de limiter les effets d'une année donnée et, à défaut, (ii) de confronter les résultats de 2017 à ceux issus de l'Enquête 2021 qui devraient être publiés courant 2023. De plus, ces enquêtes ne permettent pas d'avoir accès aux aides touchées par les agriculteurs (PAC ou autres) ou encore au type de flore et au niveau réel d'infestation des parcelles.

Par ailleurs, le cadre de l'évaluation comparative est plutôt pensé pour analyser la substitution entre des alternatives très similaires. Ainsi, elle semble plus adaptée à la réflexion sur des alternatives chimiques qu'aux alternatives non chimiques qui imposent souvent une reconception du système plus profonde avec des implications sur le modèle d'exploitation et donc une analyse à une échelle plus large que celle de la parcelle.

De plus, l'évaluation comparative est très agriculteur-centrée ; elle ne prend pas directement en compte le rôle majeur que peut avoir l'ensemble des maillons de la filière, voire des filières. Pourtant, la moindre dépendance de l'agriculture à la chimie nécessitera de mobiliser un ensemble de leviers préventifs. Ces derniers font aujourd'hui face à un certain nombre de freins qui pourront être levés à conditions que l'ensemble des acteurs des filières s'implique également dans cette transition.

Enfin, il nous semble pertinent de mener une réflexion plus large que celle imposée par le Règlement (CE) N° 1107/2009 qui consiste à étudier les molécules indépendamment les unes des autres.

1.Introduction

1.1. Commande

Ce travail fait suite à l'étude menée au sein d'INRAE sur le S-métolachlore et ses alternatives (Reboud *et al.*, 2022). Il s'insère dans la même commande en provenance du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, du ministère de la Transition écologique et du ministère des Solidarités et de la Santé (voir ***Annexe 1***). Cette sollicitation a pour objectif, sur la base d'une méthodologie consolidée et à partir de bases de données existantes, 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.
Le présent rapport traite du prosulfocarbe, troisième substance active la plus achetée en France (en kilogrammes de matière active) et deuxième herbicide après le glyphosate (BNVD Traçabilité, 2023). Il aborde les principaux usages du prosulfocarbe 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.
Un certain nombre de méthodologies ont été développées et déployées dans le cadre du rapport sur le S-métolachlore cité précédemment ; nous y ferons régulièrement référence et invitons le lecteur à s'y reporter autant que nécessaire.

1.2. Cadre règlementaire

De la même manière que pour le S-métolachlore (Reboud *et al.*, 2022), ce travail a pour objectif d'identifier et produire des éléments mobilisables dans le cadre d'une évaluation comparative sur le prosulfocarbe. D'un point de vue réglementaire, c'est le règlement (CE) N°1107/2009 (JOUE, 2009) qui cadre l'évaluation comparative, et en particulier son article 50.

Ce dernier indique que « 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 (i) qu'une alternative chimique ou non chimique existe déjà et soit « sensiblement plus sûr[e] pour la santé humaine ou animale ou l'environnement », (ii) que cette alternative « ne présente pas d'inconvénients économiques ou pratiques majeurs », (iii) que la diversité des solution existantes « [réduise] autant que possible l'apparition d'une résistance dans l'organisme cible » et (iv) que « les conséquences sur les autorisations pour des utilisations mineures [soient] prises en compte ». L'article 50.2 de ce règlement autorise ces dispositions dans le cas d'un produit phytosanitaire ne contenant aucune substance candidate à la substitution ; il est alors nécessaire « [qu']il existe une méthode non chimique de prévention ou de lutte pour la même utilisation et [qu'elle soit] d'usage courant dans cet État Membre ». C'est dans ce cadre que se place l'étude des alternatives au prosulfocarbe puisque cette substance active n'est pas à ce jour candidate à la substitution.

Le prosulfocarbe est actuellement approuvé à l'échelle de l'UE jusqu'au 31 octobre 2023 et il n'existe à notre connaissance pas d'information permettant d'anticiper sa réapprobation ou non après cette date.

1.3. Contexte

Avec 6 522 tonnes vendues en 2021, le prosulfocarbe est le deuxième herbicide le plus utilisé en France après le glyphosate. Herbicide racinaire, il est principalement employé pour son efficacité sur les stades précoces de levée de différentes graminées adventices, notamment certaines graminées peu sensibles aux substances actives à pénétration foliaire ou résistantes à d'autres familles de molécules. Le prosulfocarbe se montre aussi efficace sur certaines dicotylédones annuelles. Il est principalement utilisé sur céréales d'hiver à l'automne et pomme de terre au printemps ; il constitue une molécule centrale d'un grand nombre de programmes de désherbage pour ces cultures. Sensible à la dérive et volatil, plusieurs études font état de sa présence dans l'air ambiant, sur des cultures pour lesquelles il n'est pas autorisé, et dans les eaux de surface. Nous reviendrons plus loin sur ces éléments ; l'Anses en fait notamment état dans sa note de 2017 relative à la contamination de certaines cultures par le prosulfocarbe (Anses, 2017).

1.4. L'approche employée

1.1.1. Les bases de données mobilisées

Tout comme l'étude que nous avons menée sur le S-métolachlore, ce travail sur le prosulfocarbe repose sur un ensemble de bases de données :

- La Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques par les Distributeurs (BNVD)[4] ;
- Le catalogue en ligne des produits phytopharmaceutiques tenu par l'Anses (E-Phy)[5] ;
- Le Registre Parcellaire Graphique (RPG)[6] recensant l'occupation des sols en France, ainsi que son équivalent pour l'agriculture biologique (produit par l'Agence Bio[7]) ;

[4] Données disponibles sur le site « BNVD Traçabilité » ici : https://ventes-produits-phytopharmaceutiques.eaufrance.fr/search

[5] 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-adjuvants-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 30 novembre 2022 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.

[6] Données disponibles ici : https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-culturaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/

[7] Données disponibles ici : https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/parcelles-en-agriculture-biologique-ab-declarees-a-la-pac/

- Les Enquêtes « Pratiques culturales et Pratiques phytosanitaires » du Service de la statistique et de la prospective (SSP) du MASA pour lesquelles nous avons reçu une autorisation du comité du secret statistique dans le cadre de ce projet de recherche ;
- Les enquêtes du réseau DEPHY du plan Ecophyto ont également été mobilisées suite à une sollicitation du Comité des partenaires d'Agrosyst, système d'information du Réseau DEPHY, puis validation d'accès par cette instance ;
- Les données climatiques issues du modèle SAFRAN qui proviennent de Météo-France[8] et ont été téléchargées *via* la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE ;
- Les données de l'European Soil Data Center (ESDAC) sur la composition physique[9] et chimique[10] des sols pour lesquelles nous avons dû faire une demande spécifique d'accès ;
- Les données relatives à la typologie des espaces ruraux et des espaces à enjeux spécifiques[11] tel que mis à disposition sur l'entrepôt de données correspondant.
- Les données par substance à l'échelle européenne issues de la EU Pesticide Database[12]

1.1.2. Revue de littérature et échanges complémentaires

En complément du travail réalisé sur les bases de données, un travail bibliographique (littérature scientifique et littérature grise) a été réalisé et divers échanges ont été organisés.
Un comité de pilotage a eu lieu le 20 février 2023 en présence du ministère de la Transition écologique, du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, du ministère des Solidarités et de la Santé, de l'Anses et de collègues scientifiques à INRAE. Cet échange a permis de présenter les résultats des travaux aux commanditaires et cibler des ajustements à réaliser avant publication.
Nous avons également eu des échanges, écrits ou oraux, avec des personnes des structures suivantes : des coopératives biologiques (notamment SCIC Douar Den), la FNAB, l'INAO, des chambres d'agriculture (Chambre d'agriculture de la Somme, de Normandie, du Nord, du Nord-Pas-de-Calais et des Pays de la Loire), des ingénieurs du réseau DEPHY en céréales d'hiver et pomme de terre et des experts en production de semences. Nous avons également échangé avec Syngenta qui détient plusieurs AMM de produits à base de prosulfocarbe et qui propose un outil à destination des agriculteurs afin de les accompagner dans la gestion de l'utilisation de ces produits ; nous reviendrons sur ces éléments en partie ***3.3.1***. Enfin, nous avons échangé avec diverses instances (gouvernementales et/ou instituts de recherches) en Belgique et au Danemark afin de mieux comprendre les changements récents de réglementation relatifs aux produits à base de prosulfocarbe dans leurs pays respectifs, les raisons pour lesquelles ces changements ont eu lieu et si des impacts sont aujourd'hui mesurables notamment en termes de contaminations.
Nous remercions l'ensemble des personnes avec qui nous avons pu échanger et rappelons ici que ces remerciements ne les engagent en rien, eux ou leur structure de rattachement, par rapport à ce travail et ses conclusions.

[8] https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article788
[9] https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data#tabs-0-description=0
[10] https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/chemical-properties-european-scale-based-lucas-topsoil-data
[11] Données disponibles ici : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/KEF0YW
[12] https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en

1.5. Les grandes étapes de ce rapport

Le présent rapport se déroule en 6 parties dont une introduction (partie ***1***) et une conclusion (partie ***6***).

La partie ***2*** est consacrée aux caractéristiques du prosulfocarbe, à l'historique de son utilisation, ses usages actuels, les tonnages employés et la dépendance de l'agriculture française à cet herbicide.

La partie ***3*** est consacrée aux contaminations au prosulfocarbe constatées en France ces dernières années. Elle présente ensuite les changements règlementaires récents motivés par ces contaminations en France ; le cas de la Belgique est également abordé.

La partie ***4*** est consacrée aux alternatives chimiques et non chimiques au prosulfocarbe. Les analyses économiques proposées dans cette partie se basent principalement sur les données des Enquêtes Pratiques culturales Grandes Cultures 2017. Ces enquêtes fournissent des indicateurs techniques relatifs aux pratiques des exploitations agricoles enquêtées. Une méthodologie a été développée afin de reconstruire des indicateurs économiques à partir de ces données techniques. Nous renvoyons le lecteur à la note méthodologique (Fayolle *et al*., 2023)[13].

La partie ***5*** est consacrée à des scénarios relatifs à des modifications des conditions d'emploi de produits à base de prosulfocarbe. Nous étudions l'impact sur les tonnages français de trois scénarios : (i) une autorisation d'employer le prosulfocarbe seulement une année sur deux en céréales d'hiver et pomme de terre, (ii) un décalage des dates de semis des céréales d'hiver traitées au prosulfocarbe, et (iii) un désherbage chimique ciblé sur la butte, associé à un désherbage mécanique en inter-buttes en pomme de terre.

[13] https://hal.inrae.fr/hal-04050101

2. Caractéristiques du prosulfocarbe et niveau d'utilisation

Le prosulfocarbe est un herbicide de la famille des thiocarbamates[14] à action principalement racinaire de prélevée ou post-levée précoce. Il est employé majoritairement sur céréales d'hiver à l'automne et pomme de terre au printemps. Il agit en inhibant le processus de synthèse des lipides (Ineris, 2014). Il est classé dans le groupe 15 de la nomenclature HRAC[15]. Il cible les stades jeunes de germination des adventices et son efficacité décroit dès que ces dernières sont développées.

2.1. Caractéristiques du prosulfocarbe

2.1.1. Spectre d'action

Le prosulfocarbe est apprécié pour son efficacité sur graminées (ray-grass, vulpins, pâturins, agrostis, vulpie, etc.) et quelques dicotylédones (gaillet gratteron, géraniums, stellaire, véroniques, etc.), essentiellement des plantes annuelles (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2022). Il est plus particulièrement apprécié pour son efficacité sur ray-grass et, dans une moindre mesure, vulpins ; ces adventices connaissent depuis plusieurs années une montée des résistances vis-à-vis d'autres herbicides tels que les inhibiteurs de l'ACCase et les inhibiteurs de l'ALS (Délye et al., 2021). En cultures conventionnelles, le prosulfocarbe est un pilier des programmes de désherbage notamment en blé tendre et pomme de terre.

Le ***Tableau 1*** présente le spectre d'action du prosulfocarbe. Il intègre des adventices plutôt présentes en céréales d'hiver ainsi que des adventices plus présentes en culture de pomme de terre.

Tableau 1 : Spectre d'action du prosulfocarbe

Graminées				Dicotylédones															
Agrostis	Pâturin annuel	Ray-grass	Vulpin	Géraniums	Stellaire	Véroniques	Capselle	Morelle noire	Gaillet	Séneçon	Fumeterre	Pensées	Mercuriale annuelle	Bleuet	Coquelicots	Matricaires	Chardons	Liserons	Sanve	Matricaires	Datura

Source : Propre élaboration à partir de données de la Chambre d'Agriculture d'Alsace (2022) et de Mamarot et Rodriguez (2003).

Note : Les données de 2003 sont en train d'être mises à jour afin de disposer de spectres plus récents.

[14] Dans la nouvelle nomenclature HRAC, le prosulfocarbe se retrouve dans le groupe 15 regroupant les anciens K3 et N, avec le flufénacet et le triallate, deux autres herbicides utilisés en céréales.

[15] https://hracglobal.com/tools/2020-review-of-the-herbicide-moa-classification

2.1.2. Stades d'application

Le prosulfocarbe est employé en prélevée des adventices (stade où il est le plus efficace) jusqu'à la post-levée précoce de ces dernières si les conditions pédoclimatiques le permettent (1 à 2 feuilles). Le traitement peut être décalé au stade 2-3 feuilles des adventices, mais l'efficacité du traitement risque alors de diminuer (Perriot *et al.*, 2021). Un décalage dans le temps du traitement au prosulfocarbe peut toutefois être rendu nécessaire pour éviter de contaminer les récoltes voisines comme le préconise la règlementation en vigueur depuis 2018 (voir partie ***3.3.1***) ; il peut éventuellement s'accompagner d'un décalage de date de semis pour certaines cultures (voir partie ***4.5.1.3***). Entre trop tôt ou trop tard, la perspective de son utilisation peut alors conduire à devoir faire un compromis.

2.1.3. Phytotoxicité

Le prosulfocarbe a une sélectivité de position, tout comme la pendiméthaline et le flufénacet. Pour limiter ces phénomènes, il est important de soigner la qualité du lit de semence et positionner la graine de la culture à plus de deux centimètres de profondeur (Bilcot *et al.*, 2021).
Arvalis fait également état de sélectivité par détoxification pour le prosulfocarbe, tout comme pour le flufénacet et les urées substituées (Arvalis, 2016). Les phytotoxicités sont majoritairement dues aux conditions climatiques. Par exemple, de fortes pluies survenant juste après l'application du produit favorisent la mise en contact entre le produit et les graines. La nature du sol joue également un rôle : des sols légers, sableux ou battants risquent également de favoriser la mise en contact. Il est également déconseillé d'appliquer du prosulfocarbe en cas de fortes amplitudes thermiques ou de gel dans la semaine qui suit son application ; il en va de même pour l'application de chlortoluron. En effet, leur application augmente la sensibilité de la culture au gel.

2.1.4. Mentions de danger

Le prosulfocarbe est classé au titre du règlement n°1272/2008 (JOUE, 2008) selon les mentions de danger suivantes :

- H302 : Nocif en cas d'ingestion ;
- H317 : Peut provoquer une allergie cutanée ;
- H411 : Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets à long terme.

Par ailleurs, et comme évoqué en introduction, le prosulfocarbe est sensible à la dérive et volatil ; plusieurs études font état de sa présence dans l'air ambiant, sur des cultures pour lesquelles aucun usage de produits à base de prosulfocarbe n'est autorisé, ainsi que dans les eaux de surface (Anses, 2017). Les populations riveraines ainsi que l'environnement sont exposés ponctuellement au prosulfocarbe par voie aérienne (Atmo Nouvelle-Aquitaine, 2022). Ces éléments, abordés dans la partie ***3***, ont mené à des recommandations relatives à l'application des produits à base de prosulfocarbe ainsi qu'à des changements réglementaires en 2017 puis de nouveau en 2018.

2.1.5. Usages autorisés

La liste complète des cultures sur lesquelles le prosulfocarbe est autorisé est présentée en ***Tableau 2***.

Pour chaque culture listée, le prosulfocarbe est autorisé pour l'usage « Désherbage ».

Tableau 2 : Usages passés et actuels du prosulfocarbe

Cultures * Désherbage	Date début	Date fin
Arbres et arbustes	04/12/2002	
Artichaut	04/04/2003	06/30/2015
Blé	02/01/1995	
Carotte	04/12/2002	
Céleris	04/04/2003	06/30/2015
Fraisier	04/12/2002	
Oignon	04/12/2002	
Orge	02/01/1995	
Pavot	04/12/2002	
Poireau	04/04/2003	06/30/2015
Pomme de terre	04/12/2002	
Porte graine - Graminées fourragères et à gazons	04/12/2002	
Porte graine - PPAMC, Florales et Potagères	04/12/2002	
PPAMC	04/12/2002	
Seigle	02/01/1995	

Source : Propre élaboration à partir du fichier transmis par l'ANSES le 30 novembre 2022.
Note : Ce tableau expose les usages autorisés passés (pour ceux ayant une date de fin) et actuels (pour ceux n'ayant qu'une date de début). PPAMC : Plantes à Parfum, Aromatiques, Médicinales et Condimentaires.

2.1.6. Produits commerciaux autorisés

A ce jour, 19 préparations commerciales à base de prosulfocarbe sont autorisées : 11 AMM et 8 Permis de commerce parallèle. Le prosulfocarbe y est seul ou en association :

- Prosulfocarbe seul à 800 g/L ;
- Prosulfocarbe (800 g/L) associé à de la métribuzine (80 g/L) ;
- Prosulfocarbe (800 g/L) associé au clodinafop (10 g/L) et au phytoprotecteur cloquintocet-mexyl (2,5 g/L).

Quinze produits sont composés uniquement de prosulfocarbe.
La métribuzine est aussi un herbicide, principalement utilisé sur pomme de terre. Elle fait partie des dernières molécules de rattrapage[16] encore disponibles en culture de pomme de terre. Elle a un mode d'action à la fois racinaire et foliaire. Son spectre d'action est large ; elle agit principalement sur dicotylédones mais également sur quelques graminées[17]. L'avenir incertain de cette molécule a été souligné par les experts en cultures de pomme de terre que nous avons pu interroger (voir paragraphe ***4.5.2***). Aujourd'hui, trois produits associent prosulfocarbe et métribuzine.

[16] Dans un programme de désherbage d'une culture une année donnée, les derniers traitements se faisant sur les plantes développées visent à éliminer les adventices qui seraient encore présentes en trop grand nombre. Ce traitement permet donc de 'rattraper' les insuffisances de contrôle constatées. Quand tout se déroule bien, ce traitement de rattrapage n'est pas nécessaire et il n'est donc pas réalisé.
[17] https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere/DisplayMatiere?MatiereActiveId=77

Le clodinafop est également une molécule herbicide anti-graminées. Elle est autorisée sur blé, seigle et cultures porte-graines. Le cloquintocet-mexyl est un phytoprotecteur qui permet d'éviter le phytotoxicité du produit sur la culture. Un seul produit à base de prosulfocarbe associe prosulfocarbe, clodinafop et cloquintocet-mexyl.

Tous les produits commerciaux homologués à base de prosulfocarbe ne sont pas utilisés dans les mêmes proportions. Quatre formulations (DEFI, DEFI MAJOR, ROXY 800 et ROXY 800 EC) concentrent ainsi plus de 90% des ventes enregistrées au sein de la BNVD en 2021 ; elles sont composées de prosulfocarbe seul, sauf DEFI MAJOR qui associe prosulfocarbe, clodinafop et cloquintocet-mexyl. Le ***Tableau 3*** présente les quantités vendues en 2021 pour les produits commerciaux à base de prosulfocarbe.

Tableau 3 : Quantités de prosulfocarbe vendues en France en 2021 par produit commercial

Numéro d'AMM	Nom commercial	Quantités de prosulfocarbe achetées (kg)
2110202	ARCADE	73 096
2171232	ARCADE 880 EC	ND*
2210230	BOILER 800	ND*
2150063	CAZODEF	300
2220261	CLAYTON HEED	ND*
2200140	CLAYTON OBEY	ND*
8700462	DEFI	3 597 599
2030172	DEFI JARDIN	12
2110151	DEFI MAJOR	1 225 934
2020181	DUEL +	4008
2080106	FIDELE	ND*
2090154	FIDOX	100
2210219	FIDOX 800	81 040
2150752	FIXY	70 608
2190246	LINATI	187 161
2090077	ROXY	15284
2210192	ROXY 800	426 839
2090186	ROXY 800 EC	839 022
2170560	SEGA	ND*
2220146	SPANNIT	ND*
2220302	TOMENTAN	ND*

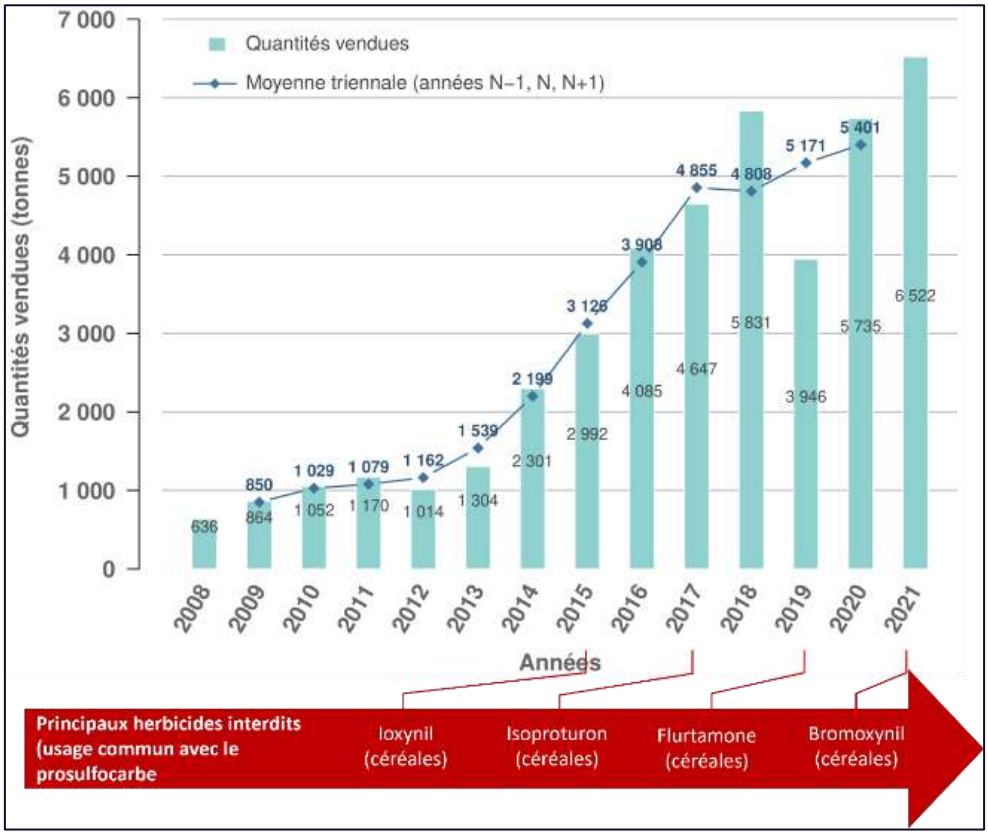
Source : propre élaboration à partir des données de vente de 2021 de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2023) et du fichier transmis par l'ANSES le 30 novembre 2022.

**ND = Non disponible, données absentes de la BNVD, produit n'ayant enregistré aucune vente*

2.2. Evolution des tonnages de prosulfocarbe

En 2021, 6 522 tonnes de prosulfocarbe ont été vendues en France. C'est la troisième substance active la plus vendues dans le pays (en kilogrammes de matière active) et le deuxième herbicide après le glyphosate (BNVD Traçabilité, 2023). Les tonnages ont fortement augmenté ces dernières années ; ils ont été multipliés par plus de six entre 2010 et 2021 (voir ***Figure 1***). Selon les données récemment publiées de la BNVD, les quantités vendues de prosulfocarbe ont augmenté d'environ 800 tonnes entre 2020 (5 735 tonnes vendues) et 2021. La fluctuation constatée entre 2017 et 2019 résulte au moins en partie des anticipations d'achat avant le relèvement de deux à trois euros par kilogramme de la taxe de redevance pour pollution diffuse au 1er janvier 2019. On peut néanmoins noter que, malgré ce « biais », les tonnages ont augmenté d'environ 700 tonnes entre ce point particulièrement haut de 2018 et 2021.

Figure 1 : Evolution des quantités de prosulfocarbe vendues (en tonnes de matière active) et principaux herbicides interdits de 2008 à 2021



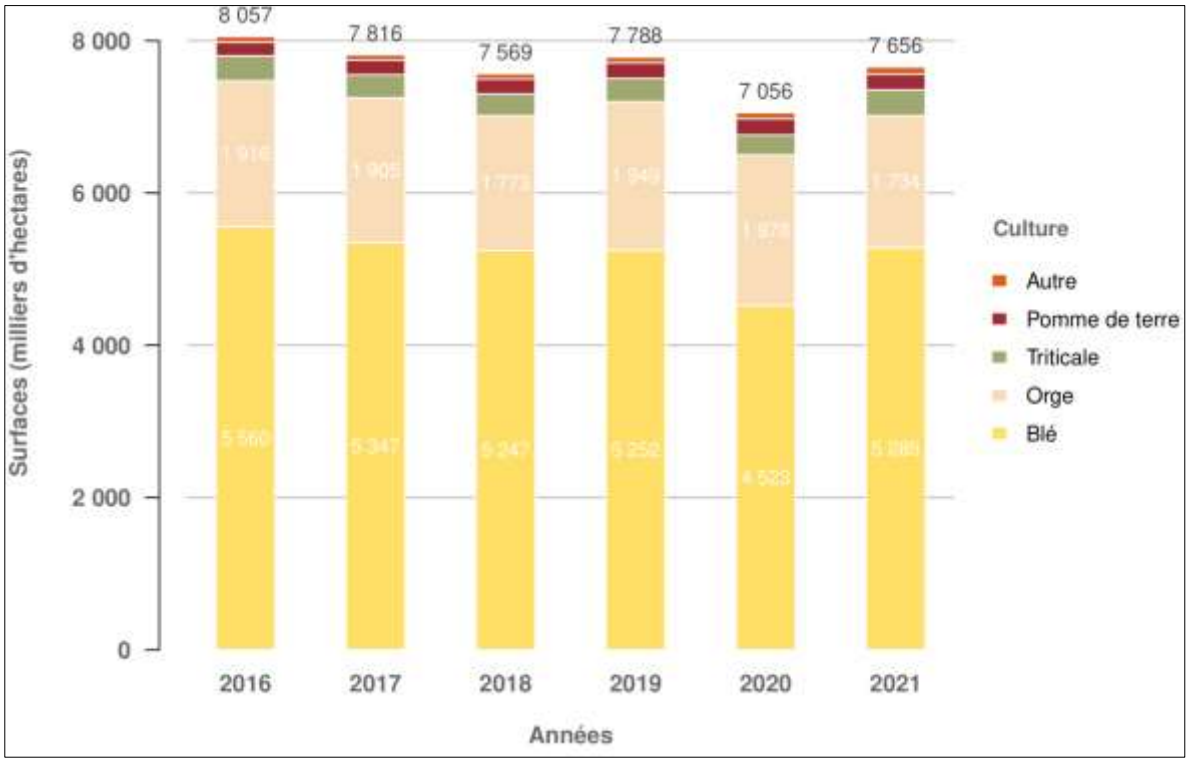
Source : Propre élaboration à partir de la BNVD Traçabilité (ventes de PPP, extraction 2023) pour les tonnages, propre élaboration à partir du fichier transmis par l'ANSES le 30 novembre 2022 pour les retraits.

Note : Les données 2021 sont encore susceptibles d'être corrigées jusqu'au 31 décembre 2023.

Le recours croissant au prosulfocarbe ces dernières années s'explique par un certain nombre de raisons que nous présentons en partie ***2.3***. Il est important de noter que les surfaces cultivées avec des cultures pouvant être traitées au prosulfocarbe restent assez stables ces dernières années ; il en va de même quand on regarde culture par culture. Ainsi, l'augmentation du recours au prosulfocarbe ne peut pas

être attribuée à une forte augmentation de ces surfaces. L'évolution de 2016 à 2021 des assolements des principales cultures pouvant recevoir du prosulfocarbe est présentée en ***Figure 2***.

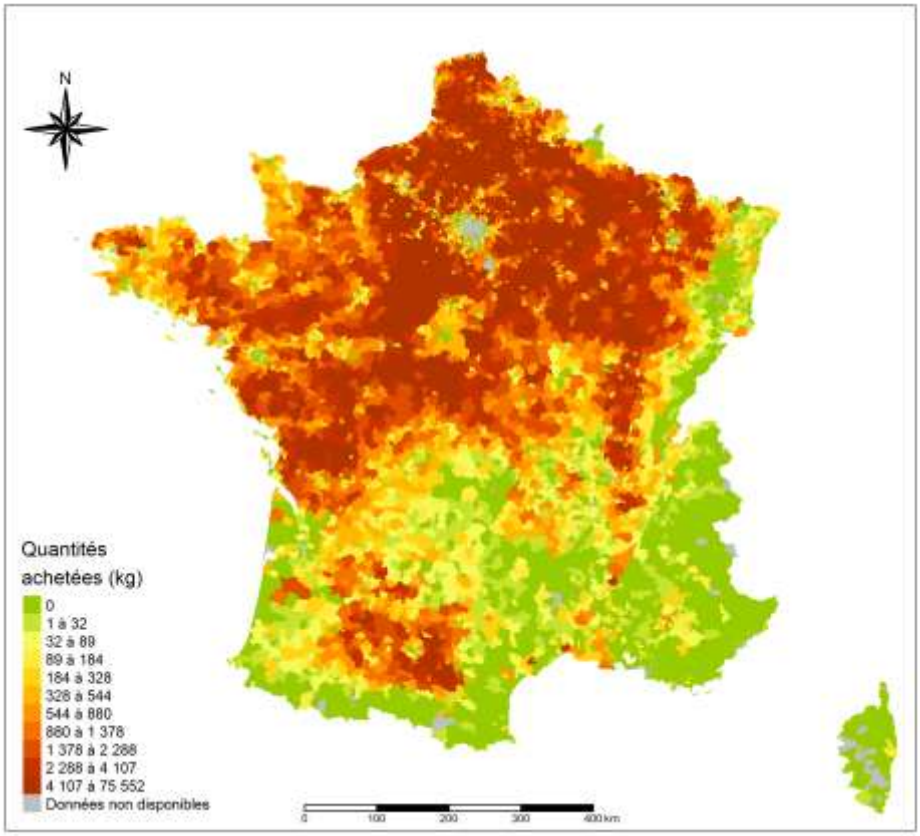
Figure 2 : Surfaces des principales cultures pouvant recevoir du prosulfocarbe



Source : Propre élaboration à partir des données du RPG

La carte de la ***Figure 3*** présente les quantités de prosulfocarbe achetées par code postal en France métropolitaine en 2021. On retrouve les grands bassins de production des principales cultures pouvant être traitées au prosulfocarbe, notamment le Bassin parisien pour le blé tendre, le Sud-Ouest pour le blé dur et le Nord de la France pour les pommes de terre.

Figure 3 : Quantités de prosulfocarbe achetées par code postal en 2021



Source : Propre élaboration à partir des données de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2023)

2.3. Raisons du recours croissant au prosulfocarbe

Diverses raisons expliquent le recours croissant au prosulfocarbe. Cette partie ***2.3*** se base à la fois sur des éléments bibliographiques et sur des échanges avec les experts que nous avons pu interroger.

2.3.1. La montée des résistances de certaines adventices

Tout d'abord, nous avons déjà évoqué la montée des résistances de certaines adventices aux produits de sortie d'hiver (Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire, 2022). Des résistances s'expriment notamment face aux inhibiteurs de l'ALS et aux inhibiteurs de l'ACCase (Délye *et al.*, 2021).
Le prosulfocarbe n'a pour l'instant pas donné lieu à la sélection de populations résistantes d'adventices à son encontre, néanmoins des populations de graminées résistantes au prosulfocarbe ont été décrites en Australie (Busi et Powles, 2013). Par ailleurs, un document de la Chambre d'Agriculture d'Eure-et-Loir (2022) rapporte des cas de résistances métaboliques ponctuelles en Angleterre et en France en 2018. Ces résistances sont métaboliques, c'est-à-dire qu'elles entrainent une baisse d'efficacité des molécules et non une perte totale d'efficacité comme en cas de mutation de cible.

2.3.2. Le retrait de certaines molécules

La frise rouge de la ***Figure 1*** présente les dates de retrait d'un certain nombre d'herbicides utilisés en culture de céréales ces dernières années.

Le retrait de l'isoproturon en 2016/17 semble avoir particulièrement joué sur le recours au prosulfocarbe ces dernières années. En effet, cette molécule était à la base d'un grand nombre de programmes de désherbage en blé et orge d'hiver (et orge de printemps). Herbicide racinaire de la famille des urées substituées, l'isoproturon était utilisé seul ou en association, notamment avec des substances actives telles que le diflufénican, le flufénacet, le prosulfocarbe et la pendiméthaline (Arvalis, 2015 ; Citron *et al.*, 2006 ; Bonin et Réal, 2008 ; Chambre d'Agriculture Meurthe-et-Moselle, 2015). Cette matière active était appréciée pour son large spectre sur graminées telles que vulpins, agrostis, pâturin et ray-grass (efficacité partielle sur cette dernière (Bonin et Réal, 2008), voire pas adaptée (Arvalis, 2015)) et pour son action contre quelques dicotylédones telles que les matricaires. Elle est alors présentée comme « une alternative essentielle aux graminées résistantes sur lesquelles les antigraminées foliaires de la famille des Fop […] et des sulfonylurées […] font face à des échecs à plus ou moins grande échelle » (Bonin et Réal, 2008).

En 2004, les doses maximales d'isoproturon ont été réduites de 1,8 kg/ha à 1,2 kg/ha. En 2007, des restrictions sont appliquées quant à l'utilisation de l'isoproturon sur sols drainés : les produits dans lesquels l'isoproturon est seul sont autorisés sur sols drainés hors période d'écoulement des drains ; les produits dans lesquels l'isoproturon est associé à une autre molécule sont interdits sur sols drainés (Bonin et Réal, 2008 ; Arvalis, 2015). Ce durcissement a été acté afin de préserver la ressource en eau. Néanmoins, même suite à ces restrictions, l'isoproturon continuait d'être retrouvé dans l'eau à des teneurs supérieures aux seuils réglementaires notamment en automne (Arvalis, 2015). Il a été interdit en 2016/17.

2.3.3. Le durcissement de la règlementation sur d'autres molécules

Suite au retrait de l'isoproturon, le chlortoluron est devenu une solution chimique d'autant plus utilisée par les agriculteurs en céréales d'hiver. En 2016, Arvalis explique que les solutions herbicides sans isoproturon vont se baser notamment sur le flufénacet, le prosulfocarbe, le chlortoluron et la pendiméthaline (Arvalis, 2016 ; Arvalis, 2017).

A noter que l'utilisation conjointe du chlortoluron et de l'isoproturon était déjà réglementée depuis plusieurs années. En effet, elles ne pouvaient pas être utilisées toutes deux sur une même campagne et sur une même parcelle (Arvalis, 2015 ; Citron *et al.*, 2006).

Comme l'isoproturon, le chlortoluron fait partie de la famille des urées substituées (Citron *et al.*, 2006) ; il a une action racinaire[18]. Il est apprécié pour son efficacité sur graminées telles que les agrostis, pâturins, ray-grass et vulpins, ainsi que sur quelques dicotylédones telles que les stellaires et matricaires ou encore bleuets, coquelicots et crucifères avec une efficacité moindre (Chambre d'Agriculture d'Alsace, 2022).

[18] http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=2&id_acc=70

Le chlortoluron fait lui aussi face à un durcissement de sa règlementation : il ne doit pas être appliqué sur sols artificiellement drainés ni pendant la période de reproduction des oiseaux (mars à août) (Arvalis, 2016).

2.3.4. La non tolérance de certaines variétés de blé au chlortoluron

On retrouve régulièrement le conseil de n'appliquer le chlortoluron que sur des variétés de blé identifiées comme tolérantes dans les catalogues (Chambre d'Agriculture d'Eure-et-Loir, 2022 ; Arvalis, 2016). A titre d'exemple, Arvalis dresse une liste des variétés de blé tendre tolérantes au chlortoluron et une liste des variétés sensibles (Arvalis, 2020).
Après un report sur le chlortoluron suite à l'interdiction de l'isoproturon, les contraintes d'application ainsi que la phytotoxicité de cette molécule font partie des raisons qui conduisent les agriculteurs à se tourner vers le prosulfocarbe.

2.3.5. La simplification des rotations et l'agrandissement des exploitations agricoles

Le recensement agricole d'avril 2022 vient souligner quelques évolutions récentes de l'agriculture[19]. La tendance se poursuit avec une augmentation moyenne de +14 hectares par exploitation entre 2010 et 2020 et une part croissante des systèmes initialement en polyculture élevage qui se concentrent sur la seule partie grande culture (52% des exploitations en 2020). Sans en faire une règle absolue, l'augmentation de la taille des exploitations couplée à la simplification des rotations concourent conjointement à standardiser les itinéraires de conduite des cultures et privilégier des actions robustes et simples à déployer, dont le recours aux pesticides. Ainsi, l'analyse du Groupe 30 000 en Occitanie souligne la surreprésentation des grandes exploitations avec une part importante d'assolement en céréales et maïs dans la catégorie des fermes présentant un IFT_{2019} supérieur à la valeur de la référence régionale (Chambre régionale d'Agriculture d'Occitanie et équipe du SRAL, DRAAF Occitanie, 2019).
On retiendra que l'augmentation conjointe des volumes de prosulfocarbe et de la taille moyenne des exploitations reste une corrélation et pas une causalité.

2.3.6. Un coût plus faible que d'autres matières actives

Certains experts interrogés dans le cadre de cette étude mettent en avant le prix attractif du prosulfocarbe par rapport à des produits se basant sur d'autres molécules.
Par ailleurs, la molécule est aujourd'hui soumise à un faible montant de RPD : 3 €/kg.

[19] https://www.vie-publique.fr/en-bref/282981-recensement-agricole-comment-l-agriculture-evolue-depuis-10-ans

2.4. Evaluation du degré de dépendance de l'agriculture au prosulfocarbe

2.4.1. Rappel sur la méthodologie développée : indicateur de tension

La définition et la quantification d'un degré de dépendance de l'agriculture française à une molécule ont pour objectif de dépasser l'analyse des seuls volumes employés de ladite molécule. Ces derniers sont en effet nécessairement liés aux assolements des territoires, la plupart des molécules ne pouvant être utilisées que sur un sous-ensemble de cultures prédéfini. Ainsi, une zone géographique employant un large volume de prosulfocarbe ne traduit pas nécessairement un usage intensif de celui-ci, mais peut-être simplement le reflet d'une présence de céréales d'hiver plus forte qu'ailleurs. A l'inverse, un territoire employant peu de prosulfocarbe peut en réalité en avoir un usage intensif s'il contient de faibles surfaces pouvant en recevoir.

Dans cette optique, nous avons développé dans un travail précédant portant sur le S-métolachlore (Reboud *et al*., 2022) un indicateur fondé sur un ratio permettant de mesurer le niveau de tension qu'il existe autour d'une substance active (SA). Nous en rappellerons ici les principes, et nous renvoyons le lecteur à cette étude pour plus de détails sur la méthodologie déployée pour construire cet indicateur.

Pour une substance active (sa) et une zone géographique (z) données, l'indicateur de tension consiste en la comparaison entre les quantités effectivement utilisées de la substance au sein de la zone ($Q_{sa;z}$), et la quantité maximale qu'il aurait été possible d'utiliser au vu de l'assolement de la zone et des doses réglementaires de la molécule ($QMC_{sa;z}$). Nous appelons cette quantité maximale la QMC (Quantité Maximale Consommable).

Nous estimons la quantité de substance active utilisée par le bais des données de la Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques par les Distributeurs agréés (BNVD), qui donne à différents grains spatiaux les quantités de substances actives achetées sur le territoire français[20].

L'estimation de la QMC repose i) sur l'assolement de la zone géographique étudiée, et ii) sur la dose maximale de substance active autorisée sur chaque culture de la zone. La QMC correspond ainsi à la somme des surfaces de chaque culture (auxquelles on soustrait les surfaces en AB ne pouvant recevoir d'herbicide) multipliées par la dose maximale de substance active pour la culture correspondante. Plus formellement pour une zone géographique (*z*) et une SA (*sa*) donnée, on a :

$$QMC_{sa;z} = \sum_{c} S_{z;c}.QMAX_{sa;c} \ ,$$

[20] Nous faisons l'hypothèse que les quantités achetées d'une substance active sont utilisée dans le territoire d'achat

avec :

- c : culture pouvant recevoir la substance sa
- $S_{z;c}$: surface de la culture c dans la zone z pouvant recevoir la substance sa, calculée comme la surface totale de la culture c dans la zone z à laquelle on retranche la surface en agriculture biologique (en hectares).
- $QMAX_{sa;c}$: Quantité maximale de la substance sa autorisée sur la culture c par unité de surface (en kg/ha pour le prosulfocarbe)

Nous estimons la surface $S_{z;c}$ par le biais du Registre Parcellaire Graphique[21] (RPG) et de sa version pour l'agriculture biologique (RPG AB) de l'Agence Bio[22], qui reposent sur les déclarations PAC. Pour les cultures concernées par le prosulfocarbe (et pour les grandes cultures plus généralement), la part des surfaces non déclarées pour la PAC est marginale. A ce titre l'***Annexe 2*** compare l'agrégation des surfaces nationales pour quelques cultures sur lesquelles le prosulfocarbe est autorisé, au sein du RPG, et telles qu'estimées par la statistique agricole annuelle (SAA) de 2021 par Agreste.

Pour une culture *c*, chaque produit autorisé dispose d'une dose maximale réglementaire, ainsi que d'une concentration en SA. La quantité maximale de SA sur la culture c, pour chaque produit, correspond au produit entre la dose maximale et la concentration (à condition que les unités concordent). Pour la culture c, on définit ensuite $QMAX_{sa;c}$ comme le maximum des quantités maximales de SA de chaque produit. Les informations sur les doses maximales et les concentrations en SA des produits sont disponibles dans la base de données EPHY[23].

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. A noter que les ventes de produits phytosanitaires enregistrées dans la BNVD sont rattachées au code postal du siège de l'exploitation agricole, tandis que l'assolement enregistré dans le RPG (et RPG AB) est donné pour le code postal physique de la parcelle. Ce décalage constitue un biais inévitable attaché à notre méthodologie ; dans une note méthodologique publique, l'ODR (Observatoire du Développement Rural – INRAE) estime la proportion des parcelles dont le code postal physique diffère du code postal « siège » à un peu moins de 20% (Ramalanjaona et al., 2020).

Une fois la $Q_{sa;z}$ et la $QMC_{sa;z}$ calculées pour chaque unité géographique (code postal dans notre cas), nous calculons deux indicateurs de tensions : la tension locale, et le degré de dépendance global de l'agriculture française. Le premier correspond simplement au ratio entre $Q_{sa;z}$ et $QMC_{sa;z}$, pour chaque unité géographique. Plus ce ratio est proche de 1, plus la tension est localement forte, et inversement. Autrement dit, le ratio devient maximum quand tous les agriculteurs d'un territoire donné achètent la totalité de ce à quoi ils ont droit d'un point de vue règlementaire. Le degré de dépendance global est calculé en modélisant le lien entre les quantités de prosulfocarbe achetées ($Q_{sa;z}$) et la limite réglementaire 'achetable' ($QMC_{sa;z}$) à l'aide d'un modèle linéaire simple (Freedman, 2005), sans terme constant. En pratique, afin de respecter les hypothèses du modèle linéaire, une transformation racine carrée a été appliquée sur les données. L'équation est :

$$\sqrt{Q_{sa}} = \alpha \cdot \sqrt{QMC_{sa}} + \varepsilon$$

[21] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-culturaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/

[22] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/616d6531c2951bbe8bd97771/

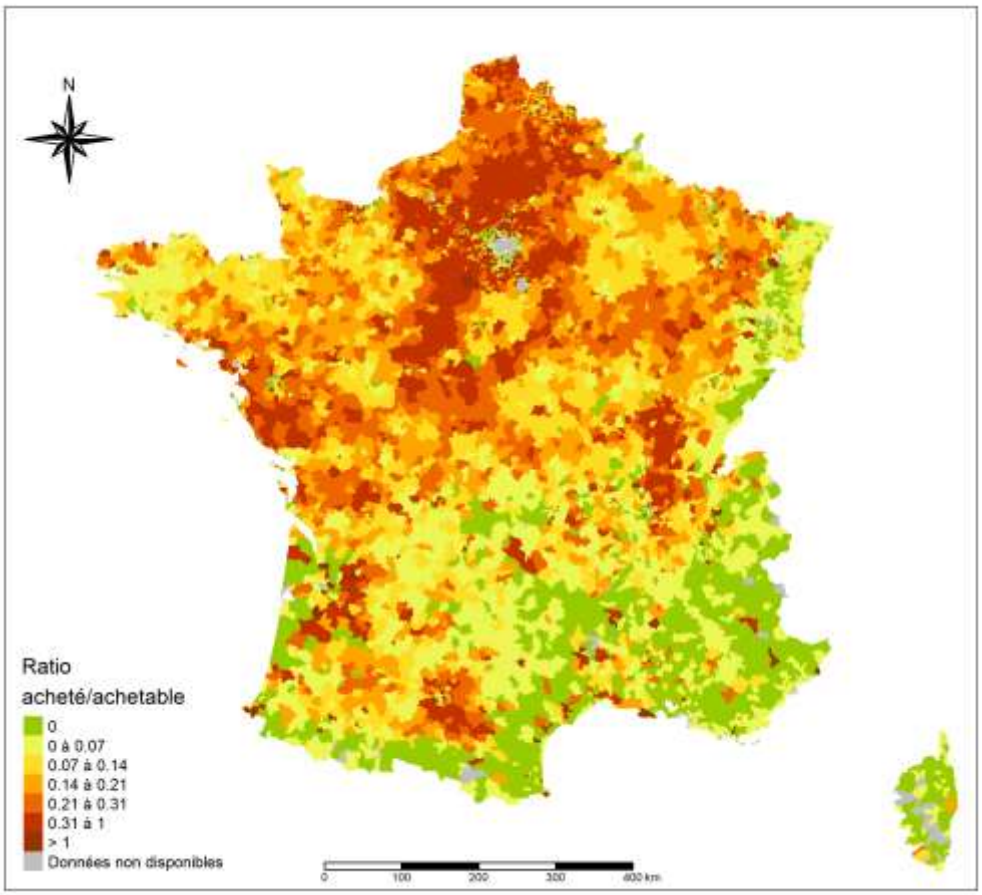
[23] https://ephy.anses.fr/

Ici, α^2 peut être interprété comme le ratio Q_{sa}/QMC_{sa} moyen, pour l'ensemble des codes postaux à disposition. 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 droite de régression.

2.4.2. Résultats

L'analyse de la tension locale autour du prosulfocarbe, présentée en ***Figure 4***, permet de préciser les principales zones ayant, au-delà de leur assolement, une utilisation intensive du prosulfocarbe. Parmi ces zones, on retrouve des bassins de production agricole connus, comme la Picardie (pomme de terre et blé), le Nord-Pas-de-Calais (pomme de terre), ainsi que les plaines céréalières d'Eure-et-Loir et de Loir-et-Cher (région de la Beauce). La carte permet également d'identifier d'autres zones d'utilisation intensive du prosulfocarbe qui n'étaient pas mises en évidence par leur consommation absolue de prosulfocarbe (***Figure 3***), telles que le sud de la Bourgogne (dont oignon), la Vendée (blé) ou encore la région toulousaine (blé dur).

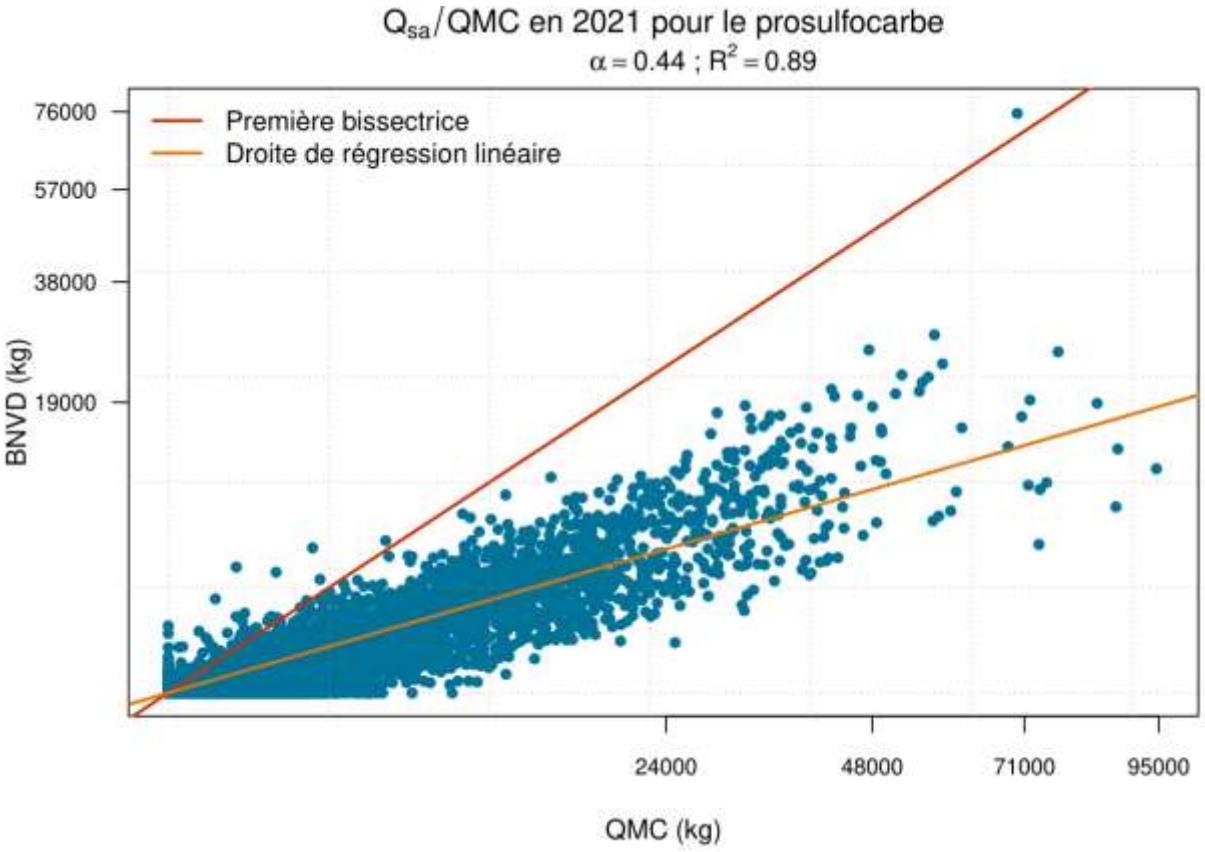
Figure 4 : Ratio Q_{sa}/QMC au code postal pour le prosulfocarbe en 2021



Source : Propre élaboration à partir des données de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2023), du catalogue E-Phy, et du RPG et RPG AB.

L'analyse du degré de dépendance global de l'agriculture française au prosulfocarbe est présentée sur la ***Figure 5***. Les résultats témoignent d'une utilisation assez homogène en France ($R^2 = 0.89$), avec un degré de dépendance globale fort ($\alpha = 0.44$). De manière globale, les agriculteurs français achètent environ 19% (α^2) du prosulfocarbe 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, ce que nous présentons un peu plus loin, en ***Figure 6***, et de la méthodologie de calcul de la QMC de l'autre, qui tend par construction à surévaluer la limite réglementaire en retenant la dose du produit ayant le plus fort grammage applicable à l'hectare.

Figure 5 : Relation entre quantités achetées (Q_{sa}) et quantités achetables (QMC) pour le prosulfocarbe en 2021



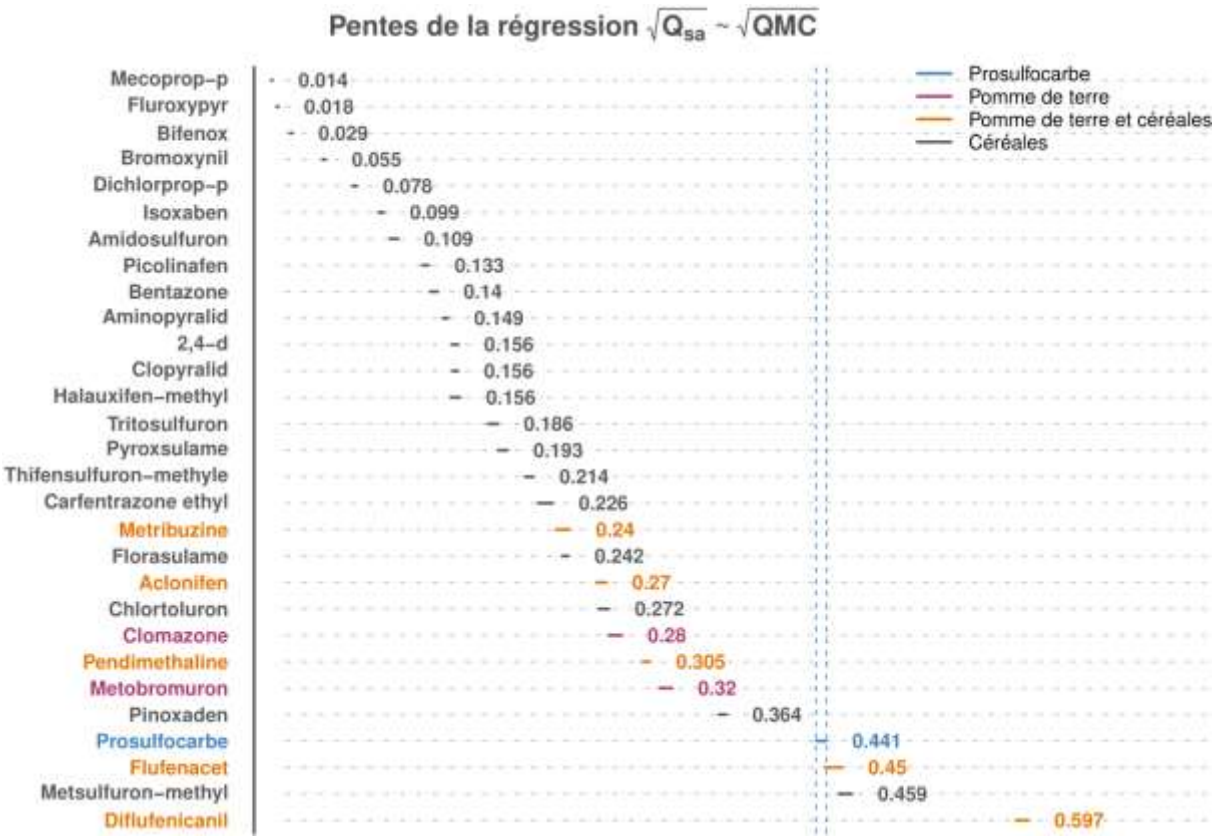
Source : Propre élaboration à partir des données 2021 du RPG et RPG AB, de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2023) et E-Phy (fichier fournis par l'Anses).

Sur ce graphique, la première bissectrice symbolise la QMC, soit la limite réglementaire supérieure. Les points situés au-dessus correspondent à des codes postaux achetant plus de prosulfocarbe qu'ils ne peuvent en utiliser une année donnée. Deux catégories principales de territoires sont concernées :

- 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 la compagnie agricole acheteuse.

Enfin, nous avons appliqué cette méthodologie à un ensemble de 30 molécules herbicides utilisables soit en céréales, soit en pomme de terre (soit les deux), afin de contextualiser la dépendance de l'agriculture française au prosulfocarbe. Les résultats sont présentés en ***Figure 6*****Figure 6**. Avec une valeur moyenne de 0,44, le prosulfocarbe est la quatrième molécule avec le score le plus élevé. L'agriculture française présente ainsi un degré de dépendance au prosulfocarbe très élevé comparativement aux principaux herbicides utilisés en France pour des cultures similaires.

Figure 6 : Pentes des régressions linéaires pour un ensemble d'herbicides des céréales et de la pomme de terre



Source : Propre élaboration à partir des données 2021 du RPG et RPG AB, de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2023) et E-Phy (fichier fournis par l'Anses).

Note : pour chaque molécule, la largeur de la barre représente l'intervalle de confiance à 95% pour le coefficient de la pente de la régression linéaire.

2.5. Répartition des usages

2.5.1. Usages majoritaires

En 2017, environ 70% des volumes de prosulfocarbe étaient employés sur céréales d'hiver[24]. 25% des surfaces cultivées en blé tendre étaient traitées au prosulfocarbe ; cela représentait plus de la moitié des volumes employés en France. Les surfaces de pomme de terre mobilisaient environ 5% des volumes, mais environ les deux tiers recevaient du prosulfocarbe. Le reste des volumes étaient distribués sur une culture à valeur médicinale, le pavot, sur certains légumes tels que les oignons et les carottes ainsi que sur certaines cultures porte-graine.

Les données les plus récentes des Enquêtes Pratiques culturales Grandes cultures remontent à 2017. Une enquête déployée courant 2022 porte sur les pratiques de la campagne 2021 ; les premières données ne seront pas publiées avant le deuxième semestre 2023. Néanmoins, des échanges avec des experts de terrain, notamment des représentants de chambres d'agriculture[25], estiment qu'environ 50% des surfaces de blé tendre reçoivent aujourd'hui du prosulfocarbe. Ceci est cohérent avec ce que l'on sait de l'évolution des volumes commercialisés de prosulfocarbe.

Les surfaces traitées au prosulfocarbe en France en 2017 sont présentées par cultures, pour les cultures principales présentes dans l'enquête PK Grandes Cultures 2017, dans le ***Tableau 4*** ci-dessous. La part des surfaces traitées au prosulfocarbe par culture y est également présentée, ainsi que les doses moyennes appliquées et les quantités totales de prosulfocarbe employées par culture. Pour chaque culture, nous avons également ajouté les surfaces traitées par au moins un herbicide et la part que cela représente sur l'ensemble des surfaces de la culture en question.

[24] On considère ici les principales céréales d'hiver qui sont présentes dans la dernières enquête PK Grandes cultures disponible, soit celle de 2017. Il s'agit du blé tendre, du blé dur, de l'orge et du triticale. Le seigle n'est par exemple pas présent dans les enquêtes PK.

[25] Les personnes interrogées sont localisées dans le Grand Ouest et dans le Nord de la France.

Tableau 4 : Répartition des usages du prosulfocarbe en 2017

Plutôt 50% des surfaces aujourd'hui (à dire d'experts)

	Blé tendre	Blé dur	Orge	Triticale	Carottes	Pomme de terre
Surface traitée au prosulfocarbe (milliers d'ha)	1 221	57	194	55	4,5	112
Part de surface traitée au prosulfocarbe (%)	26%	17%	11%	20%	45%	64%
Surface traitée par au moins un herbicide (milliers d'ha)	4 612	315	1 590	224	9,3	173
Part de surface traitée par au moins un herbicide (%)	98%	93%	97%	81%	92%	99%
Dose moyenne de prosulfocarbe appliquée (kg/ha)	2,1	2,2	2,2	2,3	1,9	2,4
Quantité totale de prosulfocarbe employée (tonnes)	2 593	124	424	124	8,7	271

≈ 56% des quantités totales de prosulfocarbe vendues en France en 2017

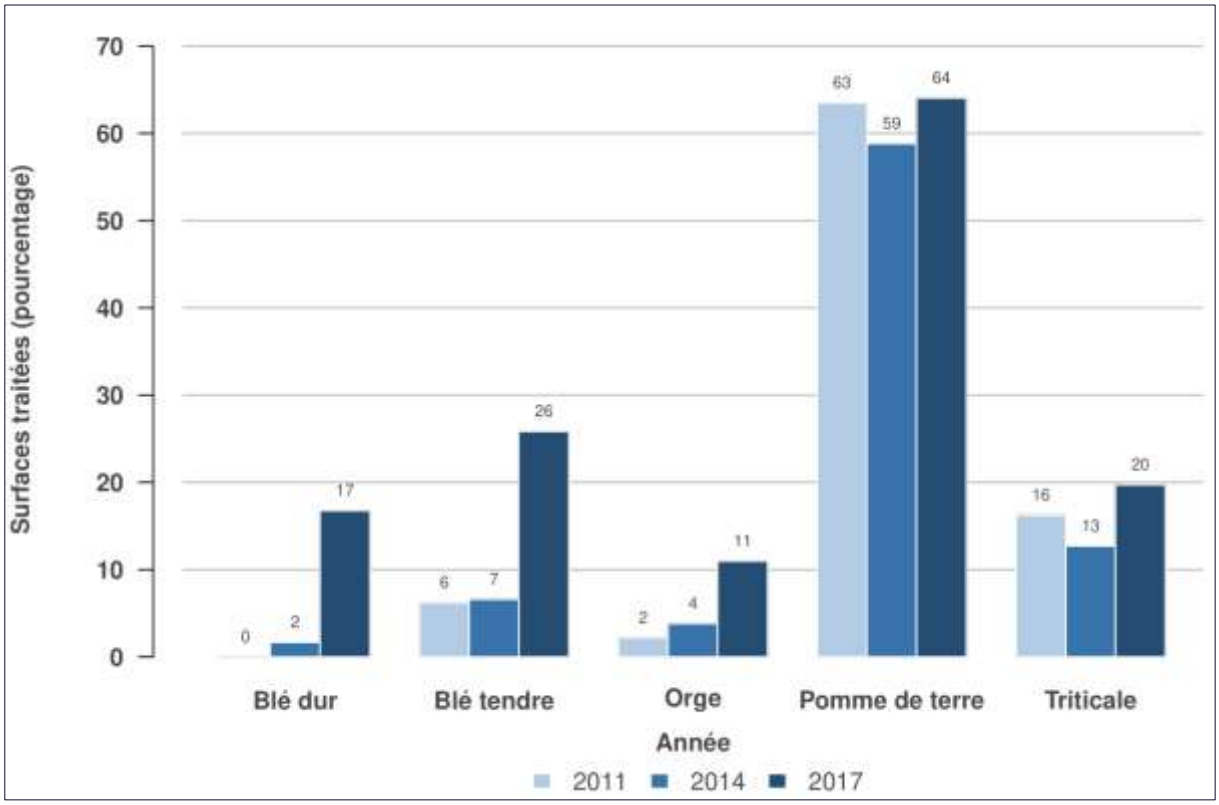
Deux tiers des surfaces cultivées en pommes de terre reçoivent du prosulfocarbe

Source : Propre élaboration à partir de l'enquête Pratiques culturales Grandes cultures 2017

Comme mentionné plus haut, les chiffres présentés dans le ***Tableau 4*** ont évolué depuis 2017. Plus généralement, les usages récents du prosulfocarbe ont connu de larges évolutions. A ce titre, la ***Figure 7*** et la ***Figure 8*** présentent respectivement l'évolution des proportions de surfaces traitées au prosulfocarbe et celle des quantités totales utilisées pour chacune des principales cultures recevant du prosulfocarbe. La tendance haussière en céréales d'hiver, et notamment en blé tendre, y est particulièrement visible, tendance qui a perduré depuis 2017.

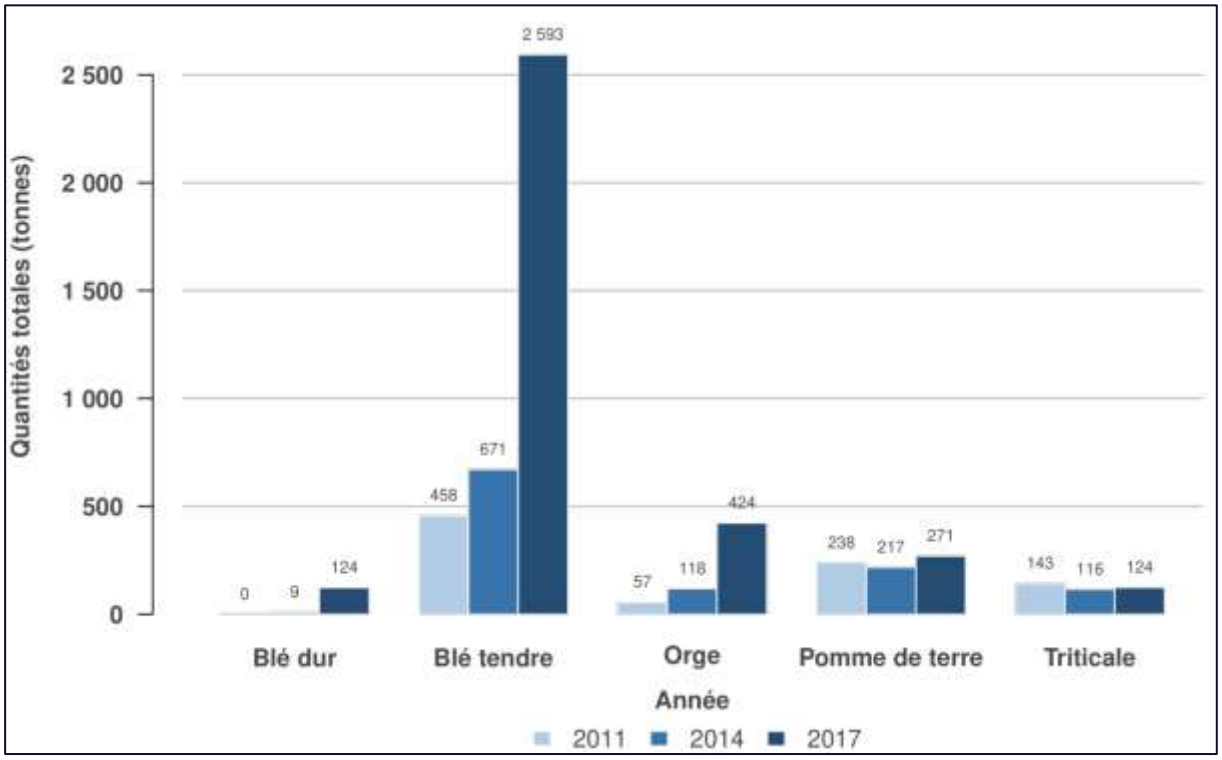
De plus, ces graphiques permettent de mettre en évidence l'hétérogénéité de la situation entre les différentes cultures. Certaines présentent ainsi une dépendance forte et historique au prosulfocarbe, à l'instar des pommes de terre. En revanche, du fait des surfaces plus faibles qu'en céréales d'hiver, les quantités totales de prosulfocarbe utilisées en pomme de terre sont sans commune mesure avec ces dernières. Le blé, à l'inverse, présente une dépendance récente et croissante au prosulfocarbe, qui s'accompagne de la majorité des volumes totaux consommés de prosulfocarbe.

Figure 7 : Proportion des surfaces traitées au prosulfocarbe par culture, en 2011, 2014 et 2017



Source : Propre élaboration à partir des enquêtes Pratiques culturales et phytosanitaires Grandes cultures 2011, 2014 et 2017

Figure 8 : Quantités totales extrapolées de prosulfocarbe utilisées par culture en 2011, 2014 et 2017



Source : Propre élaboration à partir des enquêtes Pratiques culturales et phytosanitaires Grandes cultures 2011, 2014 et 2017

Pour les cultures légumières concernées par le prosulfocarbe, seule la carotte est enquêtée dans les enquêtes PK. L'oignon était enquêté en 2013, mais pas en 2018. En termes de volumes, les quantités de prosulfocarbe utilisées sur carottes sont faibles (environ 7,8 tonnes en 2013, environ 8,7 tonnes en 2018), principalement car ces dernières représentent de faibles surfaces. Par ailleurs, la proportion des surfaces de carottes recevant du prosulfocarbe est restée plutôt stable (de 41% en 2013 à 45% en 2018). Toutefois, la dose moyenne employée par hectare a augmenté, passant de 1,4 kg en moyenne en 2013 à 1,9 kg en 2018.

2.5.2. Cas des semences

Les productions de semences concernent de petites surfaces et de petits volumes de prosulfocarbe relativement aux autres cultures. En effet, au-delà des cultures porte-graine rattachées à leurs cultures de consommation sur lesquelles le prosulfocarbe est autorisé, ce dernier est principalement utilisé sur les cultures porte-graine de fétuque élevée (semences fourragères) ainsi que sur quelques cultures de semences potagères (carottes, oignons, et autres apiacées telles que coriandre, persil, panais, fenouil). Si les surfaces cultivées en semences de céréales à paille représentent environ 126 000 ha en 2021, les semences de fétuque élevée représentent pour leur part environ 2 350 ha et celles de semences potagères (carottes, oignons, et autres apiacées telles que coriandre, persil, panais, fenouil) représentent alors environ 6 800 ha (SEMAE[26]). Néanmoins, elles sont aujourd'hui très dépendantes

[26] https://www.semae.fr/etudes-donnees-statistiques-semences/

du prosulfocarbe. Rappelons que l'article 50.1 du règlement (CE) No 1107/2009 cadrant l'évaluation comparative impose de prendre en compte les utilisations mineures.

Cette forte dépendance est notamment liée aux cahiers des charges particulièrement contraignants et qui imposent l'utilisation de cet herbicide pour assurer une propreté satisfaisante des récoltes. En effet, la filière fait face à des difficultés de triage quand les graines adventices et celles d'intérêt sont mélangées.

Une moindre dépendance au prosulfocarbe en cultures porte-graines pourrait s'envisager mais nécessiterait sans doute de repenser de manière profonde l'organisation des filières concernées. Nous reviendrons plus en détail sur cela en partie ***4.5.3***.

3. Eléments de diagnostic de la situation actuelle

3.1. Une molécule volatile et sensible à la dérive

La DGAL (Direction Générale de l'Alimentation) détecte depuis 2013 la présence de prosulfocarbe sur des cultures sans usages autorisés de produits à base de prosulfocarbe ; c'est ce dont fait état l'Anses dans son extrait de note d'appui scientifique et technique relatif à la contamination de certaines cultures par le prosulfocarbe (Anses, 2017).

Deux mécanismes sont privilégiés par l'Anses pour expliquer ces contaminations au prosulfocarbe : « la dérive de pulvérisation et la volatilisation suivie d'un dépôt direct par contact ou après précipitation » (Anses, 2017). Atmo Nouvelle-Aquitaine (2022) présente la dérive comme « la fraction de pulvérisation qui n'atteint pas le sol ou la culture et qui est mise en suspension par le vent et les courants d'air » ; l'Anses présente la dérive comme des pertes directes pendant l'application, soit « la fraction de pulvérisation qui, au moment de l'application, n'atteint ni la plante ni le sol ». Quant à la volatilisation, elle correspond à des pertes indirectes en post-application ; elle a lieu depuis le sol ou le couvert traité (Anses, 2017). Atmo Nouvelle-Aquitaine (2022) ajoute que « la volatilisation post-application a lieu à partir des sols ou de la végétation traitée et peut se prolonger pendant des semaines […] La volatilisation post-application se manifeste généralement par des processus d'évaporation, de sublimation et de désorption ».

L'Anses (2017) indique que le prosulfocarbe est une substance « moyennement volatile ». L'Agence indique toutefois aussi que « après volatilisation, le prosulfocarbe semble pouvoir parcourir de longues distances, de l'ordre de plusieurs kilomètres, voire dizaines ou centaines de kilomètres, sans être particulièrement affecté par des barrières physiques », ce qui peut paraitre un peu contradictoire.

Par ailleurs, une étude publiée en 2006 indique que la quantité évaporée de prosulfocarbe 24 heures après son application peut atteindre 80% de la quantité appliquée (Carlsen *et al.*,2006). Selon les auteurs, ce taux élevé d'évaporation combiné à une forte utilisation de la molécule pourrait être un problème en ce qui concerne le transport de ces herbicides sur de longues distances.

Une étude du Ministère de l'Environnement et de l'Alimentation danois de 2020 décrit l'évaporation du prosulfocarbe par un modèle qui inclut deux paramètres majeurs : la durée post-application et la vitesse du vent. Ce modèle prédit une évaporation à six jours de près de 30% de la dose appliquée pour un vent à 1 m/s, de près de 50% pour un vent de 3 m/s et de près de 60% pour un vent de 5 m/s (Kryger Jensen *et al.*, 2020).

3.2. Présence et contaminations

Comme évoqué ci-dessus, le prosulfocarbe est retrouvé sur des cultures sans usages autorisés de produits à base de prosulfocarbe. Il est aussi retrouvé dans différents compartiments de l'environnement. Sa dégradation peut y être plus ou moins active et donner lieu à différents produits de dégradation. Ainsi, une équipe chinoise s'est intéressée aux produits de transformation du prosulfocarbe par une approche de chimie théorique mimant une attaque radicalaire OH, dressant la liste des produits de transformations théoriques (Bo et al. 2020).

3.2.1. Présence dans l'air

Il est important de noter qu'il n'existe pas de seuils réglementaires de qualité de l'air ambiant pour les pesticides (Anses, 2020). Le prosulfocarbe est retrouvé dans l'air comme en fait état l'Anses (2017). En France, des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air ou AASQA réalisent régulièrement des mesures de différents pesticides dans l'air et publient régulièrement des synthèses sur les bilans de contaminations observés (Desert et al., 2018). En 2017, au moment de la rédaction de la note de l'Anses (Anses, 2017), des données sur la présence du prosulfocarbe dans l'air entre 2008 et 2013 sont disponibles. Cette substance fait alors partie des 20 molécules les plus détectées[27]. Dans 86% des sites de détection, des grandes cultures sont présentes aux alentours.
Plus récemment, Atmo Nouvelle-Aquitaine révèle en juillet 2022 que le prosulfocarbe a atteint en 2021 des niveaux encore jamais observés en France dans l'air au niveau de la Plaine d'Aunis (Atmo Nouvelle-Aquitaine, 2022). Nous reviendrons plus longuement sur cette publication en parties ***3.4*** et ***3.5***.
Selon l'Anses, des travaux suggèrent que le prosulfocarbe puisse transiter avec les masses d'air à grande échelle en parcourant « de longues, voire très longues distances après évaporation » (Anses, 2017).

3.2.2. Quantification dans l'eau

Dans sa note de 2017, l'Anses présente le prosulfocarbe comme une substance non facilement biodégradable dans l'eau (Anses, 2017). Des mesures ont été réalisées dans différents compartiments de la ressource en eau.

3.2.2.1. Eaux de surface

Dans sa note de 2017, l'Anses fait état de « niveaux de quantification assez élevés » en France ainsi que de « moyennes annuelles maximum assez élevées sur certains points de mesure » dans les eaux de surface (Anses, 2017). De tels niveaux ont été mesurés entre 2007 à 2015 et plus particulièrement depuis 2012. De 2007 à 2014, plus de 70% des quantifications de prosulfocarbe dans les eaux de surface le sont d'octobre à décembre. L'Anses met en évidence « une augmentation importante de l'utilisation du prosulfocarbe depuis 2012 associée à une augmentation de la fréquence de quantification et des niveaux observés dans les eaux de surface ».

3.2.2.2. Eaux souterraines

Comme pour les eaux de surface, la surveillance du prosulfocarbe dans les eaux souterraines est effective depuis 2007 pour le territoire métropolitain. Dans sa note de 2017, l'Anses fait état de la très faible quantification du prosulfocarbe dans les eaux souterraines entre 2007 et 2015 (Anses, 2017).

[27] A noter que ces mesures ne sont pas réalisées sur toutes les régions ; elles ne sont donc pas représentatives de la situation de l'ensemble du territoire.

3.2.2.3. Eaux de pluie

Dans sa note de 2017, l'Anses cite des travaux de Kreuger *et al.* (2013) qui indique que dans certains cas le prosulfocarbe peut être fréquemment détecté et quantifié dans les eaux de pluie à des niveaux de concentration élevés.
Kreuger et Lindström présentent en 2019 un certain nombre de résultats suite à une surveillance long-terme de pesticides notamment dans l'air. Le prosulfocarbe est le deuxième pesticide retrouvé le plus fréquemment dans cette étude menée notamment sur des eaux de pluie en Suède ; la concentration en prosulfocarbe atteint 3,8 µg/L dans un échantillon de 2015 prélevé dans le Sud de la Suède (Kreuger et Lindström, 2019).

3.2.2.4. Eaux à destination de la consommation humaine

Le prosulfocarbe est en revanche peu fréquemment retrouvé dans les eaux à destination de la consommation humaine (EDCH). Entre 2007 et 2015, le prosulfocarbe est quantifié dans moins de 0,1% des analyses effectuées par les Agences Régionales de Santé (Anses, 2017). Sur les plus de 44 000 analyses effectuées, une seule était en non-conformité (*i.e.* dépassement de la limite de qualité des eaux).

3.2.3. Présence dans les sols

L'Anses décrit le prosulfocarbe comme pouvant facilement s'adsorber dans le sol. L'Agence indique que la contamination des cultures analysées dans son étude de 2017 ne provient probablement pas du sol : « la contamination par le sol ne parait pas plausible en raison de la vitesse du vecteur de contamination » (Anses, 2017).
Par ailleurs, la demi-vie du prosulfocarbe dans les sols dépend de la teneur en matière organique et s'échelonne au-delà d'une vingtaine de jours (Barba *et al.,* 2019 ; Braun *et al.*, 2016).
Une exploration un peu plus poussée de la bibliographie scientifique apporte quelques compléments. Si l'adsorption est proportionnelle à la quantité de matière organique présente dans le sol, on peut observer une augmentation de la minéralisation suite à son application répétée (avec perte d'efficacité comme pour l'isoproturon) (Barba et al. 2019), un résultat que ne retrouve que partiellement une autre étude (Garcia-Delgado et al., 2019). Le groupe de Mara Gennari (Gennari et al. 2002) rapporte par ailleurs l'isolement d'une souche de Pseudomonas capable de pousser sur un milieu de culture ou l'herbicide était la seule source de carbone.
L'effet écotoxicologique du prosulfocarbe sur les microbes apparait limité avec une augmentation de l'activité déshydrogénase sans incidence majeure sur la structure des communautés microbiennes, bien que cela puisse jouer en faveur des communautés bactériennes au détriment des communautés fongiques (Garcia-Delgado et al., 2019).

3.2.4. Contaminations de cultures

Comme abordé précédemment en partie ***3.1***, un certain nombre de cultures sont contaminées au prosulfocarbe alors même qu'elles ne disposent pas d'autorisation pour des produits à base de prosulfocarbe. Il existe depuis 2018 une liste de cultures dites « non cibles » que nous détaillerons en partie ***3.3.1***.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de suivi exhaustif des cultures contaminées par du prosulfocarbe chaque année à l'échelle de la France, qu'elles soient conduites en AB ou en conventionnel. Nous ne connaissons donc pas non plus la part des cultures recevant par accident du prosulfocarbe qui sont détruites (pour de l'AB ou du conventionnel) ou seulement déclassés (en AB).
Néanmoins, divers échanges que nous avons eus semblent concorder : en cas de contamination, les lots sont souvent détruits car les concentrations de prosulfocarbe dépassent alors la limite maximale de résidus (LMR). Pour rappel, une LMR est fixée pour chaque couple substance active – denrée, pour l'ensemble des denrées dans lesquelles la substance active ne devrait pas être retrouvée car aucun usage de celle-ci n'est autorisé (Anses, 2017). Pour un certain nombre de cultures, la LMR est fixée à 0,01 mg/kg pour le prosulfocarbe[28] (JOUE, 2023) ; elle correspond ainsi à la limite de quantification effective depuis 2014[29] (Anses, 2017 ; Anses, 2018a).
Les cultures contaminées sont conduites en agriculture conventionnelle ou biologique. Néanmoins, les agriculteurs en AB sont particulièrement pénalisés puisque les contrôles de leurs récoltes sont fréquents. Un problème majeur, concernant tout type de productions, réside dans l'impossibilité de déterminer l'origine des contaminations. Ainsi, à ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas de système compensant les agriculteurs concernés par ces pertes économiques, même si un document danois suggérait qu'un tel système puisse être envisagé chez eux (Ministry of Environment and Food of Denmark, 2017).
A noter que dans sa note de 2017 étudiant des contaminations de pommes, cressons et jeunes pousses de roquette, l'Anses indique « [qu']au vu des données disponibles, des contaminations et de connaissances des dangers, il n'apparaît pas de risque sanitaire pour le consommateur » (Anses, 2017). Le document de synthèse sur le prosulfocarbe de l'ANSES, publié en 2018, fournit quelques données qui concordent à constater la faible fréquence[30], voire l'absence de contamination des produits destinés à l'alimentation humaine (Anses, 2018a).

3.3. Changements règlementaires

3.3.1. En France

Les évènements cités précédemment ont mené à des modifications des AMM des produits à base de prosulfocarbe en France en 2017 puis en 2018.

[28] Il s'agit de la LMR la plus basse pour le prosulfocarbe ; elle est plus élevée pour certaines cultures. Par exemple, elle est de 0,2 mg/kg pour les noix, de 0,05 mg/kg pour les fraises, etc. (JOUE, 2023).
[29] Pour certaines cultures, notamment celles faisant l'objet de la note de l'Anses de 2017 (Anses, 2017), la LMR a été revue à la baisse en 2014 puisqu'elle est passée de 0,05 mg/kg à 0,01 mg/kg.
[30] Concernant la surveillance à la commercialisation (DGCCRF, DGAL), de 2011 à 2016, c'est en 2014 qu'a lieu le pic de détection de dépassements de LMR avec deux dépassements (sur persil et romarin), ce qui représente 0,04% des analyse réalisées cette année-ci. Concernant la surveillance à la production végétale (DGAL), de 2012 à 2016, c'est en 2016 qu'a lieu ce pic de détection avec 16 dépassements de LMR (sur cressons d'eau, pommes et navets), ce qui représente 1,3% des analyses réalisées cette année-ci ; la deuxième année avec le plus de dépassements de LMR est 2014 avec 5 dépassements détectés sur carottes et cressons d'eau, ce qui représente 0,3% des analyses réalisées cette année-ci (Anses, 2018a).

Suite aux travaux de l'Anses en 2017, les règles d'usages des produits à base de prosulfocarbe se sont durcies une première fois cette même année avec l'obligation de recourir à du matériel homologué pour limiter la dérive d'*a minima* 66%. Une liste officielle des matériels homologués est mise à disposition par le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Depuis 2019, de nouvelles buses sont homologuées et permettent une réduction plus importante de la dérive (≥ 75% et ≥ 90%) (Perriot, 2022). Avec l'arrivée de ces nouvelles buses, Arvalis a mené des essais afin d'évaluer l'influence du volume de bouillie et du type de buses sur un certain nombre d'herbicides racinaires, dont un à base de prosulfocarbe. L'efficacité du désherbage est mesurée sur des ray-grass. Arvalis conclut que le volume de bouillie et le type de buses n'a aucun effet significatif sur l'efficacité du désherbage et « [qu']il n'y a donc aucune crainte à avoir concernant l'application de prosulfocarbe avec des buses à injection d'air » (Perriot, 2022). Une mise à jour de la liste des matériels homologués pour limiter la dérive a été publiée en juin 2022 (DGAL/SDSPV, 2022).
Depuis 2018, il est également obligatoire d'attendre la récolte d'un certain nombre de cultures non cibles[31] présentes dans un rayon de 1 km des parcelles traitées au prosulfocarbe avant l'application de l'herbicide (Perriot *et al.*, 2021 ; Anses, 2018b). Cette distance est réduite à 500 m en cas d'impossibilité de report du traitement selon certaines conditions : le produit doit alors être appliqué le matin avant 9 heures ou le soir après 18 heures, en conditions de température faible et d'hygrométrie élevée. Il n'y a pas de définition précise de ce que l'on entend par « impossibilité de report » dont on doit comprendre implicitement que cela reste à la discrétion de celui qui souhaite appliquer le prosulfocarbe, entendu qu'il a fait le nécessaire pour prendre la meilleure décision possible pour lui et son entourage.

Afin de respecter ces nouvelles règles, Syngenta propose d'utiliser un outil (Quali'Cible) mis à disposition des agriculteurs gratuitement ; cet outil fournit une note de compatibilité attachée à la parcelle ciblée (Prevors *et al.*, 2019). Nous n'avons néanmoins pas pu avoir connaissance du taux d'utilisation de cet outil. Par ailleurs, il est aisé d'inclure dans cet outil les cultures pérennes puisque ces dernières sont implantées pour plusieurs années. Cette information est intéressante puisque les vergers, notamment ceux de pommes tardives (cidre), sont particulièrement sujettes aux contaminations (Devault *et al.*, 2019). Néanmoins, certains conseillers soulignent le fait que la présence des vergers est généralement déjà connue du voisinage et donc des agriculteurs utilisant du prosulfocarbe. En revanche, l'actualisation de la localisation des cultures annuelles apparaît moins évidente. L'agriculteur cultivant une culture non cible peut faire une demande d'ajout à Syngenta dans son outil en cliquant sur la parcelle concernée. Néanmoins, certains agriculteurs ne souhaitent pas donner d'informations géolocalisées de manière aussi précise. On peut donc se poser la question de la complétude des données de l'outil proposé par la firme. A cela, Syngenta nous a répondu utiliser une règle plutôt restrictive : si une culture non cible est indiquée une année donnée, elle est enregistrée comme susceptible d'héberger une culture annuelle non cible pour plusieurs années d'affilée.

[31] Cultures fruitières : pommes, poires ; cultures légumières : mâche, épinard, cresson des fontaines, roquette, jeunes pousses ; cultures aromatiques : aneth, cerfeuil, coriandre, livèche, menthe, persil et thym ; cultures médicinales : artichaut, bardane, cassis (bourgeons), cardon, chicorée, mélisse, piloselle, radis noir et sauge officinale ; cultures à graines : chia, quinoa, sarrasin.

Au-delà de ces modifications récentes, Arvalis préconise de bien respecter les conditions optimales d'application des produits à base de prosulfocarbe (Perriot *et al.*, 2021) :

- Hygrométrie > 70% ;
- Températures entre 5 et 20°C ;
- Absence de vent ;
- Respect de la hauteur optimale de la rampe en fonction de l'angle des buses.

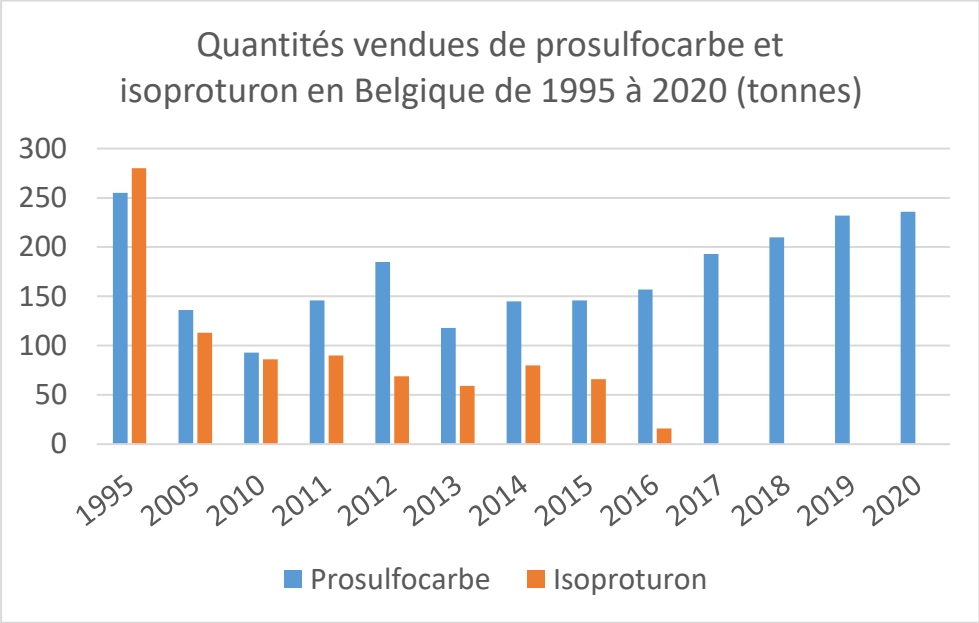
3.3.2. Autres pays européens

En ce qui concerne la dérive, un certain nombre de pays européens imposent d'utiliser du matériel qui permet de la réduire d'au moins 75%. A titre d'exemples, l'Allemagne, les Pays-Bas, la Belgique imposent une réduction de dérive de 90% ; le Danemark et la Suède imposent une réduction de dérive de 75%.

Nous avons pu échanger avec différents interlocuteurs en Belgique[32]. Nous présentons ici quelques éléments relatifs à ce pays voisin qui a imposé des restrictions sur les usages de produits à base de prosulfocarbe depuis 2021. Cela fait suite à de nombreux cas de contaminations de cultures (Phytoweb, 2022). La présence de prosulfocarbe sur certaines cultures à des concentrations qui dépassent les LMR (notamment sur du persil), est à l'origine de ce constat.
Dans les années 1990, le prosulfocarbe était le principal herbicide utilisé en céréales d'hiver avant d'être supplanté par d'autres molécules. Son utilisation a donc progressivement diminué avant que la tendance s'inverse. Les tonnages ont été multipliés par 2,54 entre 2010 et 2020 ; cette évolution est présentée en ***Figure 9*** ci-dessous.
L'évolution des quantités vendues d'isoproturon est également visible sur la ***Figure 9***. Comme en France, cet herbicide a été retiré du marché en 2017[33]. Cette interdiction a fait suite notamment à des dépassements de seuils des métabolites d'isoproturon dans les eaux souterraines (asbl CORDER - SPW Environnement, 2022a).

[32] Nos interlocuteurs sont rattachés aux structures suivantes : asbl CORDER ; Service public fédéral Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement ; Département agriculture et pêche du Gouvernement flamand ; Centre wallon de Recherches agronomiques ; Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire.
[33] Cela fait suite à l'entrée en vigueur du Règlement (CE) 2016/872 concernant le non-renouvellement de l'approbation de cette substance (JOUE, 2016).

Figure 9 : Evolution des quantités vendues de prosulfocarbe et isoproturon en Belgique de 1995 à 2020 (en tonnes)



Sources : Propre élaboration à partir des données de l'asbl CORDER - SPW Environnement *(2022a ; 2022b)*

En 2020, 236 tonnes de prosulfocarbe ont été vendues en Belgique. C'est la sixième substance active la plus vendue dans le pays (en kilogrammes de matière active) et le deuxième herbicide après le glyphosate (asbl CORDER - SPW Environnement, 2022b). En Belgique, le prosulfocarbe est principalement utilisé sur cultures de pomme de terre, puis sur céréales d'hiver, et enfin sur cultures légumières, notamment carottes et céleris.

En cultures de pomme de terre, le prosulfocarbe est appliqué en prélevée et apprécié pour son efficacité sur dicotylédones annuelles (notamment morelles noires) et graminées annuelles (notamment vulpin et pâturin). Il est souvent associé à d'autres substances actives dans les programmes de désherbage. Il est notamment employé pour renforcer l'action d'autres produits ; par exemple en cas de sensibilité de la variété de pomme de terre à la métribuzine. En 2020, sur la base d'un échantillon d'exploitations agricoles wallonnes, il a été estimé qu'en pomme de terre, 65% des utilisateurs employaient du prosulfocarbe (contre 49% en 2019 et 42% en 2018) (asbl CORDER - SPW Environnement ; discussions).

En céréales d'hiver, le prosulfocarbe est appliqué de la prélevée au stade 2 à 3 feuilles. Il est apprécié principalement pour son efficacité sur les graminées annuelles telles que les vulpins des champs et les agrostis jouets du vent pour les populations résistantes à d'autres herbicides. Il agit aussi sur quelques dicotylédones annuelles. Il est très rarement utilisé seul et complète souvent l'action du flufénacet par exemple. En 2020, sur la base d'un échantillon d'exploitations agricoles wallonnes, il a été estimé qu'en blé tendre d'hiver, 9% des utilisateurs employaient du prosulfocarbe (contre 6% en 2019 et 8% en 2018) (asbl CORDER - SPW Environnement ; discussions), des pourcentages très inférieurs à la situation française.

Le prosulfocarbe est appliqué respectivement au stade 1 à 5 feuilles pour les carottes, et au stade 2 à 4 feuilles en céleris. Il est apprécié pour son efficacité contre un large spectre de graminées et dicotylédones annuelles. Rarement utilisé seul, il est souvent associé à de la métribuzine et/ou de l'aclonifen.

Ces dernières années, la Belgique fait face à deux problèmes majeurs de contaminations de cultures adjacentes aux parcelles traitées au prosulfocarbe. Tout d'abord, il s'agit des cultures de persil en Flandre[34] (Vleugels, 2021). Des dépassements de LMR sont constatés au moment des récoltes en automne, probablement liés à l'utilisation de prosulfocarbe sur céréales d'hiver à cette même période. Par ailleurs, des dégâts ont également été observés au niveau du feuillage de poiriers, entrainant des pertes de récoltes importantes les deux à trois années qui suivent la dérive de produit à base de prosulfocarbe.
Ces évènements ont contribué à la mise en place de restrictions sur l'utilisation des produits à base de prosulfocarbe courant 2021. Dorénavant, l'utilisation de buses réduisant la dérive d'au moins 90% est obligatoire. Par ailleurs, pour toutes les cultures autorisées, sauf céréales d'hiver, les produits à base de prosulfocarbe sont interdits entre le 1er septembre et le 1er mars (asbl CORDER, 2021). En ce qui concerne les céréales d'hiver :

- Le prosulfocarbe est autorisé seulement pour lutter contre les vulpins des champs et les agrostides jouets du vent (*Apera spica-venti*) et ;
- Entre le 1er septembre et le 1er mars :
    - Le prosulfocarbe est interdit si des légumes, fruits ou aromates encore à récolter sont présents sur les parcelles adjacentes ;
    - Le prosulfocarbe est interdit en Flandre occidentale, à l'exception de la région des polders.

A noter que la Flandre occidentale est une région principalement de légumes, fruits et herbes, avec peu de blé. La région des polders échappe à cette interdiction car elle fait face à des vulpins des champs et jouets du vent résistant à d'autres herbicides.
La Belgique ne dispose pas encore d'assez de recul pour analyser l'impact de ces nouvelles règles sur les contaminations de cultures avoisinantes. Néanmoins, Phytoweb (2022) indique que malgré une large campagne de communication en 2021, des contaminations sont encore constatées. Par ailleurs, la LMR sur persil a récemment été relevée de 0,05 à 20 mg/kg (JOUE, 2013 ; JOUE, 2023).

Finalement, la règlementation des produits à base de prosulfocarbe en Belgique semble assez proche de la règlementation française même si elle s'énonce différemment. Par ailleurs, la notion de « parcelles adjacentes » ne semble pas avoir de définition précise. Nous pouvons également noter une différence dans les adventices ciblées par les produits à base de prosulfocarbe entre les deux pays : en Belgique, pour son usage en céréales, il n'est plus recommandé que pour la gestion de vulpins des champs et jouets du vent résistants à d'autres molécules, tandis qu'il est particulièrement apprécié pour son efficacité sur ray-grass en France. On notera enfin que l'évolution de la règlementation en Belgique semble s'être faite plus en regard du risque de dérive lors de l'application que de la volatilisation du prosulfocarbe post-application.

[34] En France, l'Anses indique d'ailleurs que le persil a été identifié comme particulièrement sensible à la contamination par volatilisation du prosulfocarbe (Anses, 2017).

3.4. Des contaminations qui persistent néanmoins

Malgré les mesures prises en France en 2017 et 2018, des contaminations persistent sur des cultures non cibles et le prosulfocarbe est retrouvé dans certains compartiments environnementaux, notamment dans l'air ambiant. L'évolution des tonnages de prosulfocarbe laisse entrevoir une amplification de telles situations.

A titre d'exemple, les récoltes 2020 de sarrasin biologique de 14 producteurs de la coopérative Biocer ont dû être détruites. Cela représentait 60 tonnes de sarrasin, soit les deux tiers des quantités de sarrasin récoltées cette année par la coopérative. La perte est chiffrée à 80 000 € par la coopérative.
Certains producteurs de cultures non cibles se voient contraints d'avancer leur date de récolte afin de limiter les contaminations. Néanmoins, ce décalage n'est pas toujours possible ; à titre d'exemple, les pommes destinées à la production de cidre se récoltent plus tardivement.
Suite à de telles contaminations, Générations Futures, la FNAB et la coopérative Biocer ont demandé le 15 juin 2021 la suspension de l'autorisation de mise sur le marché des produits à base de prosulfocarbe (FNAB, 2021). En octobre 2021, au moment des désherbages d'automne sur céréales d'hiver, un nouveau communiqué de presse est publié associant la FNAB, Forébio et Générations Futures (FNAB, Générations Futures et Forébio, 2021). Ils annoncent avoir saisi en urgence 12 préfectures de départements afin de demander l'interdiction immédiate de tous les produits à base de prosulfocarbe.

Par ailleurs, Atmo Nouvelle-Aquitaine révèle en juillet 2022 que le prosulfocarbe a atteint en 2021 des niveaux encore jamais observés en France dans l'air au niveau de la Plaine d'Aunis (Charente-Maritime). De manière générale, sa concentration dans l'air en France a augmenté depuis 2019. En 2021 , dans la plaine d'Aunis, elle a atteint en moyenne 20 ng/m^3, ce qui est 7 fois plus élevé que sur les autres sites en grandes cultures de la région pour lesquels des mesures ont été réalisées (Poitiers et Cognaçais). Courant novembre 2021, la concentration en prosulfocarbe dans l'air au niveau de la plaine d'Aunis aurait dépassé 250 ng/m^3 (Atmo Nouvelle-Aquitaine, 2022). Rappelons qu'il n'existe pas à ce jour en France de seuil réglementaire sur la contamination en pesticides dans l'air (Anses, 2020). Suite à cette publication, de nombreux citoyens aux alentours s'inquiètent de l'utilisation importante de cet herbicide et craignent un lien entre ces taux élevés de prosulfocarbe dans l'air et des cancers pédiatriques. Des échanges entre citoyens et agriculteurs se sont organisés. Des élus de l'agglomération de La Rochelle ont par ailleurs réclamé à l'Etat un moratoire sur le prosulfocarbe (Fleury, 2022 ; Babaud, 2022).
Le rapport d'Atmo Nouvelle-Aquitaine a été transmis à l'Anses dans le cadre de la phytopharmacovigilance. Le Sénat rapporte l'avis de l'Anses du 22 juillet 2022 selon lequel l'inhalation d'air ambiant contenant 274 ng/m^3 de prosulfocarbe ne constitue pas une alerte au titre de la pharmacovigilance[35] (Sénat, 2022). Le MASA a demandé à l'Anses de vérifier que l'exposition des habitants à proximité des zones traitées ne conduit pas à des risques pour leur santé.

[35] Selon la réponse du Sénat, cette valeur correspond à la plus haute valeur mesurée dans la plaine d'Aunis ; il conduit à une exposition à 1,05% de la valeur toxicologique de référence du prosulfocarbe.

Ces exemples soulèvent un certain nombre de questions autour de la règlementation cadrant l'utilisation des produits à base de prosulfocarbe en France et sur les contrôles associés. La règlementation actuelle est-elle suffisamment adaptée pour limiter, voire stopper, les contaminations de cultures et la présence de prosulfocarbe dans les différents compartiments environnementaux ? Comment se déroulent les contrôles ? Font-ils le constat du bon respect des règles ?

3.5. Le cas de la plaine d'Aunis

Cette partie a pour objectif de revenir plus en détail sur le cas de la plaine d'Aunis, qui a connu une forte médiatisation durant l'été 2022. L'étude de ce territoire en particulier n'a pas vocation à le pointer du doigt, mais plutôt d'explorer le degré de spécificité de ce dernier. En clair, cette partie est motivée par la question suivante : les concentrations records de prosulfocarbe dans l'air mesurées récemment dans la plaine d'Aunis sont-elles la conséquence d'une utilisation unique du prosulfocarbe (particulièrement intensive, par exemple) en son sein ? Nous avons tout d'abord repris la méthodologie du calcul du niveau de tension local autour du prosulfocarbe (voir ***partie 2.4***), et nous avons mis en évidence les différents codes postaux situés dans la région d'Aunis, de telle sorte à pouvoir les comparer avec le reste des territoires français. Les résultats sont donnés par la ***Figure 10***. Sur cette dernière, on observe que les codes postaux de la région d'Aunis sont plutôt bien distribués selon les deux axes, ce qui témoigne de deux choses. D'une part, l'utilisation du prosulfocarbe n'est pas homogène au sein des différents codes postaux étudiés. D'autre part, la situation de ces derniers, au regard de l'utilisation du prosulfocarbe, ne présente pas de caractère exceptionnel.

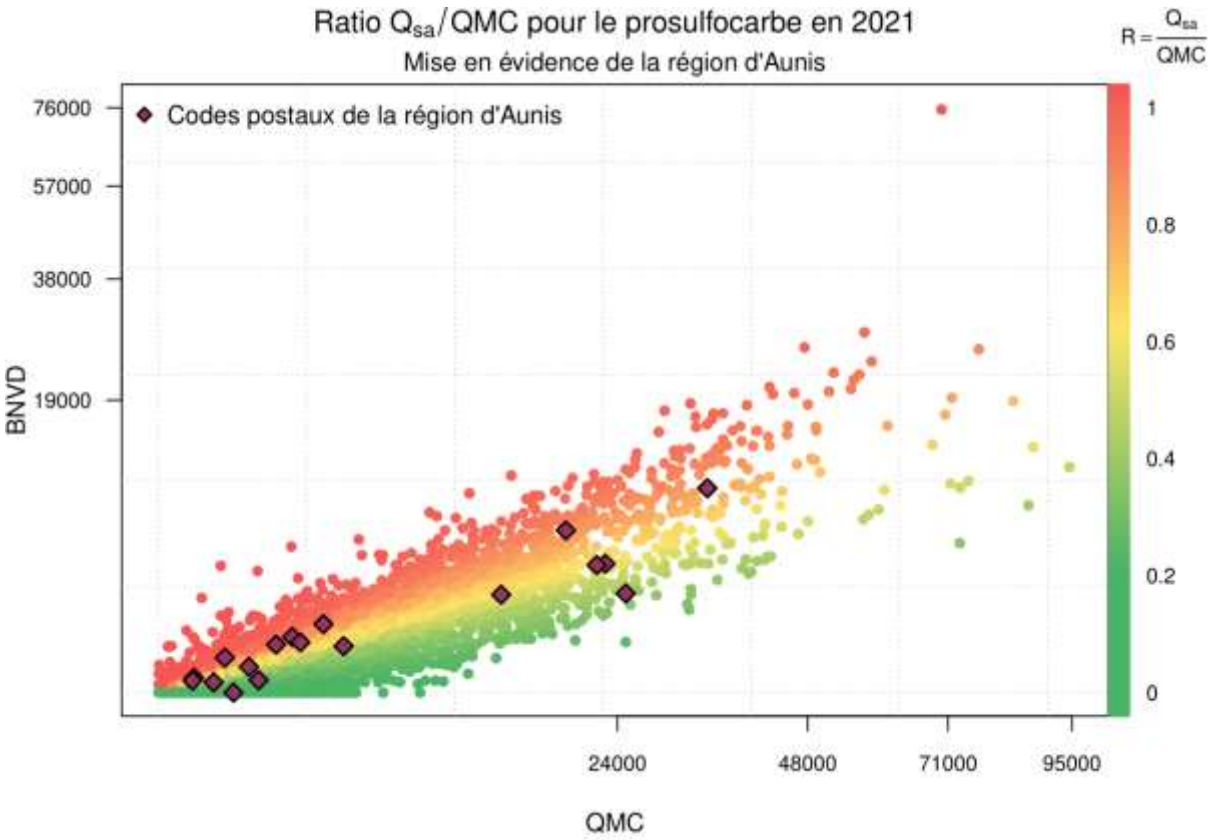
Plus précisément, en rapportant la quantité de prosulfocarbe achetée au sein de la région d'Aunis[36] avec la superficie totale de cette dernière, on constate qu'environ 17,4 kg de prosulfocarbe sont achetés par kilomètre carré en moyenne. A titre de comparaison, sur l'ensemble du territoire national, ce sont en moyenne 12,3 kg de prosulfocarbe au kilomètre carré qui sont achetés. Néanmoins, le degré d'utilisation du prosulfocarbe dans la plaine d'Aunis est inférieur à celui d'autres territoires, comme l'Eure-et-Loir (59.9 kg/km^2), la Somme (53,7 kg/km^2), ou encore l'Oise (49,9 kg/km^2). Au total, plus de 1 300 des codes postaux français présentent une quantité de prosulfocarbe au km^2 moyenne supérieure à celle de la région d'Aunis, soit plus de 20% du territoire national. Par ailleurs, près d'un tiers des codes postaux français présente un niveau de tension (Q_{sa}/QMC) supérieur à celui de la région d'Aunis, soit autant de territoires ayant une utilisation du prosulfocarbe plus intensive selon l'indicateur décrit en ***partie 2.4***.

Ainsi, au vu des indicateurs à notre disposition et présentés dans ce paragraphe, il semble que l'utilisation du prosulfocarbe qui est faite au sein de la région d'Aunis n'en fait pas un territoire particulier par rapport au reste de la France quant aux tonnages appliqués. Par ailleurs, nous n'avons pas moyen de préciser si les conditions pédoclimatiques qui prévalent dans la plaine d'Aunis seraient particulièrement propices à la volatilisation de la molécule. Cela suggère surtout que des situations comparables en termes de niveau d'utilisation du prosulfocarbe existent ailleurs. Afin de préciser le

[36] La région d'Aunis telle que nous l'avons considérée est constituée des codes postaux suivants : 17000, 17140, 17137, 17138, 17139, 17230, 17170, 17540, 17180, 17440, 17690, 17220, 17340, 17290, 17700, 17450, 17870, 17300

caractère singulier ou non de la situation de la plaine d'Aunis, il serait intéressant de disposer d'autres mesures des concentrations en prosulfocarbe dans d'autres territoires. Cela permettrait d'avancer sur le caractère généralisé ou pas de la contamination du compartiment aérien. Par ailleurs, nous ne sommes pas en mesure d'établir un lien entre fortes concentrations de prosulfocarbe et santé humaine. Nous pouvons seulement rappeler les phrases de risques associés aux produits à base de prosulfocarbe présentés en ***partie 2.1.4***.

Figure 10 : Niveau d'utilisation du prosulfocarbe dans les codes postaux de la plaine d'Aunis



Source : Propre élaboration à partir des données 2021 du RPG et RPG AB, de la BNVD (BNVD Traçabilité, 2023) et E-Phy (fichier fournis par l'Anses).

4. Alternatives au prosulfocarbe et impacts technico-économiques de leur mobilisation sur les exploitations agricoles

4.1. Méthodologie

4.1.1. Objectifs et mobilisation des Enquêtes Pratiques culturales

L'objectif de cette partie est d'identifier et de quantifier les impacts d'alternatives à l'utilisation du prosulfocarbe, en termes techniques et économiques pour les exploitations agricoles. Pour cela, nous avons eu recours à l'analyse statistique des bases de données issues des enquêtes Pratiques Culturales[37] (désignées par PK dans la suite de ce rapport), menées par le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA). Selon le SSP, ces enquêtes visent à « reconstituer l'itinéraire technique conduit sur une parcelle culturale, afin de mieux connaître les pratiques et suivre leur évolution ». Réalisées tous les trois à quatre ans, ces enquêtes recueillent un large panel d'informations concernant les itinéraires techniques des agriculteurs, et visent par leur construction et par le nombre de parcelles enquêtées à être représentatives de la Ferme France (Soleilhavoup et Crisan, 2020).
Les enquêtes sont menées par groupes de cultures : grandes cultures, légumes, arboriculture, viticulture, etc. Pour les cultures concernées par le prosulfocarbe, les enquêtes grandes cultures réunissent le blé dur, le blé tendre, l'orge, le triticale et les pommes de terre. Les enquêtes légumes contiennent de plus la culture en plein champ des carottes.
Les données de la dernière enquête en date pour les grandes cultures, menée en 2021, n'étant pas disponibles à la date d'écriture de ce rapport, nous avons utilisé les données issues des enquêtes 2014 et 2017 (Ministère de l'Agriculture, 2014 et 2017). L'évolution récente de l'utilisation du prosulfocarbe en céréales (moins de 10% des parcelles de blé en recevaient en 2014, contre 26% en 2017, et probablement près de 50% aujourd'hui) nous a conduit à écarter les enquêtes plus anciennes.
L'accès aux données des enquêtes pratiques culturales utilisées dans le cadre de ce travail a été réalisé au sein d'environnements sécurisés du Centre d'accès sécurisé aux données – CASD (Réf. 10.34724/CASD). Les règles du secret statistique amènent à ne pas retenir l'information quand le nombre de données sous-jacentes est en-dessous d'un seuil fixé à 3 observations au minimum.

4.1.2. Quatre groupes d'étude

Notre approche a pour objectif d'être en mesure de déterminer l'existence, ou non, d'avantages technico-économiques à l'utilisation du prosulfocarbe, par rapport (i) à un désherbage chimique sans prosulfocarbe mais mobilisant d'autres solutions chimiques, et (ii) à des pratiques culturales se passant des herbicides ou même de tout pesticide, pour chacune des cultures disponibles dans PK. Les parcelles

[37] https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/S-PK%20GC%202021/methodon/

ayant recours à des alternatives non-chimiques pour la gestion des adventices peuvent elles-mêmes être distinguées entre les parcelles certifiées en AB, et les parcelles restant dans une logique conventionnelle. Nous distinguons donc dans nos travaux quatre groupes, définis en fonction des pratiques de désherbage. Le ***Tableau 5*** résume cette approche.

Tableau 5 : Groupes utilisés pour l'analyse des enquêtes PK

	Description	$Q_{prosulfocarbe}$	$IFT_{Herbicides}$	IFT_{Total}
Groupe 1	Ceux qui **utilisent le prosulfocarbe**	> 0	> 0	> 0
Groupe 2	Ceux qui ont des cultures sur lesquelles le prosulfocarbe est autorisé mais qui n'en utilisent pas → **Utilisent un (ou des) autre(s) herbicide(s)**	= 0	> 0	> 0
Groupe 3	Ceux qui n'utilisent pas d'herbicides mais utilisent d'autres pesticides (logique conventionnelle) → **Utilisent des alternatives non chimiques pour le désherbage**	= 0	= 0	> 0
Groupe 4	Ceux qui n'utilisent aucun pesticide chimique → **Inclut majoritairement ceux en AB**	= 0	= 0	= 0

Notons dès à présent que la définition de nos groupes, principalement celle du groupe 2, englobe, mais n'est pas restreinte aux alternatives au prosulfocarbe au sens strict : ainsi, les parcelles du groupe 2 peuvent mobiliser différentes solutions de désherbages chimiques, dépassant potentiellement le cadre du substitut le plus similaire. La définition de ce qu'on pourrait appeler une « alternative chimique directe » à une molécule, ici au prosulfocarbe, est un travail à part entière. Sans apporter ici une proposition exhaustive de définition, nous pouvons citer plusieurs éléments qui nous semble pertinents à prendre en compte : le spectre d'action de la molécule envisagée, ses conditions d'utilisation, éventuellement son coût et ses phrases de risque, etc. Concernant le spectre d'action, comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, un travail de réactualisation des spectres d'action des herbicides autorisés en France est en cours d'élaboration. Le choix des herbicides alternatifs s'est donc surtout concentré sur les programmes de désherbage pratiqués dans des expérimentations dont une ou plusieurs modalités mobilisaient du prosulfocarbe.

Par ailleurs, si la définition des groupes, fondée sur les valeurs d'IFT, est précise sur le papier, sa transcription sur les données l'est parfois un peu moins, notamment en ce qui concerne la distinction des groupes 3 et 4. En pratique, certains produits utilisables en agriculture biologique sont comptabilisés dans le calcul de l'IFT total, ce qui conduit à inclure certaines parcelles en agriculture biologique au sein du groupe 3. Pour les cultures pour lesquelles l'analyse a pu être menée pour les groupes 3 et 4 (blé tendre, orge et triticale), ces parcelles en AB comptabilisées au sein du groupe 3 restent minoritaires (14% en blé tendre, 0% en orge, 2% en triticale). Enfin, une partie des parcelles du groupe 4 ne se déclare pas en agriculture biologique, malgré une absence totale de traitement et une conduite très similaire aux parcelles en AB, et ne bénéficient donc pas des prix de vente de la récolte

supérieurs. Cela concerne 14% des situations[38] en blé tendre, 16% en orge, 46% en triticale. Pour ce dernier, cela inclut la production de triticale pour l'autoconsommation sur une exploitation orientée par l'élevage.

4.1.3. Méthodologie des scores de propension

Afin de correctement estimer l'impact technico-économique des pratiques, il est nécessaire de s'assurer de ne comparer que ce qui est comparable, et de ne pas imputer des différences intergroupes à l'utilisation du prosulfocarbe, quand ces différences pourraient en réalité dépendre d'autres facteurs 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 (*par ex.*. le rendement) et sur la ou les variables explicatives (en l'occurrence, l'utilisation de prosulfocarbe). En pratique, ces facteurs peuvent fausser la relation de cause à effet que l'on cherche à étudier, et sa non-prise en compte génère un biais important lors de la comparaison directe des résultats moyens de différents groupes (Smith, 2002). Typiquement, la présence d'une forte infestation de vulpin sur une parcelle va, à la fois accroitre la probabilité de voir le rendement baisser si l'infestation n'est pas maitrisée et augmenter la probabilité de recourir au prosulfocarbe. Si on ne retirait pas cet effet confondant on risquerait de conclure que le prosulfocarbe est statistiquement relié à des baisses de rendement alors que les deux grandeurs sont sous l'impact d'une tierce variable qui les oriente. Pour corriger ce biais, 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 propension[39] (Rosenbaum, 1983 ; Hirano, 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), ainsi que pour l'analyse de l'impact des alternatives au S-métolachlore (Reboud *et al.*, 2022). La méthodologie employée ici étant précisément similaire à celle employée dans ces travaux sur les alternatives au S-métolachlore (Reboud *et al.*, 2022), seuls les principes généraux seront exposés ici, et le lecteur souhaitant en consulter les détails est invité à parcourir ledit document.

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 prosulfocarbe, et groupe 2 – alternatives chimiques) 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. La pondération est effectuée en affectant un poids fort aux parcelles d'un groupe identifiées comme étant dans des conditions statistiquement similaires à celles des parcelles du second groupe. De ce fait, les parcelles trop atypiques, ou trop peu comparables aux conditions du groupe opposé, ne pèseront que très peu dans l'estimation, voire en seront exclues. La méthode permet ainsi d'estimer l'ATE (*Average Treatment Effect*), soit la différence des moyennes

[38] Ces parcelles ne sont pas non plus en conversion

[39] 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 4*** pour plus de détails).

pondérées des deux groupes, en se rapprochant autant que possible d'une situation « toutes choses égales par ailleurs » vis-à-vis des facteurs confondants. En pratique, nous estimons également son écart-type, ainsi qu'un seuil de significativité de ce dernier, via des méthodes de *bootstrap* (Davison & Hinkley, 1997).
Les facteurs confondants utilisés pour calculer les scores de propension, dont le détail est donné en ***Annexe 3***, sont :

- L'année de la campagne
- La taille de l'exploitation ainsi que celle de la parcelle (variable PK)
- Le type d'exploitation (grande culture, élevage, etc., variable PK)
- Le niveau de pression adventice sur la parcelle (variable PK)
- L'origine des semences (certifiées ou non, variable PK)
- L'apport total en azote (variable PK)
- Les trois cultures précédentes (variables PK)
- Des variables météorologiques (moyennes annuelles, agrégées à l'échelle de la commune). 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, 2016) et chimiques (Ballabio, 2019) (moyennées à l'échelle de la commune, données issues de l'ESDAC (Panagos, 2012)).
- Typologie de la ruralité (description de la situation socio-économique de la ruralité, à l'échelle de la commune (Hilal *et al.*, 2022)).

Enfin, comme PK est construit avec un objectif de représentativité, chaque parcelle se voit associer un coefficient d'extrapolation, donnant en quelque sorte son degré de représentativité de la ferme France. Ce coefficient d'extrapolation est intégré à la méthode d'estimation de l'ATE par score de propension.

4.1.4. Construction d'indicateurs économiques pour les données PK

Les principaux avantages des données PK sont le volume des données, la visée représentative de la ferme France, ainsi que la richesse de la description des itinéraires techniques sur les parcelles. En revanche, les données PK ne contiennent aucune description des résultats économiques des parcelles enquêtées. Afin de mener à bien ce travail, il a donc été nécessaire de « reconstruire » les résultats économiques à partir des itinéraires techniques décrits. En parallèle du travail réalisé pour le rapport INRAE sur le glyphosate (Carpentier *et al.*, 2020), l'approche utilisée dans le présent rapport a fait l'objet d'une note méthodologique à part entière, publiée en parallèle de cette étude. Le lecteur intéressé par les détails pourra se tourner vers ladite note.
Trois types d'indicateurs économiques sont calculés à partir des descriptions techniques des parcelles : le chiffre d'affaires lié à la vente de la production agricole (produit brut), les charges liées à l'utilisation de différents types d'intrants au cours de la campagne (charges opérationnelles), et les charges liées à la réalisation même des actions via l'utilisation d'outils mécanisés (charges de mécanisation). La déduction des différentes charges du produit brut permet d'obtenir la marge nette associée à la

parcelle[40]. Nous avons travaillé avec un niveau de détail assez fin : par exemple, il est possible de préciser les charges associées à chaque composante des charges opérationnelles (irrigation, fertilisation, produits phytosanitaires, etc.). Dans les résultats présentés ci-après, le détail de chacun des postes de dépense ne sera pas donné, afin de ne pas alourdir des tableaux déjà denses. Pour la construction des indicateurs économiques, des référentiels de prix correspondant à une année précise ont été utilisés ; il s'agit des référentiels utilisés par Agrosyst, système d'information associé au réseau des 3000 fermes DEPHY. L'année retenue est 2020 : c'est l'année la plus récente pour laquelle les référentiels étaient à jour. Une analyse de sensibilité a par ailleurs été conduite (voir ***partie 4.4***) afin d'étudier l'impact de contextes de prix différents, dont le contexte inflationniste de 2022. La construction des indicateurs économiques repose également sur des barèmes d'entraide agricole ; nous avons utilisé le barème d'entraide 2020-2021 produit par les CUMA Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne-Rhône-Alpes (CUMA AURA, 2021) ainsi qu'un barème publié par l'APCA cette même année (APCA, 2021).

Enfin, l'enquête PK 2014 en grandes cultures n'était pas une enquête pratique culturale proprement dite, mais une enquête sur les pratiques phytosanitaires. Si des informations précises concernant ces dernières y sont présentes, il n'y a pas d'informations exhaustives à propos du passage d'outils mécaniques. Les résultats économiques sont ainsi calculés sur la seule base de l'enquête 2017.

4.1.5. Exemple de lecture des résultats de l'analyse

Dans ce qui suit, tous les résultats d'analyse partagent le même format. Ces derniers sont présentés sous la forme de tableaux comparant les valeurs moyennes (pondérées, estimées selon la méthodologie présentée ci-dessus) d'un certain nombre d'indicateurs entre deux groupes de parcelles. En plus des moyennes et de leur différence (l'ATE), l'écart-type de l'estimation et une indication quant à la significativité statistique de la différence sont donnés. Un exemple (fictif) type de représentation des résultats pour une culture donnée est donné par le ***Tableau 6***.

Tableau 6 : Exemple fictif de tableau de résultats des analyses technico-économiques pour une culture donnée

	Nombre de parcelles	Rendement (q/ha)	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe A	n_A	85,00	2,30	5,01	1 350,00	600,00
Groupe B	n_B	72,00	1,70	5,20	1 280,00	586,00
ATE		13,00	0,60	-0,19	70,00	14,00
Ecart-type		2,35	0,09	0,11	32,00	25,00
Significativité		**	***	.	*	ns

Dans ce tableau, les deux premières lignes donnent les estimations des moyennes de chaque groupe, la troisième donne l'ATE (*Average Treatment Effect*, la différence des moyennes), la quatrième donne l'écart-type de l'ATE, et la cinquième donne la significativité de celui-ci. La significativité est ici définie

[40] On peut trouver une diversité importante de définition pour chaque indicateur économique. Nous conseillons le lecteur de se référer à la note méthodologique (Fayolle *et al.*, 2023) pour identifier les définitions que nous avons adoptées dans le cadre de ce travail.

selon une p-value obtenue par bootstrap (Davison & Hinkley, 1997), soit la probabilité que la valeur de l'un soit contenue dans la distribution de l'autre valeur. Dans cet exemple, le groupe A présente un rendement moyen de 85 q/ha, soit 13 q/ha de plus que le groupe B et il n'y a que moins de 1% de chance que les valeurs 85 et 72 appartiennent à la même distribution. Plutôt que de présenter les résultats de manière binaire (différence significative/non significative), approche critiquée dans la littérature statistique (Muff *et al.*, 2022), nous avons choisi de donner le niveau de confiance de l'effet estimé (confiance forte dans l'effet suspecté, confiance faible dans l'effet suspecté, absence d'effet suspecté). Dans notre exemple, cela se traduit par une confiance relativement élevée dans l'existence d'un effet de la pratique étudiée sur le rendement suggéré par l'analyse. Cette confiance dans l'effet, ainsi que sa direction (en faveur de quel groupe ?) sont symbolisées par un code couleur. Le vert indique que l'analyse suggère une moyenne supérieure dans le groupe correspondant, inversement pour l'orange. Le gris indique que l'analyse ne permet pas de montrer l'existence d'une différence significative. Enfin, l'intensité des couleurs donne la confiance dans l'effet, comme résumé dans le ***Tableau 7*** ci-dessous.

Tableau 7 : Code couleur de la confiance dans les effets estimés

Interprétation	p-value	Code de significativité
Confiance très forte	$[0 ; 0.001[$	***
Confiance forte	$[0.001 ; 0.01[$	**
Confiance modérée	$[0.01 ; 0.05[$	*
Confiance faible	$[0.05 ; 0.1[$	.
Pas d'effet suspecté	$[0.1 ; 1]$	ns

4.2. Alternatives chimiques

Nous avons commencé par analyser l'impact de la mobilisation des alternatives chimiques au prosulfocarbe. Cette première partie de l'analyse se décompose en deux temps. Tout d'abord, nous comparons les parcelles du groupe 1 à celles du groupe 2. Cette analyse permet de donner une vue d'ensemble, et de détecter des tendances générales liées à l'utilisation spécifique du prosulfocarbe, par rapport à tous les autres herbicides. Nous y analyserons les cultures de blé tendre, blé dur, orge, triticale et pomme de terre. Pour la pomme de terre, nous n'avons pas distingué les différentes destinations pouvant exister, telles que pour la consommation, pour l'industrie féculière, ou encore pour la production de plants afin de maximiser les effectifs retenus. Dans les enquêtes pratiques

culturales en grandes cultures de 2017, 13% des parcelles de pomme de terre indiquaient comme destination la production de plants, 75% la consommation (frais ou industrie) et 11% la féculerie.
Dans un second temps, nous chercherons à préciser la notion d'alternative chimique, en comparant les parcelles traitées au prosulfocarbe à celles recevant une ou plusieurs molécules considérées comme des substituts plus ou moins directs au prosulfocarbe ; nous avons identifié ces derniers à la fois dans la littérature et à travers divers échanges que nous avons eus. Ces molécules seront différentes pour les cultures de céréales d'hiver et pour les pommes de terre.

4.2.1. Groupe 1 vs. Groupe 2

4.2.1.1. Blé tendre

Dans les enquêtes PK, les parcelles de blé tendre sont très majoritairement semées à l'automne, et correspondent donc à un blé tendre d'hiver. Un grand nombre d'entre elles sont disponibles dans les données 2014 et 2017, principalement réparties dans les groupes 1 et 2. Toutefois, comme vu précédemment, la part des surfaces traitées au prosulfocarbe y est plus faible qu'actuellement (moins de 10% en 2014, 26% en 2017, contre probablement autour de 50% aujourd'hui).
L'analyse ne permet pas de mettre en évidence des différences de rendement, ou d'ordre économique, importantes entre les parcelles traitées au prosulfocarbe et celles recevant d'autres herbicides chimiques. L'analyse suggère l'existence d'un effet sur le nombre de passages de désherbage mécanique, plus faible dans le groupe 1, et sur les charges opérationnelles, plus élevées dans le groupe 1. Cet effet sur les charges opérationnelles est porté par des coûts liés aux produits phytosanitaires légèrement plus élevés dans le groupe 1, mais sa force reste assez faible. L'analyse met en évidence une corrélation[41] forte entre traitement au prosulfocarbe et IFT, herbicide ou total, tous deux sensiblement plus élevés dans le groupe 1. Une hypothèse est que les parcelles traitées au prosulfocarbe le sont en raison d'un niveau d'infestation plus élevé, nécessitant de fait plus de traitements afin d'arriver à un niveau jugé satisfaisant par l'agriculteur. En théorie, on se prémunie de ce biais en incluant dans les facteurs confondants le niveau de pression adventice constaté par ce dernier (voir ***Annexe 3***). Toutefois, cette donnée est limitée, dans la mesure où elle est de l'ordre du ressenti (pas de mesure objective). Une pression jugée forte par un agriculteur pourra être jugée différemment par un autre. Par ailleurs, pour des parcelles traitées en prélevée de manière quasi systématique, cette donnée renseigne en réalité le niveau de pression adventice conditionné par le traitement. Idéalement, il serait nécessaire d'accéder au niveau de pression adventice en l'absence de traitement. A notre connaissance, cette donnée n'existe pas[42]. Cette prise en compte potentiellement imparfaite de la flore adventice dans les facteurs confondant constitue une limite de l'approche que les effectifs considérés peuvent en partie compenser, de même que la prise en compte d'autres facteurs (météorologiques, pédologiques, rotations, etc.). Le ***Tableau 8*** ci-dessous donne l'ensemble des résultats.

[41] Nous attirons ici l'attention du lecteur : le terme corrélation est employé dans ce rapport au sens statistique du terme. Il indique une variation conjointe entre deux variables mais ne dit rien sur l'existence ou non d'un lien de causalité directe entre ces variables.
[42] C'est même pour cette raison que l'on inclut systématiquement une modalité de témoin non désherbé dans les essais

Tableau 8 : Analyse technico-économique pour le groupe 2 en blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées (ha)	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	498	1 516 413	77,73	0,01	2,14	5,69	1 398,83	432,02	366,24	600,57
Groupe 2	2 777	5 950 326	76,63	0,02	1,74	5,13	1 380,36	401,80	362,38	616,17
ATE			1,10	- 0,02	0,40	0,56	18,47	30,21	3,86	- 15,60
Ecart-type			1,38	0,01	0,07	0,13	27,41	13,11	6,54	31,77
Significativité			ns	*	***	***	ns	*	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.2.1.2. Blé dur

A l'instar du blé tendre, la grande majorité des parcelles de blé dur présentes dans PK sont semées à l'automne. Le blé dur de printemps est très peu pratiqué. Conformément à l'objectif de représentativité de PK, les parcelles de blé dur enquêtées représentent de moindres surfaces qu'en blé tendre. De manière analogue au blé tendre, la part des surfaces recevant du prosulfocarbe en blé dur a largement augmenté entre 2014 et 2017 ; on peut supposer qu'elle a continué d'augmenter par la suite.

L'analyse suggère l'existence d'une corrélation entre utilisation du prosulfocarbe et rendement, ce dernier étant légèrement plus élevé dans le groupe 1 (+2,56 q/ha en moyenne, soit 4,28% de plus que le groupe 2). Cet effet se répercute logiquement sur le produit brut (+64,92 €/ha en moyenne, soit +4 ,4%). Toutefois, l'effet suggéré ici est faible, tout comme la confiance en ce dernier, et son interprétation devrait inciter à la prudence. D'autant plus que l'analyse ne permet pas de mettre en évidence des résultats économiques différents entre les deux groupes, au-delà du produit brut. Enfin, et à l'instar du blé tendre, l'analyse met en évidence une corrélation très forte entre utilisation de prosulfocarbe et IFT total et herbicide, tous deux sensiblement plus forts dans le groupe 1. Les résultats sont donnés par le ***Tableau 9***.

Tableau 9 : Analyse technico-économique pour le groupe 2 en blé dur

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	131	58 382	62,35	0,01	2,08	5,50	1 539,10	446,09	371,48	721,54
Groupe 2	628	234 388	59,79	0,04	1,61	4,64	1 474,18	427,81	366,90	679,47
ATE			2,56	- 0,02	0,47	0,86	64,93	18,28	4,58	42,07
Ecart-type			1,52	0,02	0,11	0,22	38,83	24,77	8,01	35,43
Significativité			.	ns	***	***	.	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.2.1.3. Orge

Comme pour le blé, la majorité des parcelles d'orge recensées dans PK ont été semées en automne. L'orge de printemps est bien plus rare. Un grand nombre de parcelles d'orge sont disponibles, et ces dernières représentent de grandes surfaces à l'échelle nationale. A l'instar du blé, la part des surfaces en orge ayant reçu du prosulfocarbe a augmenté entre 2014 et 2017 ; on peut supposer qu'elle a continué à augmenter depuis.

L'analyse ne met pas en évidence un quelconque effet fort, quel que soit l'indicateur considéré. En d'autres termes, elle n'indique aucune différence marquée entre les deux groupes. Quelques effets faibles sont toutefois détectés : le nombre de désherbage mécanique ainsi que les charges de mécanisation, légèrement supérieures dans le groupe 2, et l'IFT herbicide, supérieur dans le groupe 1. Ces différences étant peu marquées, leur interprétation invite à être prudent sur l'interprétation à lui accorder. Le ***Tableau 10*** ci-dessous présente les résultats.

Tableau 10 : Analyse technico-économique pour le groupe 2 en orge

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	301	209 267	67,50	0,01	2,09	5,04	1 209,40	373,95	369,52	465,92
Groupe 2	1 850	1 397 393	65,97	0,03	1,77	4,55	1 204,07	372,75	380,01	451,32
ATE			1,53	- 0,02	0,32	0,49	5,32	1,20	- 10,48	14,61
Ecart-type			1,83	0,01	0,19	0,36	38,74	12,17	6,31	43,16
Significativité			ns	.	.	ns	ns	ns	.	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.2.1.4. Triticale

Dernière des céréales pouvant recevoir du prosulfocarbe et enquêtée dans PK, le triticale est lui aussi majoritairement semé en automne. Il représente de moindres surfaces que le blé et l'orge, et reçoit du prosulfocarbe dans des proportions proches de celles de l'orge et inférieures à celles du blé.
L'analyse technico-économique suggère un certain nombre de différences plus ou moins marquées entre les deux groupes. D'une part, les parcelles traitées au prosulfocarbe présentent un IFT herbicide et un IFT total sensiblement supérieurs à ceux des parcelles recevant d'autres herbicides (chacun proche de +0,5 traitement). D'autre part, l'analyse met en évidence une corrélation[43] entre appartenance au groupe 1 et hausse de rendement (+2,55 q/ha en moyenne). Ces rendements plus élevés entraînent un produit brut et une marge nette supérieure (+ 46 €/ha). L'effet, suffisamment fort pour être relevé, présente un niveau de confiance modéré (p-value entre 0,01 et 0,05). Le ***Tableau 11*** résume les résultats obtenus.

Tableau 11 : Analyse technico-économique pour le groupe 2 en triticale

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	381	54 422	57,54	0,01	1,75	3,51	1 058,66	343,78	343,49	371,39
Groupe 2	1 320	166 065	54,99	0,02	1,32	2,99	1 011,94	352,16	334,60	325,19
ATE			2,54	- 0,01	0,43	0,52	46,71	- 8,37	8,89	46,20
Ecart-type			1,82	0,01	0,06	0,10	19,84	12,94	5,17	23,62
Significativité			*	ns	***	***	*	ns	.	*

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).
Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

[43] Rappel : Nous attirons ici l'attention du lecteur : le terme corrélation est employé dans ce rapport au sens statistique du terme. Il indique une variation conjointe entre deux variables mais ne dit rien sur l'existence ou non d'un lien de causalité directe entre ces variables.

4.2.1.5. Pomme de terre

A l'inverse des céréales d'hiver, la part des surfaces en pomme de terre traitées au prosulfocarbe est relativement stable dans le temps ces dernières années, aux alentours des 65%.

Par ailleurs, l'analyse ne permet pas de conclure sur l'existence de liens forts entre utilisation de prosulfocarbe et les différents indicateurs estimés, tels que le rendement ou les performances économiques, à l'exception de l'IFT herbicide qui est sensiblement plus élevé dans les parcelles du groupe 1. Le ***Tableau 12*** expose le détail des résultats.

Tableau 12 : Analyse technico-économique pour le groupe 2 en pomme de terre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (t/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	1 133	181 533	52,31	0,14	2,47	17,95	5 026,16	2 014,38	992,18	2 019,60
Groupe 2	501	110 025	50,90	0,17	2,21	17,28	5 008,83	1 929,23	979,09	2 100,51
ATE			1,42	- 0,03	0,26	0,67	17,33	85,15	13,09	- 80,91
Ecart-type			1,82	0,04	0,08	0,48	143,59	62,07	16,39	177,27
Significativité			ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.2.2. Zoom sur quelques alternatives chimiques

Dans toute cette partie du rapport, nous avons estimé l'effet de l'utilisation du prosulfocarbe par rapport à ses alternatives chimiques en comparant les parcelles en recevant (groupe 1) avec celles recevant d'autres herbicides (groupe 2). L'intérêt d'une telle approche est d'isoler des effets potentiels du prosulfocarbe par rapport à un ensemble d'autres solutions, ici chimiques. En revanche, si le groupe 2 englobe un certain nombre d'alternatives chimiques plus ou moins directes au prosulfocarbe, il n'est pas limité à ces dernières. C'est pourquoi nous nous attachons dans cette ***partie 4.2.2*** à restreindre l'analyse, en comparant les parcelles traitées au prosulfocarbe à des parcelles traitées spécifiquement avec une ou des alternatives préalablement ciblées.

Ces potentielles alternatives chimiques ont été identifiées sur la base des retours du terrain que nous avons eus lors de réunions de travail avec des experts des chambres d'agriculture ou de coopératives, ainsi que sur la base de la littérature. Nous avons notamment étudié le spectre d'efficacité d'un certain nombre de molécules sur une sélection d'adventices dans les guides grandes cultures 2022 des chambres d'agriculture, ou bien dans les fiches techniques des produits. Les principales alternatives identifiées sont différentes en céréales et en pomme de terre :

- Pour les céréales (blé, orge, triticale), les principales molécules identifiées pour leur potentiel de subsidiarité au prosulfocarbe sont le flufénacet, le diflufénican, la pendiméthaline et le chlortoluron. Dans les faits, ces molécules sont souvent utilisées en association, à l'exception du chlortoluron. Malgré un spectre partiellement différent (peu d'efficacité sur les stellaires et les véroniques), le pyroxsulame associé à un phytoprotecteur, le cloquintocet-méxyl, est parfois mentionné.
- Pour la pomme de terre, les molécules les plus régulièrement citées sont la métribuzine, et son association avec le flufénacet, ainsi que le métobromuron et le rimsulfuron appliqué en post-levée. En cas de faible infestation par des graminées, la clomazone est également mentionnée. En raison de sa forte mobilisation par les agriculteurs, nous avons également inclus l'aclonifen dans l'analyse.

Le ***Tableau 13*** donne les spectres d'efficacité des principales molécules et associations identifiées en comparaison au prosulfocarbe, pour une sélection d'adventices, en céréales et en pomme de terre. Certaines de ces molécules sont plutôt des molécules de rattrapage ; elles ne s'appliquent donc pas nécessairement en prélevée comme le prosulfocarbe. Le caractère de « substitut direct » au prosulfocarbe reste ainsi discutable pour certaines molécules, pour cette raison ou pour d'autres – nous n'avons pas comparé par exemple le prix de chaque produit ni leurs conditions d'utilisation. Nous avons tout de même étudié cette liste au vu de leur apparition récurrente dans nos échanges ainsi que dans la littérature grise.

Nous avons alors appliqué la méthodologie décrite en ***partie 4.1*** pour comparer les parcelles recevant du prosulfocarbe aux parcelles ayant reçu l'alternative. Nous avons systématiquement exclu de l'analyse les parcelles recevant à la fois du prosulfocarbe et l'alternative considérée (flufénacet par exemple). Ce travail a été effectué pour le flufénacet, la pendiméthaline, et le chlortoluron en blé et en orge, le pyroxsulame en blé, ainsi que pour la métribuzine, l'aclonifen, la clomazone et le rimsulfuron en pomme de terre. Les autres molécules citées (métobromuron) ou les autres cultures (blé dur, triticale) conduisaient à des effectifs trop faibles pour être analysées. Nous donnerons dans cette partie une synthèse des résultats obtenus, donnée par le ***Tableau 14***, et le détail des tableaux de résultats est donné en ***Annexe 5***. Dans le premier, une case verte indique un effet en faveur des parcelles traitées au prosulfocarbe, et inversement pour une case orange. L'intensité de la couleur

donne la confiance dans l'effet. Pour l'IFT, nous avons considéré qu'une baisse était un effet positif. En pratique, cela dépend de la gravité de la situation à régler et de la dangerosité des produits utilisés.
Dans l'ensemble et au vu des indicateurs disponibles, il n'existe que peu de différences technico-économiques marquées entre les parcelles recevant du prosulfocarbe et celle recevant une ou plusieurs des molécules mentionnées plus haut. Les seules différences réellement marquées sont observées pour l'utilisation de pyroxsulame en blé tendre ainsi que d'aclonifen en pomme de terre. Dans le premier cas, les parcelles traitées au prosulfocarbe présentent un meilleur rendement, mais de plus forts IFT, ainsi que des charges de mécanisation supérieures. Dans le second, les parcelles traitées à l'aclonifen présentent un rendement légèrement supérieur, ainsi qu'une marge nette largement supérieure, malgré une confiance modérée dans la force de l'effet.

Tableau 13 : Spectres d'efficacité de différentes molécules et associations en céréales et pomme de terre

		Céréales								Pomme de terre					
	Adventice	**Prosulfocarbe**	**Chlortoluron**	**Pyroxulame + cloquintocet-méthyl ***	**Flufénacet**	**Flufénacet + diflufénican ****	**Flufénacet + diflufénican + aclonifen *****	**Flufénacet + picolinafen**	**Flufénacet + pendiméthaline**	**Pendiméthaline + diflufénican**	**Adventice**	**Prosulfocarbe**	**Métribuzine**	**Flufénacet + métribuzine**	**Rimsulfuron**	**Clomazone**	**Métobromuron**
Graminées	Agrostis										Agrostis						
	Pâturin annuel										Pâturin annuel						
	Ray-grass										Ray-grass						
	Vulpin										Vulpin						
Dicotylédones	Géraniums										Fumeterre						
	Stellaire										Morelle noire						
	Véroniques										Capselle						
	Gaillet										Gaillet						
	Pensées										Mercuriale annuelle						
	Bleuet										Séneçon						
	Coquelicots										Sanve						
	Matricaires										Matricaires						
	Chardons										Datura stramoine						
	Liserons										Véroniques						

** Non homologué en orge*
*** Non homologué en blé dur*
*** Homologué uniquement en blé tendre*
Source : Guide des grandes cultures 2022 de la chambre d'agriculture d'Alsace ; Mamarot et Rodriguez (2003) ; fiches techniques des produits.
Note : Vert : efficacité forte ; jaune : efficacité moyenne ; orange : efficacité faible ; rouge : efficacité nulle ; blanc : manque d'information

Tableau 14 : Synthèse des différences significatives pour les indicateurs technico-économiques entre le prosulfocarbe et ses alternatives potentielles

Culture	Alternative	Rendements	IFT herbicide	Charges opérationnelles	Charges de mécanisation	Marge directe
Blé tendre	Chlortoluron	NS	NS	+ 28,84 €/ha	NS	NS
Orge	Chlortoluron	NS	NS	NS	NS	NS
Blé tendre	Flufénacet	NS	NS	NS	NS	NS
Orge	Flufénacet	NS	NS	NS	NS	NS
Blé tendre	Pendiméthaline	NS	NS	NS	NS	NS
Orge	Pendiméthaline	NS	NS	NS	NS	NS
Blé tendre	Pyroxsulame	+ 4,28 q/ha	+ 0,5	NS	+ 20,35 €/ha	NS
Pomme de terre	Aclonifen	- 2,42 q/ha	NS	NS	NS	- 404,11 €/ha
Pomme de terre	Rimsulfuron	NS	NS	NS	NS	NS
Pomme de terre	Clomazone	NS	NS	NS	NS	NS
Pomme de terre	Métribuzine	NS	0,27	NS	NS	NS

Source : propre élaboration à partir des données des enquêtes PK Grandes cultures 2014 et 2017.
NS : non significatif

A la lecture de ces résultats, il semblerait qu'une hypothétique restriction du prosulfocarbe pourrait entrainer un report sur les associations à base de flufénacet et/ou de pendiméthaline pour les céréales d'hiver. Les associations flufénacet-diflufénican ou pendiméthaline-diflufénican présentent en effet un spectre d'efficacité proche de celui du prosulfocarbe, et l'analyse menée ne permet pas d'identifier de surcoût ou de contrainte technique significative à l'utilisation de telles associations par rapport à celle du prosulfocarbe. Le report pourrait aussi s'effectuer sur le chlortoluron dans des parcelles sans géraniums, véroniques ou gaillet, pour lequel l'analyse ne permet pas non plus d'identifier de surcoût ; mais il pourrait être freiné par des conditions d'utilisation plus strictes, notamment sur sols drainés. Un report partiel sur le pyroxsulame associé au cloquintocet-mexyl est également envisageable en l'absence de stellaire et de véroniques. En pomme de terre, il est probable qu'un report se fasse sur la métribuzine, et en particulier sur son association avec le flufénacet. Le rimsulfuron pourra aussi être mobilisé en post-levée. Un report partiel sur le métobromuron est plus difficile à anticiper, en raison des trop faibles effectifs dans les données à disposition, mais semble plausible au vu de la récente dynamique de la molécule. La clomazone pourra également être mobilisée, en l'absence de graminées telles que ray-grass ou vulpin. Enfin, il nous est difficile d'évaluer la probabilité de report sur l'aclonifen : si les parcelles traitées avec ce dernier présentent de meilleurs rendements et de meilleures marges, le degré de couverture apporté par son spectre d'efficacité nous incite à la prudence.

Il apparaît par ailleurs essentiel de mettre en perspective ces possibles reports avec la situation des molécules concernées. Comme évoqué précédemment, un certain nombre d'entre elles sont aujourd'hui candidates à la substitution. Leur avenir est donc incertain.

4.2.3. Synthèse

La comparaison des parcelles traitées au prosulfocarbe à celles employant des alternatives chimiques ne montre pas de différence technico-économique majeure ou généralisée, hormis à propos des IFT totaux et herbicides, et malgré des différences ponctuelles. Plus précisément, en céréales d'hiver, l'utilisation de prosulfocarbe est associée à une hausse des IFT totaux et herbicides, gravitant généralement autour de +0,4/+0,5. Cette hausse résulte peut-être d'une application plus systématique de prosulfocarbe lorsque les parcelles sont particulièrement 'sales' ; ou bien le prosulfocarbe est généralement employé dans le cadre de programmes herbicides plus intenses. Ceci reste des hypothèses que nous ne pouvons pas valider. En triticale uniquement, l'utilisation de prosulfocarbe est liée à de plus forts rendements, entraînant une hausse de la marge directe, de l'ordre de +46 €/ha[44]. En pomme de terre, l'analyse ne met pas en évidence de corrélation marquée entre les indicateurs étudiés et l'utilisation de prosulfocarbe, hormis pour l'IFT herbicide, qui augmente.

Une comparaison plus précise à des alternatives ciblées au préalable suggère qu'une potentielle interdiction du prosulfocarbe se traduirait probablement par un report sur un nombre restreint de molécules qui sont déjà largement mobilisées. En céréales, l'alternative la plus probable est le flufénacet et ses associations, principalement le diflufénican et la pendiméthaline, ou encore l'aclonifen en blé tendre. Des associations entre pendiméthaline et diflufénican sont également à anticiper. De telles associations, au spectre d'efficacité proche de celui du prosulfocarbe sont déjà largement employées par les agriculteurs, et ne sont pas corrélées à un surcoût ou une baisse de rendement par unité de surface. D'autres alternatives pourront être mobilisées dans des situations plus spécifiques (chlortoluron en sols non drainés par exemple).

En pomme de terre, la mobilisation d'alternatives chimiques paraît plus restreinte, et gravite autour de la métribuzine et de ses associations Un report sur le métobromuron est envisageable, au vu du spectre et des retours de terrain, en situations de faible infestation par les ray-grass ou le vulpin, mais n'a pas pu être analysé au vu des trop faibles effectifs. Dans les situations permettant le désherbage de post-levée, il semble que le Rimsulfuron pourrait absorber une partie du report. Enfin, la clomazone, déjà largement mobilisée, pourrait l'être encore plus dans les situations de faible infestation par des graminées.

Pour clore cette partie, il est bon de rappeler que les alternatives potentielles mentionnées présentent elles aussi leurs propres limites : la métribuzine, le chlortoluron, le flufénacet, le diflufénican et l'aclonifen sont tous listés comme candidats à la substitution par les règlements européens[45], et leur avenir est donc incertain. De manière plus générale, toutes les molécules mentionnées dans cette partie présentent un montant de redevance pour pollution diffuse (RPD) supérieur ou égal à celui du prosulfocarbe, comme le montre le ***Tableau 15*** (RPD qui, par construction, peut refléter une gradation du niveau de dangerosité des molécules). De même, les mentions de danger du prosulfocarbe sont partagées par plusieurs autres molécules.

Enfin, le diflufénican et le flufénacet sont déjà en situation de forte tension sur le territoire national, comme le montre la ***Figure 6***, en étant respectivement premier et troisième dans le classement des molécules des céréales d'hiver et de la pomme de terre les plus en tension, devant le prosulfocarbe.

[44] En blé dur aussi, l'utilisation du prosulfocarbe est corrélée à une hausse de rendement. Néanmoins, cela n'entraine pas de différence de marge nette.

[45] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0408&from=EN

Accroitre encore leur mobilisation, ne peut que renforcer le risque de voir émerger des résistances à ces molécules.

Tableau 15 : Montant de RPD des principales alternatives chimiques au prosulfocarbe ciblées

Substance active	Statut	Montant de RPD (€/kg)	Mentions de danger[46]
Prosulfocarbe		3	H302 ; H317 ; H411
Picolinafen		3	-
Rimsulfuron		3	-
Clomazone		3	-
Métribuzine	Candidat à la substitution	3	H302 ; H400 ; H410
Diflufénican	Candidat à la substitution	3	H412
Flufénacet	Candidat à la substitution	3	H302 ; H317 ; H373 ; H400 ; H410
Métobromuron		9	-
Aclonifen	Candidat à la substitution	9	H317 ; H351 ; H400 ; H410
Chlortoluron	Candidat à la substitution	9	H351 ; H361d ; H400 ; H410
Pendiméthaline	Candidat à la substitution	11,5	H317 ; H400 ; H410

Source : propre élaboration à partir des données de la EU Pesticide Database, de l'arrêté du 22 décembre 2022 établissant la liste des substances par catégorie de RPD[47], et de l'article L. 213-10-8 du code de l'environnement[48].

4.3. Alternatives non chimiques

Tout comme pour les alternatives chimiques, l'analyse des alternatives non-chimiques sera effectuée en deux temps. Nous commençons par comparer les parcelles du groupe 1, traitées au prosulfocarbe, à celles du groupe 4, majoritairement en agriculture biologique. Comme nous le verrons, cette comparaison est intéressante mais d'autant plus délicate qu'elle implique des systèmes ayant des logiques sous-jacentes très différentes, soutenus par des prix différenciés. C'est pourquoi nous accorderons une attention particulière à l'analyse du groupe 3 dans un second temps, soit des parcelles mobilisant des alternatives non-chimiques au désherbage tout en restant dans la logique conventionnelle (notamment avec la possibilité de recourir à des insecticides et fongicides ainsi qu'à la fertilisation minérale).

[46] Seules les mentions harmonisées, reprises par la EUPD, sont reprises. Il existe une seconde catégorie de mentions, les « notified C&L », qui sont proposées par les producteurs. Dans certains cas, les différences entre les mentions harmonisées et les mentions notifiées sont fortes, comme pour le clomazone, qui ne dispose d'aucune mention harmonisée, mais d'un grand nombre de mentions notifiées. Les mentions notifiées sont trouvables sur le site de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA)

[47] https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046829534

[48] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006195230/2021-02-14

4.3.1. Groupe 1 vs. Groupe 4

Pour des raisons d'effectifs et de respect des hypothèses de modélisation, seules les cultures de blé tendre, d'orge et de triticale ont pu être analysées. De manière générale, le groupe 4 regroupe majoritairement des parcelles en agriculture biologique. Les parcelles comptabilisées dans le groupe 4 (en raison de leur IFT total nul) mais non déclarées en AB présentent généralement des modes de conduites comparables (travail mécanique, rendements…), mais ne bénéficient pas des prix avantageux du label AB, ce qui est particulièrement fréquent pour le triticale (près de la moitié des parcelles du groupe 4). Pour ces raisons, la comparaison entre groupe 1 et groupe 4 présente des limites importantes : nous comparons de fait des parcelles aux logiques très différentes (conventionnel avec prosulfocarbe contre agriculture biologique, ou mode de conduite équivalent), aux objectifs de rendement probablement souvent différents, mais aussi, dans la majorité des cas, aux prix de vente de la récolte différents.

De plus, la méthodologie utilisée (pondération par les scores de propension) suppose le respect de certaines hypothèses de modélisation (voir ***Annexe 4***), notamment un équilibre des facteurs confondants post-pondération. Pour la comparaison au groupe 4, le respect de ces hypothèses n'est pas toujours parfait, notamment vis-à-vis de la fertilisation azotée, qui est largement plus élevée dans les parcelles du groupe 1. Ainsi, l'analyse de ce groupe est à nuancer et met surtout en évidence les différences profondes entre conventionnel « classique » et agriculture biologique. On verra dans ce qui suit que la conduite des cultures de céréales est possible sans herbicide qu'elle se traduit par des baisses de rendement et un recours au désherbage mécanique.

4.3.1.1. Blé tendre

Comparativement aux parcelles traitées au prosulfocarbe, les parcelles du groupe 4 présentent un rendement largement inférieur, ici divisé par un facteur proche de 2. En parallèle, et en compensation de l'absence de traitement chimique, le désherbage mécanique y est largement plus présent. Vis-à-vis des résultats économiques, on constate que l'analyse ne permet pas de mettre en évidence des différences de produit brut, malgré la différence de rendement constatée. Ceci suggère donc que les prix de vente des récoltes utilisés pour l'analyse[49] permettent de compenser intégralement les pertes de rendement associé au groupe 4 majoritairement conduit en AB. Dans le référentiel de prix mobilisé, le prix à la tonne de blé tendre biologique est environ deux fois supérieur au prix conventionnel. Enfin, le mode de conduite biologique est corrélé à une baisse des charges opérationnelles. Cette baisse des charges liées aux intrants est entièrement compensée par une hausse des charges de mécanisation, de telle sorte que la marge est, à l'image du produit brut, comparable entre groupe 1 et groupe 4.

Tableau 16 : Analyse technico-économique pour le groupe 4 en blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	167	318 491	77,18	0,00	2,11	5,45	1 443,99	386,19	355,65	702,14
Groupe 4	162	49 159	39,72	0,96	0,00	0,00	1 497,91	276,52	467,64	753,75
ATE			37,46	- 0,95	2,11	5,45	- 53,93	109,67	- 111,99	- 51,61
Ecart-type			3,99	0,19	0,12	0,22	175,32	39,87	50,12	112,20
Significativité			***	***	***	***	ns	*	*	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

[49] Pour rappel, nous utilisons les prix 2020 recensés dans les référentiels Agrosyst (réseau DEPHY).

4.3.1.2. Orge

De manière analogue au cas du blé tendre, la conduite biologique adoptée par les parcelles du groupe 4 est corrélée à des baisses de rendement significatives, de l'ordre de 25 q/ha, soit de près de 40%, ainsi qu'à une augmentation de la fréquence de désherbage mécanique, bien que moins marquée que pour le blé tendre. Les résultats économiques, en revanche, montrent des effets différents de ce que nous avons constaté en blé tendre. D'une part, l'analyse met en évidence un effet fort sur le produit brut, qui est largement supérieur dans les parcelles du groupe 1, ce qui signifie que la compensation par les prix observée pour le blé tendre n'a pas lieu. La raison principale est la moindre différence de prix entre biologique et conventionnel : si le prix était doublé en blé tendre, il n'augmente que d'environ un tiers en orge.

Enfin, une baisse des charges opérationnelles similaire à celle enregistrée en blé tendre est également observée ici pour le groupe 4. En revanche, contrairement au blé tendre, l'analyse ne permet pas de mettre en évidence une augmentation sensible des charges de mécanisation dans les parcelles du groupe 4. Finalement, en raison des moindres différences de prix et malgré la baisse des charges opérationnelles, les parcelles du groupe 4 présentent une marge nette moyenne largement inférieure à celles du groupe 1 (- 234 €/ha). La confiance dans cet effet est toutefois faible, en raison d'un grand écart-type de l'estimation. On rappellera que notre calcul n'intègre pas les variations d'aides financières respectives auxquelles ces deux groupes peuvent prétendre.

Tableau 17 : Analyse technico-économique pour le groupe 4 en orge

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	86	50 312	62,87	0,00	1,96	4,57	1 158,41	343,04	357,86	457,51
Groupe 4	77	15 344	38,00	0,38	0,00	0,00	801,79	206,40	371,82	223,58
ATE			24,87	- 0,38	1,96	4,57	356,62	136,64	- 13,96	233,93
Ecart-type			4,39	0,15	0,30	0,32	105,41	38,51	19,22	131,18
Significativité			***	*	***	***	***	**	ns	.

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.3.1.3. Triticale

Pour la partie technique, on retrouve les mêmes conclusions que pour les cultures précédentes, avec une baisse de rendement constatée dans les parcelles du groupe 4 de plus de 35% (- 20 q/ha environ) et une augmentation significative de la fréquence de désherbage mécanique. Pour les résultats économiques, le cas du triticale est assez similaire à celui de l'orge, dans lequel la différenciation des prix entre AB et conventionnel ne compense pas totalement la différence de rendements, conduisant à un produit brut plus élevé dans les parcelles du groupe 1. Comme pour l'orge, seules les charges opérationnelles sont significativement plus élevées dans le groupe 1 relativement au groupe 4. Les charges de mécanisation sont comparables. Enfin, malgré cette compensation partielle par la baisse des charges, la marge nette reste largement plus élevée dans les parcelles du groupe 1 (+ 180 €/ha). On rappellera de nouveau que notre comparaison n'inclut pas les aides financières respectives reçues par ailleurs, et que près de la moitié des parcelles de triticale du groupe 4 ne sont pas déclarées en AB, et ne bénéficient donc pas de prix différenciés.

Tableau 18 : Analyse technico-économique pour le groupe 4 en triticale

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	310	44 788	57,33	0,01	1,73	3,35	1 054,85	311,75	341,23	401,87
Groupe 4	246	22 195	37,09	0,48	0,00	0,00	788,72	220,39	346,67	221,66
ATE			20,24	- 0,47	1,73	3,35	266,14	91,37	- 5,44	180,21
Ecart-type			1,75	0,10	0,06	0,10	37,64	19,60	13,81	38,41
Significativité			***	***	***	***	***	***	ns	***

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.3.2. Groupe 1 vs. Groupe 3

A la différence du groupe 4, les parcelles du groupe 3 sont pour la grande majorité dans une logique conventionnelle, bien que celle-ci ne puisse pas être qualifiée de « classique » en raison de l'absence de traitement herbicide. En cela, ces dernières présentent un intérêt tout particulier : celui de pouvoir étudier l'impact de la non-utilisation d'herbicides chimiques en l'absence de mécanisme de compensation par les prix de vente de la production, et avec le maintien du recours à d'autres pesticides ou à la fertilisation minérale. On peut émettre l'hypothèse que les parcelles conduites avec les modalités du groupe 3 trouvent d'autres formes de compensation *via* des aides et/ou soient contraintes par un cahier des charges, sans toutefois pouvoir la vérifier au vu des données disponibles dans les enquêtes. Ici, elles sont analysées sans tenir compte des situations potentiellement particulières qu'elles recouvrent et des bénéfices qu'elles en retirent.
Bien que présentes dans les données en nombre assez limité, l'analyse a pu être menée sur les cultures de blé tendre d'orge et de triticale, à l'instar des parcelles du groupe 4.
On peut noter que l'on retrouve dans le groupe 3 quelques parcelles conduites en AB. Cela arrive néanmoins de manière anecdotique (0% en orge, 2% en triticale, 14% en blé tendre). En effet, certains produits sont autorisés en AB ; s'ils sont mobilisés en tant que fongicides ou insecticides, il est possible de retrouver ces parcelles dans le groupe 3 dès qu'elles respectent la condition d'un IFT herbicides égal à 0.
Deux points saillants qui ressortiront de ce qui suit concernent :

- La moindre mobilisation du désherbage mécanique au sein du groupe 3 comparativement au groupe 4.
- La capacité de rattraper une part du rendement dès lors que l'on s'autorise le recours à la fertilisation minérale.

4.3.2.1. Blé tendre

Comparativement aux parcelles traitées au prosulfocarbe, les parcelles du groupe 3 présentent un rendement significativement inférieur (- 9 q/ha, soit -12% environ). Toutefois, cette différence de rendement est sans commun mesure avec celle constatée dans les systèmes adoptant un mode de culture biologique (le rendement était alors diminué de près de 50%). Une conclusion similaire peut être tirée pour la différence de fréquence de désherbage mécanique qui, si elle existe dans le groupe 3, reste moins marquée que dans le groupe 4. De plus, l'analyse permet logiquement de mettre en évidence un effet fort sur les IFT, notamment sur l'IFT total (l'IFT herbicide étant par définition à 0 dans le groupe 3) : ce dernier est en effet plus que divisé par deux dans les parcelles du groupe 3, par rapport aux parcelles recevant du prosulfocarbe.

Pour la partie économique, la majorité des parcelles du groupe 3 étant en conventionnel, il n'y a pas de compensation des baisses de rendements par les prix, ce qui conduit à une baisse sensible du produit brut (- 160 € /ha, soit -11,5% environ). En revanche, on assiste bien à un mécanisme de compensation des rendements plus faibles, via la réduction des charges, opérationnelles et de mécanisation, d'un montant significatif (- 200 € /ha au total, soit une baisse supérieure à -25%). Cette compensation par la réduction des charges permet de conserver un niveau de rentabilité à la parcelle comparable au groupe 1.

Tableau 19 : Analyse technico-économique pour le groupe 3 en blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	350	745 198	75,60	0,00	1,99	5,23	1 378,41	401,40	366,21	610,81
Groupe 3	186	117 130	66,17	0,17	0,00	2,19	1 219,75	249,96	316,69	653,11
ATE			9,43	- 0,17	1,99	3,04	158,67	151,44	49,52	- 42,30
Ecart-type			3,96	0,07	0,07	0,25	54,51	31,38	13,69	66,89
Significativité			*	*	***	***	**	***	***	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.3.2.2. Orge

En orge, l'analyse ne permet pas de mettre en évidence de différence sensible pour le rendement, entre parcelles des groupes 1 et 3, la différence constatée n'étant pas significative. A l'instar du blé, on constate une faible augmentation de la fréquence de désherbage mécanique dans les parcelles du groupe 3, ainsi qu'une division par plus de 2 de l'IFT total. Tout comme pour le rendement, aucune différence de produit brut significative n'est détectée. Comme pour le blé, l'analyse suggère une différence marquée de charges opérationnelles, supérieures dans le groupe 1 (+ 100 €/ha, soit environ 28%), mais pas de charges de mécanisation. La différence de marge n'est pas non plus jugée significative.

Tableau 20 : Analyse technico-économique pour le groupe 3 en orge

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	222	159 363	65,80	0,00	2,05	4,74	1 172,85	354,13	365,84	452,88
Groupe 3	125	52 873	60,13	0,10	0,00	2,01	1 129,87	254,65	371,24	503,98
ATE			5,67	- 0,10	2,05	2,73	42,98	99,48	- 5,39	- 51,11
Ecart-type			4,32	0,06	0,15	0,28	98,91	31,33	28,60	113,27
Significativité			ns	.	***	***	ns	**	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.3.2.3. Triticale

Les résultats de l'analyse en triticale montrent des résultats assez similaires à ce qui avait été observé en blé tendre. D'une part, elle suggère une baisse sensible de rendement dans les parcelles du groupe 3 (- 11 q/ha, environ 19%), mais qui reste d'un ordre de grandeur largement inférieur à celui de la baisse constatée pour le groupe 4 (-35% en triticale). Tout comme pour les autres cultures analysées, l'IFT total est également réduit de plus de moitié pour les parcelles du groupe 3. Conséquence directe de la baisse de rendement, le produit brut présente une différence marquée (195 €/ha, environ 19%) en faveur des parcelles traitées au prosulfocarbe. Tout comme pour le blé tendre, on constate une nette baisse des charges totales dans les parcelles du groupe 3 (- 110 €/ha, environ -16%). Toutefois, et au contraire du blé tendre cette fois-ci, la baisse des charges ne suffit pas à compenser entièrement celle du rendement, si bien que les parcelles traitées au prosulfocarbe présentent une marge nette supérieure, de 84 €/ha en moyenne.

Tableau 21 : Analyse technico-économique pour le groupe 3 en triticale

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Groupe 1	326	47 386	57,08	0,01	1,73	3,39	1 050,33	335,13	340,65	374,55
Groupe 3	168	16 883	46,07	0,00	0,00	1,15	855,66	256,81	308,65	290,20
ATE			11,01	0,00	1,73	2,24	194,67	78,32	32,01	84,35
Ecart-type			1,55	0,01	0,05	0,11	28,46	22,62	8,67	43,39
Significativité			***	ns	***	***	***	***	***	*

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide (APCA, 2021 ; CUMA AURA, 2021).

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

4.3.3. Synthèse

L'analyse de l'impact des alternatives non-chimiques au prosulfocarbe a pu être menée pour les cultures de blé tendre, d'orge et de triticale, selon deux cas distincts : (i) d'une part l'analyse des parcelles n'ayant recours à aucun traitement chimique et ayant donc un mode de conduite suivant le cahier des charges de l'agriculture biologique, qu'elles aient effectivement le label ou non, et (ii) celle des parcelles se passant uniquement d'herbicide de l'autre, tout en ayant potentiellement recours à d'autres pesticides, ou encore à la fertilisation minérale. Au-delà même des résultats, ces deux cas correspondent donc à des situations très différentes. Dans le premier, nous sommes amenés à comparer des parcelles en conventionnel ayant recours au prosulfocarbe (groupe 1) à des parcelles pour la plupart en agriculture biologique, ou *a minima* ayant un mode de conduite similaire et se passant totalement des pesticides (groupe 4). Ces deux ensembles présentent des logiques contrastées soutenus par des prix de revente de la récolte différents. A titre d'exemple, la fertilisation azotée est pensée différemment (167 kg/ha en moyenne pour le groupe 1 contre 56 kg/ha pour le groupe 4 en blé tendre), ce qui traduit des objectifs de rendement différents. Le second cas est particulièrement intéressant, dans la mesure où nous incluons cette fois-ci dans la comparaison des parcelles qui, si elles n'utilisent pas d'herbicide chimique, restent dans une logique conventionnelle (groupe 3). Nous ne savons malheureusement pas si ces parcelles sont dans des zones géographiques particulières telles que des aires d'alimentation de captage, ou si elles sont soumises à des cahiers des charges particuliers pouvant donner lieu à une compensation financière. Elles présentent un avantage, celui d'incarner une position intermédiaire entre le conventionnel et l'AB.

De manière générale, la comparaison des parcelles traitées au prosulfocarbe (groupe 1) à celles du groupe 4 met en exergue des différences de rendement très marquées : les rendements moyens au sein du groupe 4 sont inférieurs de 35 à 50% à ceux du groupe 1 selon les cultures. L'absence de traitement (en l'occurrence herbicide) est associée à une augmentation de la fréquence de désherbage mécanique au sein du groupe 4. Au niveau économique, les pertes de rendements sont totalement ou partiellement compensées, selon les cultures, *via* deux mécanismes. D'une part, la baisse des charges opérationnelles, constatée pour toutes les cultures analysées, contribue à rattraper (totalement ou partiellement) la différence de produit brut, et d'autre part, la différenciation entre les prix pratiqués en AB et en conventionnel joue le rôle le plus important. Cette différenciation est particulièrement marquée en blé tendre, pour lequel le prix à la tonne en AB est près de deux fois supérieur à celui du conventionnel dans le référentiel de prix utilisé. En conséquence, la perte de rendement est entièrement compensée en blé tendre, donnant une marge nette à la parcelle comparable entre groupe 1 et groupe 4, après prise en compte des charges. La conclusion est un peu différente en orge et triticale, pour lesquels la différence de prix AB/conventionnel est moins marquée (environ +30%). Dans ces cas, la rentabilité moyenne à la parcelle du groupe 4 est sensiblement plus faible que celle du groupe 1.

Les limites, évoquées précédemment, à l'analyse du groupe 4 (logiques différentes, fertilisation, etc.) nous poussent à accorder une grande attention au groupe 3, qui ne présente pas les mêmes écueils pour mener une comparaison. Dans l'ensemble, l'analyse suggère une perte de rendement associée au groupe 3, perte significative mais d'un ordre de grandeur largement inférieur à ce qui avait été constaté pour le groupe 4. Le même constat peut être fait pour la fréquence de désherbage mécanique qui, bien que légèrement supérieure dans le groupe 3, a tendance à rester faible. Pour toutes les cultures analysées, les parcelles du groupe 3 présentent un IFT total moyen plus de deux fois inférieur à celui du groupe 1. Pour la partie économique, les pertes de rendement sont totalement ou

partiellement compensées par une réduction générale des charges, principalement portée par la baisse des charges opérationnelles (- 20 à 40% selon les cultures) et de manière plus secondaire par celle des charges de mécanisation (de 0 à 15% selon les cultures). Cette compensation conduit à une rentabilité à la parcelle du groupe 3 (après déduction des charges) comparable à celle du groupe 1 pour l'orge et le blé tendre, et légèrement inférieure pour le triticale (- 84 €/ha).

Les conclusions sont ainsi assez différentes entre les groupes 3 et 4. Plus précisément, les parcelles du groupe 3 réussissent en général à maintenir une marge nette comparable, ou *a minima* proche, de celle des parcelles mobilisant le prosulfocarbe. Ce maintien de la rentabilité passe tout d'abord par la réduction significative des charges, d'abord opérationnelles. Ce point suggère que, bien qu'étant toujours dans une logique conventionnelle, les parcelles du groupe 3 pourraient avoir un objectif de rendement plus faible que le conventionnel « classique », ce qui leur permet d'adapter leurs pratiques afin de minimiser les charges et maintenir inchangé l'objectif de rentabilité. On retrouve ici l'idée, avancée dans notre précédent travail sur le S-métolachlore, que l'augmentation des volumes produits n'est, à l'échelle d'une parcelle, pas nécessairement synonyme de meilleure rentabilité. Par ailleurs, le maintien de la rentabilité des parcelles du groupe 3 dépend aussi du fait que les pertes de rendement sont « minimisées ». Nous avons ainsi identifié deux pratiques principales permettant de limiter les pertes de rendement : le maintien d'un haut niveau de fertilisation minérale (de 80 à 85% des quantités utilisées en conventionnel « classique »), éventuellement complété par des apports organiques afin de maintenir un niveau global de fertilisation similaire, et l'augmentation significative de la densité du semis (de +10 à +20% par rapport aux parcelles du groupe 1). Si le choix de conduite en groupe 3 peut être relativement sans effet pour la rentabilité de la parcelle, il semble important de souligner que cela peut toutefois impacter la filière qui peut se retrouver à gérer des volumes inférieurs avec des conséquences sur les amortissements des infrastructures de collecte, de stockage, d'export et de transformation.

4.4. Analyses de sensibilité

Nous avons vu que les parcelles traitées au prosulfocarbe (groupe 1) présentaient, dans l'ensemble, des performances économiques assez comparables avec celles des parcelles mobilisant une ou des alternatives, qu'elles soient chimiques ou non (groupes 2 à 4). On a vu que ces performances comparables étaient dues à des rendements comparables et des charges totales qui ne varient pas ou peu (groupe 2), à une adaptation des pratiques visant à faire baisser significativement les charges (groupe 3), ou encore à une différenciation forte entre prix AB et conventionnel (groupe 4). Toutefois, ces résultats ont été obtenus à partir d'un contexte de prix particulier : celui de l'année 2020. En effet, l'ensemble des indicateurs économiques ont été reconstruits avec comme base les prix de 2020, qui était l'année la plus récente considérée comme à jour au sein des référentiels de prix tirés d'Agrosyst, utilisés pour les prix des récoltes et la reconstruction des coûts liés aux intrants.

Jusqu'ici, rien ne nous permet donc de juger de la robustesse de nos résultats face à des variations conjoncturelles, par exemple du prix des récoltes ou des intrants. L'objectif de cette partie est ainsi d'effectuer une analyse de sensibilité, visant à établir si le différentiel de performances économiques entre les parcelles non-traitées au prosulfocarbe et celles qui le sont (groupe 1), sont à même de résister à des variations des prix de ce qui les compose. Plus précisément, on étudiera l'évolution de la différence de marge entre groupe avec prosulfocarbe et groupe sans, en fonction de contextes de prix particuliers.

Ces contextes de prix particuliers correspondent à des années précises, et ont été identifiés sur la base de deux séries chronologiques produites par l'INSEE : l'IPPAP[50] (évolution du prix des récoltes) et l'IPAMPA[51] (évolution des prix des moyens de production agricoles). Pour l'identification des contextes de prix particuliers, les indices généraux annualisés ont été utilisés. Les années retenues sont 2005 et 2009 pour un contexte de prix généralement bas, 2008, 2013, 2020 et 2022 pour un contexte de prix plus élevés, voire très élevés pour 2022. Puis, pour chaque contexte considéré (correspondant donc à une année précise), les prix de chaque composante de la marge nette (prix des récoltes, coûts de chacun des intrants, coûts des passages mécanisés) ont été ajustés par l'IPPAP ou l'IPAMPA correspondant. Par exemple, pour le contexte de prix de 2005, le prix des récoltes de blé tendre a été corrigé par la valeur 2005 de l'IPPAP blé tendre[52]. Pour la correction des prix, les indices annuels ont été utilisés. Donnés par l'INSEE en base 2015, ils ont d'abord été convertis en base 2020. En procédant ainsi, on replace les résultats des parcelles dans le contexte de prix de l'année considérée. Le détail des corrections effectuées ainsi que l'ensemble des séries chronologiques utilisées pour l'analyse de sensibilité est donné en ***Annexe 6***. Les valeurs des indices utilisés pour replacer chaque indicateur économique dans un contexte de prix spécifique sont données dans le ***Tableau 22***. Pour la lecture de ce tableau, le prix de la récolte de blé tendre utilisé dans le contexte de prix 2005 correspond au prix de la récolte de 2020 (utilisé pour les analyses présentées dans les parties précédentes) multiplié par l'indice de la récolte de blé tendre en 2005 (base 100 2020), soit 52,8%.

[50] https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538626
[51] https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538987
[52] https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538826

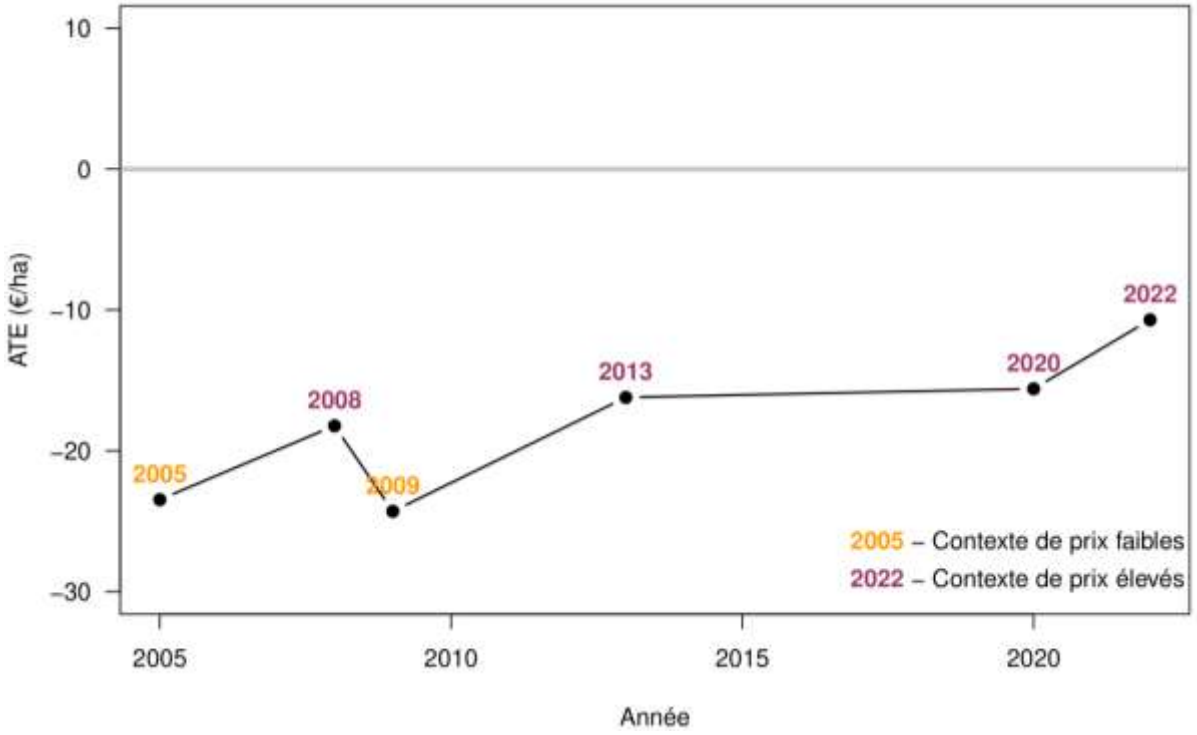
Tableau 22 : Valeurs des indices de prix utilisés pour l'analyse de sensibilité

Indicateur	Contexte de prix (indice base 100 en 2020)					
	2005	2008	2009	2013	2020	2022
Récolte blé tendre (IPPAP)	52,8	102,4	67,1	111,5	100	178,0
Récolte pomme de terre (IPPAP)	31,4	36,9	33,2	74,4	100	108,8
Eau d'irrigation (IPAMPA)	76,8	83,1	86,0	94,6	100	103,0
Protection phytosanitaire (IPAMPA)	101,7	104,5	108,3	107,7	100	103,2
Fertilisation minérale (IPAMPA)	76,3	132,9	113,0	117,5	100	231,0
Fertilisation organique (IPAMPA)	74,9	89,6	94,5	87,7	100	117,2
Semences blé tendre (IPAMPA)	72,8	92,3	94,7	104,4	100	106,3
Plants pomme de terre (IPPAP)	47,6	67,3	73,9	63,2	100	98,3
Tracteurs (IPAMPA)	74,6	78,4	81,6	86,7	100	108,7
Entretient des véhicules (IPAMPA)	64,8	74,0	77,3	86,2	100	108,8
Carburant (IPAMPA)	101,7	143,1	98,8	145,9	100	204,9
Matériel de récolte (IPAMPA)	79,3	94,5	85,7	102,7	100	152,2
Matériel de semis/distribution (IPAMPA)	78,6	94,3	85,6	102,1	100	133,2
Matériel de pulvérisation (IPAMPA)	78,1	93,5	84,6	101,7	100	133,6
Matériel de travail du sol (IPAMPA)	78,6	94,3	85,6	102,1	100	133,2

Source : propre élaboration à partir de différentes séries chronologiques produites par l'INSEE sur les indices des prix dans l'agriculture (IPPAP et IPAMPA).

Afin de ne pas surcharger cette partie de résultats potentiellement redondants, nous avons limité l'analyse de sensibilité telle que décrite ci-dessus aux cultures de blé tendre (tous les groupes) et de pomme de terre (groupe 1 vs groupe 2), qui correspondent à des situations contrastées. Dans chaque cas, nous avons réestimé la différence de marge nette entre le groupe avec prosulfocarbe et le groupe sans, en utilisant la méthodologie de pondération par les scores de propension, comme précédemment. Cette différence de marge nette estimée, ou ATE (*Average Treatment Effect*), correspond ainsi aux gains ou pertes économiques corrélés à l'utilisation du prosulfocarbe par rapport au groupe considéré, dans le contexte de prix considéré. Nous avons calculé l'ATE pour chaque contexte de prix retenu, et avons représenté les résultats graphiquement. Pour rappel, un ATE positif correspond à un avantage économique pour les parcelles traitées au prosulfocarbe (marge nette supérieure dans le groupe 1), et inversement pour un ATE négatif.

Figure 11 : Analyse de sensibilité - blé tendre - groupe 1 vs groupe 2

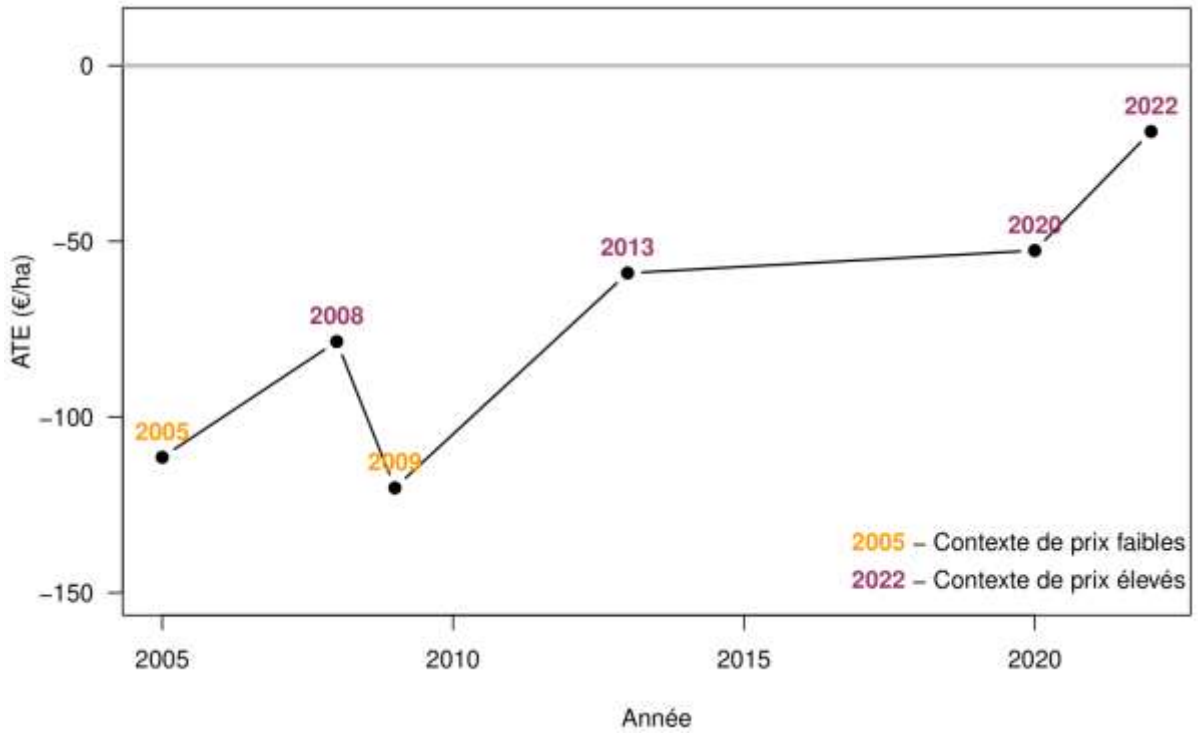


Sources : Propre élaboration à partir des enquêtes PK Grandes cultures 2014 et 2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des indices IPPAP et IPAMPA de l'INSEE

Pour les alternatives chimiques en blé tendre, les conclusions de l'analyse économique tirées dans les parties précédentes (à savoir des performances économiques très similaires), sont robustes aux contextes de prix étudiés. On peut voir ceci dans la ***Figure 11*****,** qui compare le groupe 1 au groupe 2. On constate que les contextes de prix faibles (2005 et 2009) sont très légèrement plus favorables aux parcelles du groupe 2 que les contextes de prix élevés. Toutefois, la différence de marge n'est jamais significative statistiquement. De fait, les parcelles des deux groupes sont toutes deux dans des logiques similaires (conventionnel « classique », avec ou sans prosulfocarbe). Nous pouvions donc nous attendre à retrouver des résultats économiques similaires, peu importe le contexte de prix.

La ***Figure 12*** montre les résultats de l'analyse de sensibilité pour la comparaison au groupe 3. On constate que les contextes de prix bas sont favorables aux parcelles du groupe 3, qui présentent alors une marge nette significativement supérieure à celle du groupe 1. Dans un contexte de prix élevés en revanche, cette différence s'amenuise et tend vers 0, ce qui tend à favoriser les parcelles du groupe 1 relativement à celles du groupe 3. Dans tous les contextes de prix élevés (2008, 2013, 2020 et 2022) la différence de marge n'était pas significative statistiquement, à l'inverse des contextes de prix bas (2005 et 2009). Pour expliquer cette tendance, on rappelle que les parcelles du groupe 3 présentent un rendement moyen inférieur à celles du groupe 1, mais compensent en abaissant leurs charges afin de maintenir une rentabilité satisfaisante. En contexte de prix élevés pour la production comme pour les intrants, la punition économique associée à la perte de rendement est ainsi plus marquée que l'augmentation des charges, et favorise le groupe 1.

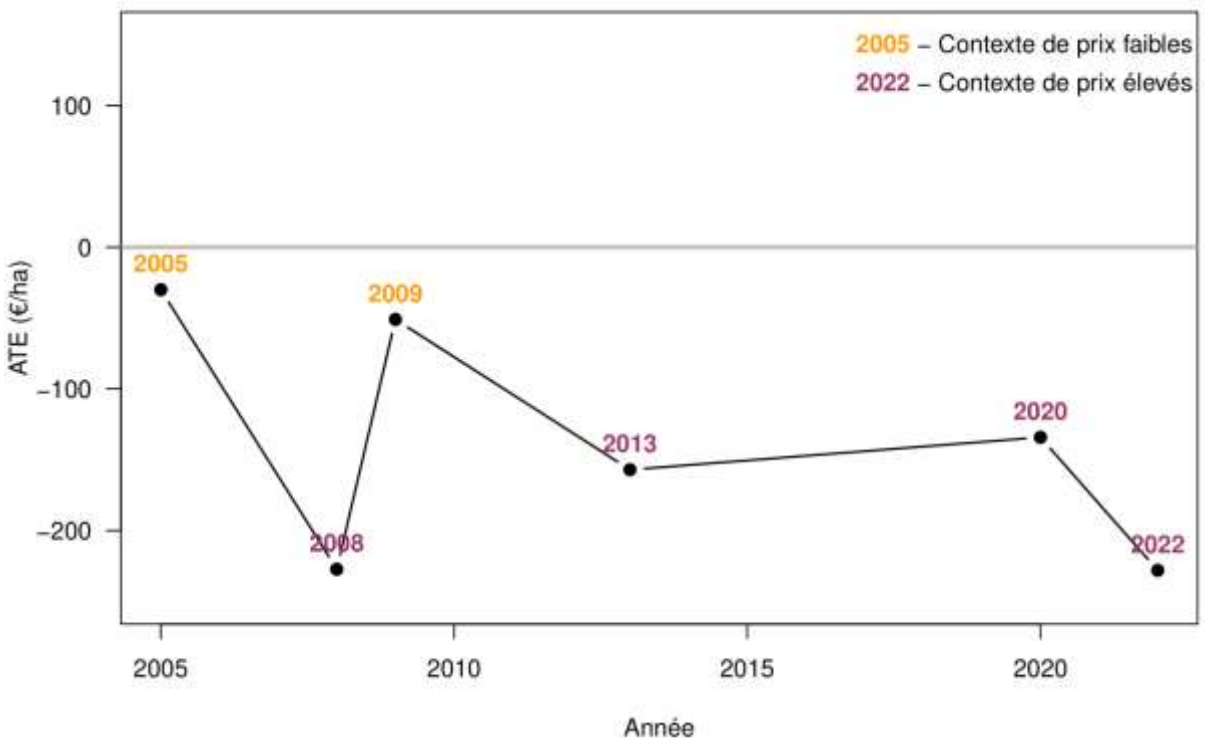
Figure 12 : Analyse de sensibilité - blé tendre - groupe 1 vs groupe 3



Sources : Propre élaboration à partir des enquêtes PK Grandes cultures 2014 et 2017, des référentiels de prix Agrosyst et des indices IPPAP et IPAMPA de l'INSEE

Pour la comparaison au groupe 4, visible dans la ***Figure 13***, c'est la tendance inverse qui semble s'imposer : les contextes de prix élevés sont plus favorables aux parcelles du groupe 4. En pratique, la seule différence de marge nette significative statistiquement est pour 2008, en raison d'un écart-type de l'estimation élevé. Toutefois, la tendance semble marquée et gagne à être analysée. On constate ainsi que la différence de marge est proche de 0 en contexte de prix faibles, mais est en faveur du groupe 4 en contexte de prix élevés. Il est nécessaire de garder à l'esprit que, comme lors de l'analyse technico-économique présentée plus haut, la majorité des parcelles du groupe 4 bénéficient de prix de vente supérieurs, liés au label AB. Dans le cas du blé tendre, la différenciation du prix entre AB et conventionnel est suffisamment marquée pour que l'entièreté des baisses de rendement soit compensée. Dès lors, un contexte de prix plus élevés pèse plus lourdement sur les charges, notamment opérationnelles, plus importantes dans le groupe 1, donnant un avantage pour le groupe 4. Cette conclusion ne tient donc que si la distinction des prix entre AB et conventionnel est maintenue à un niveau élevé et que le consommateur ne change que marginalement ses pratiques alimentaires concernant l'origine AB en contexte de prix élevés.

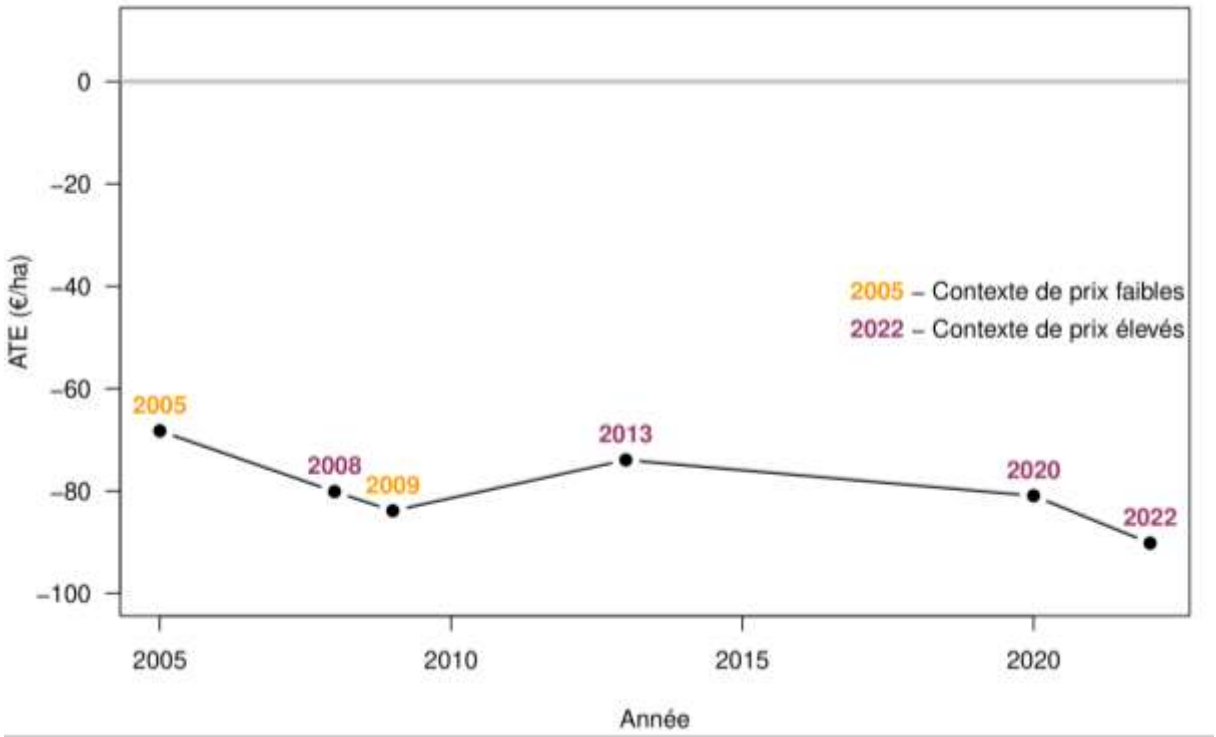
Figure 13 : Analyse de sensibilité - blé tendre - groupe 1 vs groupe 4



Sources : Propre élaboration à partir des enquêtes PK Grandes cultures 2014 et 2017, des référentiels de prix Agrosyst et des indices IPPAP et IPAMPA de l'INSEE

Pour la pomme de terre, enfin, il est difficile d'identifier des tendances très marquées qui distingueraient les contextes de prix faibles des contextes de prix élevés, comme le montre la ***Figure 14***. Plus précisément, aucun contexte de prix ne donne une différence de marge significative statistiquement, ce qui suggère que la conclusion établie précédemment, selon laquelle il n'y a pas de différence économique marquée entre les parcelles du groupe 1 et celle du groupe 2, est robuste au contexte conjoncturel.

Figure 14 : Analyse de sensibilité - pomme de terre - groupe 1 vs groupe 2



Sources : Propre élaboration à partir des enquêtes PK Grandes cultures 2014 et 2017, des référentiels de prix Agrosyst et des indices IPPAP et IPAMPA de l'INSEE

4.5. Vers une moindre dépendance au prosulfocarbe

4.5.1. Cas des céréales d'hiver

4.5.1.1. Bref rappel de la situation actuelle

En France, le prosulfocarbe est majoritairement utilisé sur céréales d'hiver. En 2017, plus de la moitié des volumes vendus sont utilisés sur blé tendre et environ 25% des surfaces cultivées sont traitées au prosulfocarbe (enquêtes pratiques culturales Grandes cultures 2017). Les experts terrain que nous avons interrogés estiment qu'aujourd'hui, environ 50% des surfaces cultivées en blé tendre en France sont traitées au prosulfocarbe, ce que corrobore l'évolution des tonnages consommés.

Le recours croissant au prosulfocarbe en céréales d'hiver s'expliquent par différents facteurs comme évoqué en partie ***2.3***. Il s'agit notamment :

- Du retrait progressif d'un certain nombre de molécules telles que l'isoproturon (en 2016/17) ;
- Du durcissement des règles d'utilisation d'autres herbicides tels que le chlortoluron (restrictions sur sols drainés) ;
- D'une montée des densités de ray-grass résistants à d'autres familles de molécules telles que les inhibiteurs de l'ALS (groupe HRAC 2) et de l'ACCase (groupe HRAC 1) ;
- D'une présence accrue de graminées peu sensibles aux produits foliaires
- D'un prix avantageux des produits à base de prosulfocarbe relativement à d'autres molécules ;

- Un agrandissement des exploitations agricoles qui entraine un recours moindre au travail du sol ;
- Le recours à des rotations de plus en plus courtes et de moins en moins diversifiées, ce qui est propice au développement des adventices et rend plus difficile leur gestion.

4.5.1.2. Leviers envisagés et freins à leur mobilisation

Un certain nombre de leviers sont envisagés pour aller vers une moindre dépendance au prosulfocarbe en céréales d'hiver. Certains leviers sont déjà mobilisés et ont fait leurs preuves. D'autres nécessitent des expérimentations et la production de références.
Il s'agit en premier lieu de mobiliser l'ensemble des leviers prophylactiques afin de réduire la pression initiale en adventices. C'est notamment la logique mobilisée en AB. Leur mobilisation en conventionnel peut permettre d'envisager alors d'appliquer au moins ponctuellement soit une gestion 100% mécanique (comme le font les agriculteurs du groupe 3), soit une gestion mixte, et de quelque manière que ce soit, une diminution des quantités de prosulfocarbe employées.

Le ***Tableau 23*** compile différents leviers envisagés et les freins associés.

Tableau 23 : Leviers pour une moindre dépendance des céréales d'hiver au prosulfocarbe et freins associés

Leviers envisagés déjà mobilisés et/ou nécessitant des expérimentations et production de références	**Freins à leur mobilisation**
• Allongement et diversification des rotations • Décalage dates de semis de 15 jours ou plus • Réalisation de faux-semis • Désherbage mécanique • Ecartement plus large pour faciliter le passage de herse et le binage facilité par la géolocalisation des équipements • Variétés plus adaptées (tardives, compétitives, couvrantes…) • Gestion des menues-pailles dans les précédents • Semis dans un couvert maintenu vivant • Ecimage (en saison et précédents) • Association de cultures conduisant à une meilleure occupation de l'espace	• Débouchés/attractivité pour les cultures de diversification • Conditions pédoclimatiques • Impact sur les rendements potentiels • Débits de chantiers, temps humain et répartition des disponibilités • Coût et diversité des équipements • Moindre attrait pour le préventif et bénéfice cumulatif quand la comptabilité agricole se fait sur une base annuelle • Des marges d'améliorations des solutions non explorées : peu d'essais tant qu'une solution chimique existe et donne des résultats satisfaisants

Nous détaillons ci-dessous, à titre d'exemples, quelques leviers et freins associés que nous avons retrouvés dans la littérature grise ou lors de nos divers échanges avec les experts terrain.

Arvalis, Terres Inovia et l'ACTA ont conduit une expérimentation de 2010 à 2018 dans le cadre du projet DEPHY EXPE « ECOHERBMIP » ; les résultats ont été publiés en 2019 (Verdier J.L *et al.*, 2019). Divers leviers ont été testés pour réduire la dépendance aux herbicides. Les plus performants sont alors le travail du sol (labour) ainsi que l'allongement et la diversification de la rotation. Le décalage de la date

de semis des céréales d'hiver s'avère efficace principalement sur les graminées automnales, bien que cette technique implique une certaine prise de risque soulignée dans cette étude. Enfin, le désherbage mécanique (binage, si possible associé à un désherbage chimique sur la ligne de semis) apparaît également comme un levier intéressant à mobiliser, mais concernait les cultures de printemps dans cette étude. Pour être performants, une combinaison de ces leviers est nécessaire, ce qui implique une reconception du système de culture. Certains systèmes étudiés sont toutefois apparus comme étant plus « fragiles » économiquement ; nous reviendrons sur les freins à leur mise en place un peu plus loin.

Par ailleurs, la chambre d'agriculture d'Eure-et-Loir (2022) présente la gestion des rotations et le décalage de dates de semis comme les deux principaux piliers mobilisés sur leur territoire pour faciliter la gestion des adventices en céréales tout en limitant le recours à la chimie.
En ce qui concerne la gestion des rotations, il s'agit de les rallonger et de les diversifier en alternant cultures de printemps ou d'été et d'hiver. Un des freins mis en avant lors de nos divers échanges est celui du manque de débouchés et d'attractivité des cultures de diversification. Les coopératives les achèteront mais elles devront souvent leur faire rejoindre un circuit établi de transformation et de valorisation.
Concernant le décalage de date de semis, il s'agit de réaliser un semis tardif ; nous vous renvoyons à la partie ***4.5.1.3*** ci-dessous dans laquelle nous étudions les impacts technico-économiques d'un retard de 15 jours du semis de blé tendre dans les enquêtes PK. Une telle pratique en céréales d'hiver est intéressante dans des parcelles quel que soit le niveau d'infestation en graminées. Ce décalage permet (i) de limiter la pression initiale en graminées en se décalant par rapport au pic de levée de ces dernières, surtout en contexte de faible infestation, et (ii) de positionner les herbicides dans des conditions climatiques plus adaptées (Chambre d'agriculture d'Eure-et-Loir, 2022). On observe alors un moindre recours aux herbicides et notamment au prosulfocarbe. Par ailleurs, cela permet de réduire les contaminations d'un certain nombre de cultures non cibles aux alentours quand ces dernières peuvent être récoltées dans ce laps de temps supplémentaires que leur offre ce décalage de semis (et donc de traitement au prosulfocarbe). Ce levier est d'ores et déjà mobilisé dans les parcelles n'ayant pas recours au désherbage chimique. Dans l'enquête PK grandes cultures 2017, la date de semis moyenne de ces dernières est ainsi plus tardive que dans les parcelles ayant recours au désherbage chimique. Le retard moyen de la date de semis varie de quatre jours (en orge) à dix jours (en blé tendre). Néanmoins, un tel levier dépend fortement des conditions pédoclimatiques qui conditionnent elles-mêmes l'entrée dans les parcelles et les plages possibles d'intervention. Par ailleurs, si sa mobilisation permet de limiter le désherbage d'automne, certains conseillers nous ont indiqué qu'il serait difficile de le supprimer entièrement en situation de forte infestation. En effet, la crainte est alors trop grande de se faire « envahir » par les adventices au printemps. Il y a une dizaine d'années, le désherbage de printemps pouvait avoir une efficacité considérée comme suffisamment intéressante pour assurer un rattrapage. Avec la montée des résistances de ray-grass et vulpins, le désherbage chimique de printemps n'est plus aussi efficace et les agriculteurs se prémunissent d'un possible envahissement en assurant un désherbage d'automne efficace.

La pratique des faux-semis peut aussi être mobilisée quelques semaines avant les semis d'automne. Elle permet de diminuer le stock semencier de l'horizon superficiel des parcelles et ainsi réduire la pression de certaines adventices dans les céréales (Bonin et Gautellier Vizioz, 2022). La réussite de cette technique nécessite néanmoins des conditions climatiques adéquates alternant pluie et période

séchante, le recours à des outils adaptés et est efficace sur un certain nombre de graminées mais pas toutes. La météo doit être propice à la levée des adventices, notamment en termes d'humidité. La préparation du sol doit être fine afin d'établir un bon contact entre la graine adventice et la terre pour favoriser sa levée. Selon la période de réalisation du faux-semis, les adventices sur lesquelles la technique sera efficace ne sont pas les mêmes. Arvalis indique qu'il est possible de détruire mécaniquement les adventices en interculture. Néanmoins, les conditions climatiques au moment de l'intervention et des jours suivants sont déterminantes afin de limiter les repiquages, ce qui est d'autant plus important si la destruction du faux-semis se fait juste avant le semis de la culture. Dans ce cas, Arvalis préconise une destruction au glyphosate. C'est d'ailleurs pour cela que certains agriculteurs se posent la question de la pertinence du recours au faux-semis quand celle-ci implique l'utilisation de glyphosate (échange terrain). Pour conclure, les conditions ne sont donc pas toujours réunies pour faire du faux semis un succès.

Le désherbage mécanique en céréales est possible et mobilisé par les agriculteurs n'ayant pas recours au désherbage chimique. Par exemple, le recours à la herse étrille ou la houe rotative peut être un moyen de mobiliser cette approche. Néanmoins, elles ne sont pas toujours suffisamment efficaces à elles seules pour la gestion des graminées adventices. De plus, le faible écartement entre les rangs fait que le recours au binage n'a quasiment pas lieu. En effet, cela nécessite beaucoup de technicité afin de ne pas engendrer de dégâts irréversibles (CUMA Ouest, Région Bretagne). La CUMA Ouest fait état de l'apparition de nouvelles machines de binage sur le marché qui permettraient d'étendre la plage d'intervention pour le désherbage mécanique, notamment en réalisant des passages à des stades plus avancés de la culture et des adventices. Elle présente par exemple des bineuses permettant de travailler avec des inter-rangs de 30 cm nécessitant donc de semer deux lignes de manière rapprochée. L'autoguidage permet de réduire l'écartement entre les rangs. Ici, la CUMA évoque un écartement de 15 à 17 cm. L'augmentation de la densité de semis sur la ligne peut aussi être de mise.

La gestion des menues-pailles apparaît comme un levier mobilisable, en association avec d'autres, afin de gérer les adventices en céréales d'hiver. Arvalis a mené un essai sur plusieurs années confortant l'intérêt de cette technique à effet cumulatif (Metais et Brun, 2020). L'essai démontre un effet très significatif sur ray-grass, avec des retombées positives qui s'amplifient d'année en année sur le rendement. Il a été réalisé de 2014 à 2018 dans une parcelle non labourée, en présence de ray-grass résistants aux antigraminées foliaires et dans le cadre d'une succession de céréales d'hiver. Au printemps 2015, après plusieurs exportations de menues-pailles, il y a 40% de ray-grass en moins par rapport à la modalité sans exportation des menues pailles ; 50% en moins l'année suivante. En 2017 cette diminution atteint même -75% par rapport à la modalité sans exportation. Pour autant, la gestion des menues pailles est un exemple de levier peu mobilisé actuellement, pour lequel il reste une grande marge de manœuvre. Dans l'enquête PK grandes cultures 2017, près de 10% des parcelles seulement indiquent récolter les menues pailles, et ce indépendamment de leurs pratiques de désherbage (chimique ou non).
C'est typiquement un levier qu'il est nécessaire de mobiliser en parallèle d'autres leviers, notamment la diversification de la rotation, pour obtenir des résultats satisfaisants. Par ailleurs, cette pratique constitue un investissement et nécessite une constance d'application sur plusieurs années pour induire une diminution significative des levées d'adventices. L'avantage est donc d'autant plus marqué que l'on aura réussi à vider une grande partie du stock semencier constitué sur les précédentes années. La gestion des menues pailles nécessite des équipements spécifiques que les agriculteurs ne détiennent

pas nécessairement. Ils ont un coût et entravent le débit de moisson, un moment jugé crucial : les agriculteurs peineront à bloquer une remorque et un tracteur pour exporter hors de la parcelle les menues pailles. Les systèmes de collecte trainés derrière la moissonneuse-batteuse la rallonge de plusieurs mètres. Cela complexifie d'autant plus les manœuvres que les parcelles sont irrégulières et de petites tailles. Enfin, comme cet équipement sert au moment de la moisson exclusivement, il y a peu de marge pour des achats partagés, tous les besoins s'exprimant en même temps. Pourtant, la gestion des menues pailles reste le symbole d'une gestion préventive et régulière qui distinguera clairement les situations bien maitrisées de celles où tout devient compliqué, aucune des options ne pouvant régler (seule) un problème rendu inextricable. A 200 levées de ray-grass par m², beaucoup d'actions peuvent maintenir la situation gérable. Avec 2000 levées de ray-grass au m², il reste toujours trop de pieds non maitrisés pour enrayer la démographie de l'adventice. De manière presque contre intuitive, il reste d'autant plus intéressant d'avoir recours à la gestion des menues pailles qu'il n'y a presque pas de besoin. Gérer les menues pailles peut grandement contribuer à maintenir des parcelles très propres. L'existence d'un marché local de valorisation des menues pailles pour un usage en méthaniseur ou pour les poulaillers peut apporter de l'attractivité à cette technique. Les collectivités peuvent sans doute en faire une action en faveur de leurs agriculteurs.

Pour conclure sur cette partie des leviers envisagés et freins associés, il existe déjà un certain nombre de leviers mobilisables. Certains le sont déjà largement, d'autres nécessiteraient d'y consacrer du temps et des moyens de recherche afin de produire des références, de les adapter pour d'autant plus de performance, un recours plus facile et accessible, un conseil technique, etc. Finalement, comment faire pour rendre la mobilisation de ces leviers attractive et les déployer à plus large échelle ? De manière générale, plusieurs freins sont régulièrement cités aujourd'hui, tels que le manque de débouchés ainsi que le manque de conseil technique pour les cultures de diversification, la difficulté de gestion des incertitudes des conditions pédoclimatiques, les impacts sur les rendements, les débits de chantiers et le temps humain important qu'ils peuvent nécessiter, le manque d'équipement, les délais pour obtenir une machine et le coût important pour s'équiper, des résultats significatifs qui se font sentir parfois qu'au bout de plusieurs années, le manque de variétés adaptées (à des semis plus tardifs par exemple), etc. On peut aussi supposer que l'attrait pour l'ensemble de ces leviers préventifs est rendu d'autant plus faible : du fait de l'existence de solutions chimiques efficaces et peu coûteuses (bien que la conjoncture économique actuelle remette cet argument de plus en plus en question) et d'un système d'évaluation des performances et de comptabilité agricole qui ne rend pas bien compte des effets différés et de moyen terme et n'intègre que très marginalement les conséquences environnementales ou sur la santé (Mamy et al., 2022).

Il nous semble qu'il y aurait des gains substantiels à mettre en place un marché local des menues pailles et à rendre leur collecte plus aisée car actuellement, trop peu de pratiques se concentrent sur le risque de retourner des semences au sol.

L'analyse de la littérature scientifique ainsi que les résultats d'essais soulignent les bénéfices des cultures associées sur la maitrise de la flore adventice (Liebman et Dyck, 1993 ; Melander *et al.*, 2005). De même, les expérimentations de conduite de culture dans un couvert végétal vivant (souvent une légumineuse) semblent prometteuses.

Enfin des travaux avaient été entrepris pour évaluer les choix variétaux les plus appropriés à des conduites en conditions sub-optimales (Lever et al., 2022) ou pour une conduite en AB[53] et elles avaient notamment concluent à l'intérêt de variétés à fort pouvoir couvrant ; des variétés qu'il serait sans doute pertinent de mobiliser compte tenu de l'évolution générale du contexte.

4.5.1.3. Zoom sur le retard de date de semis

Dans le cas spécifique des céréales d'hiver, le décalage (retard) de la date de semis fait partie des principaux leviers mentionnés à la fois dans la littérature grise, et par les experts du terrain. En diminuant la pression adventice sur la culture, le retard du semis ne se substitue pas au désherbage chimique d'automne, mais permet de le limiter, *via* la réduction du nombre de traitements ou des doses employées. Ce levier présente de plus l'avantage d'être pratiqué, bien que minoritairement par rapport au traitement chimique, par un nombre assez conséquent d'agriculteurs. Son effet est sans doute plus ou moins marqué selon les conditions automnales de l'année considérée mais il présente une valeur suffisamment générique pour que l'on s'y intéresse. De fait, le chiffrage des conséquences de son application peut être directement analysé dans les bases de données, notamment dans les données issues des enquêtes PK.

Nous avons ainsi étudié l'impact du décalage de la date de semis de 15 jours pour les cultures de céréales d'hiver, au regard des indicateurs technico-économiques analysés de manière récurrente dans la partie ***4***, ainsi qu'au regard de la dose moyenne de prosulfocarbe employée à l'hectare. En pratique, la date de semis n'est pas homogène sur le territoire national. Dès lors, nous avons considéré comme recouvrant une situation de semis tardif toute parcelle dans laquelle le semis était effectué plus de 15 jours après la date médiane de la région dans laquelle elle se situe. Nous avons ensuite appliqué la méthodologie fondée sur la pondération par les scores de propension, présentée en partie ***4.1***, pour comparer les parcelles pratiquant un semis précoce ou médian, à celles pratiquant un semis plus tardif. Nous avons appliqué l'analyse pour les céréales d'hiver présentes dans PK, à savoir le blé, tendre et dur, l'orge et le triticale. Toutes les parcelles de céréales de printemps, en large minorité, ont été exclues.

Les principaux résultats sont donnés dans le ***Tableau 24***. Les cases de ce dernier sont colorées en fonction de la différence entre semis précoce/classique et semis tardif. Une case grise suggère l'absence de différence significative, une case orange indique un désavantage pour les parcelles semées tardivement, et inversement pour une case verte. L'intensité de la couleur donne la confiance dans l'effet, en suivant la définition donnée dans le ***Tableau 7***.

Les résultats permettent de distinguer clairement deux groupes de cultures : le blé d'un côté, et l'orge et le triticale de l'autre. Dans le deuxième, la pratique du retard de semis n'est pas corrélée à une baisse des doses moyennes de prosulfocarbe à l'hectare, ni même à une baisse des IFT totaux et herbicides de manière générale. En revanche, l'analyse suggère que le retard de semis implique une baisse des rendements, qui se traduit par une baisse de la marge nette significative en orge. En clair, l'analyse ne permet pas de mettre en évidence un avantage à la mobilisation du retard de semis en orge et en triticale.

[53] https://www6.rennes.inrae.fr/igepp/Equipes-de-recherche/MVI-Materiel-Vegetal-Innovant/Projets/Ble-Adventices-III

En blé en revanche, la situation est différente. L'analyse suggère un effet fort sur les doses moyennes employées de prosulfocarbe et sur les IFT, qui baissent significativement. La baisse des doses frôle les 40% en blé tendre sur l'année 2017. Si l'on prend aussi en compte l'année 2014, la baisse est légèrement moins marquée, et avoisine les 600 g/ha, soit entre 25 et 30% de la dose moyenne appliquée par les semis précoces/classiques. La baisse des IFT est comprise entre 10 et 20%. Toutefois, à l'instar de l'orge et du triticale, le décalage du semis en blé est corrélé à des baisses de rendement de l'ordre de 4 q/ha, soit un peu plus de 5%. Cette baisse de rendement n'étant pas compensée par une différenciation des prix de vente, ni par les charges, elle se traduit logiquement par une baisse de la marge nette, de 70 à 85 €/ha.

Tableau 24 : Analyse technico-économique de l'impact du décalage de la date du semis en céréales d'hiver

Culture	Rendements	IFT herbicide	IFT total	Marge nette	Quantité de prosulfocarbe (2017)	Quantité de prosulfocarbe (2014/2017)
Blé tendre	- 4,21 q/ha	- 0,36	- 0,59	- 69,32 €/ha	- 877,12 g/ha	- 622,12 g/ha
Blé dur	- 3,99 q/ha	- 0,23	- 0,43	- 86,98 €/ha	- 742,05 g/ha	- 588,56 g/ha
Orge	- 5,67 q/ha	+ 0,01	- 0,27	- 92,78 €/ha	+ 183,83 g/ha	+ 273,05 g/ha
Triticale	- 3,29 q/ha	- 0,1	- 0,14	- 25,01 €/ha	- 172,99 g/ha	+ 48,07 g/ha

Source : propre élaboration à partir des enquêtes pratiques culturales 2017 et pratiques phytosanitaires 2014 en grandes cultures

Dès lors, la perspective d'une massification d'une telle pratique pose plusieurs questions. Tout d'abord, si la baisse de rendement peut sembler faible au regard de la baisse des IFT et de la quantité de prosulfocarbe (5% contre 20 voire 30%), elle reste sans doute décisive pour l'agriculteur qui raisonne l'ensemble de son système dans un objectif de rendements élevés. L'acceptation d'une telle baisse, au niveau individuel, est donc contestable. Enfin, le blé est l'une des principales cultures françaises, en surface et en volumes produits et exportés. A cet égard, et toujours dans l'hypothèse d'une massification de la mobilisation de ce levier, une baisse de la production nationale de 5% n'est sans doute pas sans conséquence, sur la balance commerciale française par exemple. Si on devait tenter de mobiliser cette approche, il y aurait donc un travail de recherche, et notamment de sélection variétale, pour retenir des variétés qui performent bien dans ces conditions pour gommer, au moins en partie, l'écart de rendement. A noter tout de même que la baisse de 5% à l'échelle nationale est sans doute peu probable puisqu'elle impliquerait que toutes les surfaces en blé mobilisent cette technique. Le surcoût observé à l'adoption d'un semis retardé peut fournir une première ébauche de la compensation financière qu'il faudrait accorder pour que les agriculteurs qui peuvent inscrire cette pratique, l'adopte volontairement.

Enfin, notons que ces baisses de doses sont estimées sur la base de deux années uniquement, 2014 et 2017. Nous avons vérifié les contextes météorologiques de ces deux années, afin d'évaluer l'impact de ce dernier sur la baisse des doses constatées (*i.e.* est-ce que 2017 était une année particulièrement propice au décalage de semis ?). Nous avons mobilisé les données issues de la base SAFRAN de Météo-France, afin de comparer les automnes météorologiques (septembre-octobre-novembre) de 2014 et 2017 avec ceux des autres années sur la période 2009-2021. Il ressort que l'automne 2017 fut particulièrement sec, ainsi que plutôt froid et peu ensoleillé. A l'inverse, l'automne 2014 est le plus chaud de la période, et fut globalement plus humide que la moyenne. Le ***Tableau 25*** donne le détail

de quelques variables météorologiques pour les automnes 2014 et 2017, ainsi que la moyenne de la période 2009-2021. Le fait d'estimer la baisse des doses associées au décalage de semis sur la base de deux périodes opposées sur le plan météorologique atténue le risque que cette baisse soit uniquement liée à un contexte particulier.

Tableau 25 : Description météorologiques des automnes 2014 et 2017

Période	Humidité relative (%)	Indice d'humidité des sols (%)	Rayonnement visible (J/cm²)	Températures (°C)	Précipitations liquides journalière (mm)	Ruissellement journalier (mm)
2014	82,42	58,21	911	13,2	2,78	0,29
2017	80,93	43,74	853	11	1,99	0,14
Moyenne 2009-2021	81,05	48,81	894	11,7	2,63	0,23

Source : Propre élaboration à partir des données issues de la base SAFRAN de Météo-France

4.5.2. Cas des pommes de terre

4.5.2.1. Bref rappel de la situation actuelle

En 2017, les pommes de terre reçoivent environ 5% des volumes de prosulfocarbe vendus en France. Environ deux tiers des surfaces cultivées en pomme de terre sont traitées au prosulfocarbe (enquêtes pratiques culturales Grandes cultures 2017).

La pomme de terre est une culture de printemps qui ne recouvre pas toujours entièrement le sol. La gestion du désherbage est donc centrale dans la conduite de cette culture. En France, il est en très large majorité raisonné de manière chimique. La quasi-totalité des surfaces de pomme de terre sont désherbées chimiquement en prélevée sur butte définitive (Arvalis, 2018) et moins de 1% des surfaces cultivées en pomme de terre en France le sont en AB en 2017 (Enquêtes Pratiques culturales Grandes cultures 2017). Sa conduite en butte permet néanmoins de réaliser des actions de travail du sol qui peuvent être mobilisées à condition notamment que la météo le permette (voir partie ***4.5.2.2*** ci-dessous).
Les besoins en pomme de terre sont importants en France, notamment pour l'industrie. Les exploitations dans lesquelles on cultive des pommes de terre ont des surfaces très variables : de quelques dizaines d'hectares à plusieurs centaines. La taille des exploitations et les échanges de parcelles entre agriculteurs permettent de cultiver des surfaces importantes en pomme de terre tout en respectant un certain nombre d'années entre deux cultures de pomme de terre afin de limiter les pressions en ravageurs, maladies et adventices. Les contraintes d'organisation, de temps de travail, ou encore de météorologie, sont donc assez variables d'une exploitation à une autre.

Les cultures de pomme de terre sont généralement désherbées en mobilisant des programmes qui associent plusieurs substances actives complémentaires. Elles sont aujourd'hui en nombre restreint. Le produit DEFI, qui contient du prosulfocarbe, constitue régulièrement la base de ces programmes. Il a l'avantage de pouvoir être utilisé proche de la levée (seulement quelques jours), ce qui n'est pas le cas des autres matières actives telles que l'aclonifen et le flufénacet. Ces dernières, également à la base de nombreux programmes de désherbage en pomme de terre, sont plus contraignantes puisqu'il

est nécessaire de les appliquer 3 semaines avant la levée de la culture afin de limiter les phénomènes de phytotoxicité.
Par ailleurs, il existe très peu de solutions de rattrapage en pomme de terre ; elles sont au nombre de deux. La métribuzine fait partie de ces rares solutions mais elle est sur la sellette puisqu'elle est candidate à la substitution ; à ce jour, son approbation à l'échelle de l'UE court jusqu'au 31 juillet 2023. Par ailleurs, le flufénacet est autorisé aujourd'hui sur pomme de terre uniquement dans des produits où il est associé avec de la métribuzine. Son utilisation future apparait donc également incertaine à ce jour. Nous pouvons également noter le fait que l'aclonifen et la pendiméthaline sont déjà candidates à la substitution. Les programmes de désherbage sont ainsi principalement construits autour de molécules de prélevée ; ils sont réfléchis pour assurer un désherbage satisfaisant sans avoir recours à des solutions de rattrapage. Nous verrons un peu plus loin que le désherbage mécanique peut être mobilisé comme solution de rattrapage, à défaut d'avoir recours facilement à des substances actives de post-levée.
Un point majeur expliquant la forte mobilisation du prosulfocarbe en pomme de terre est la présence de plus en plus fréquente de ray-grass, et tout particulièrement de ray-grass résistant à d'autres familles herbicides telles que les inhibiteurs de l'ALS et les inhibiteurs de l'ACCase. Ce n'est à ce jour pas le cas du prosulfocarbe qui est donc un levier de lutte contre le ray-grass. De manière plus générale, c'est aujourd'hui un des leviers principaux de lutte contre les graminées adventices. C'est notamment le cas en Normandie ; moins dans le Nord-Pas-de-Calais où DEFI est apprécié pour son effet sur les morelles.

Les contaminations au prosulfocarbe dont on entend le plus parler ont principalement lieu en automne, donc lors du désherbage des céréales d'hiver. Il s'agit notamment des contaminations des vergers et, pour ce qui concerne les cultures annuelles, les récoltes de sarrasin ou de chia. Néanmoins, concernant le désherbage des pommes de terre au printemps, se pose la question des contaminations des cultures maraîchères ou du cresson. Nous peinons à obtenir des chiffres quant à la fréquence de ces évènements, les cultures non cibles concernées, les surfaces impactées, et les conséquences économiques que cela engendre pour les agriculteurs amenés à détruire ou déclasser leur récolte.
Selon une coopérative maraîchère en AB avec laquelle nous avons pu échanger, des traces de prosulfocarbe sont aussi retrouvées dans des cultures qui ne sont pourtant pas cultivées au moment des utilisations de l'herbicide. Se pose donc la question des autres voies de contaminations possibles au-delà de la dérive et de la volatilisation.
Pour limiter les contaminations par le prosulfocarbe, les conseillers préconisent l'utilisation de l'outil Quali'Cible par les agriculteurs. Néanmoins, nous ne sommes pas parvenus à estimer son niveau de mobilisation (*cf.* partie ***3.3.1***). Par ailleurs, les conseillers rappellent les grandes lignes de la règlementation : buses anti-dérive et distances obligatoires, ainsi que les bonnes pratiques de pulvérisation. Il s'agit notamment de traiter en l'absence de vent. A noter qu'en culture de pomme de terre, un léger vent latéral pose problème puisqu'un seul flan de la butte est alors désherbé. Cette condition est donc généralement bien respectée par les producteurs.

4.5.2.2. Leviers envisagés et freins à leur mobilisation

Comme nous l'avons vu précédemment dans le cas des céréales d'hiver (*cf.* partie ***4.5.1.2***), un certain nombre de leviers sont envisagés pour aller vers une moindre dépendance au prosulfocarbe en

pomme de terre. Certains leviers sont déjà fréquemment mobilisés, d'autres nécessitent de poursuivre les expérimentations et la production de références.
Une combinaison de leviers préventifs peut permettre de réaliser un désherbage sans chimie ou, *a minima*, de diminuer les quantités de prosulfocarbe utilisées. Il peut aussi s'agir d'avoir recours au désherbage mixte.

Le tableau présente les leviers envisagés et les freins associés.

Tableau 26 : Leviers pour une moindre dépendance des pommes de terre au prosulfocarbe et freins associés

Leviers envisagés déjà mobilisés et/ou nécessitant des expérimentations et production de références	**Freins à leur mobilisation**
• Désherbage 100% mécanique : alterner herse étrille et buttages (souvent deux à trois interventions de chaque) • Désherbage chimique localisé sur le rang & mécanique dans les inter-buttes • Désherbage mécanique en rattrapage de la prélevée • Broyage des menues-pailles dans les précédents • Attention particulière au choix des parcelles	• Débits de chantiers, temps humain • Disponibilité de plages avec des conditions pédoclimatiques favorables jugées trop aléatoires • Incompatibilité potentielle entre pratiques : Repenser le tamisage des buttes ou avoir du matériel adapté pour l'associer à du désherbage mécanique • Incompatibilité potentielle entre pratiques : Difficulté avec gestion du risque de ruissellement/lutte anti érosion • Interventions mécaniques pas trop tardives pour ne pas perturber la tubérisation et affecter le rendement • Décalage dates semis et faux-semis : pas pertinents sur pomme de terre • Désherbage chimique localisé : possible mais peu mobilisé (retours terrain), nécessitant des équipements adaptés • Contractualisation avec cahier des charges limitant les marges de manœuvre

Nous détaillons ci-dessous, à titre d'exemples, quelques leviers et freins associés que nous avons retrouvés dans la littérature grise ou lors de nos divers échanges avec les experts terrain.

<u>Mobiliser les interventions mécaniques en conventionnel :</u>
Il est possible de désherber les pommes de terre mécaniquement. Cela nécessite une alternance de passages de herse étrille et de buttages. Il est également nécessaire de combiner cela à autant de leviers agronomiques que possible. Dans une étude publiée en 2019, Arvalis analyse les leviers mobilisables pour désherber en culture de pomme de terre, qu'il s'agisse de lutte préventive ou de moyen de contrôle direct (Blaszczyk *et al.*, 2019). Parmi les leviers préventifs sont cités le travail du sol, notamment le labour, et la diversification des rotations en alternant cultures de printemps et d'hiver malgré ses effets limités sur le ray-grass.

Des essais existent en désherbage uniquement mécanique sur des cultures conventionnelles. Les résultats sont variés ; il en ressort que cela nécessite un temps de travail important, de bonnes conditions météo et de l'organisation. Les parcelles désherbées mécaniquement ne sont souvent pas aussi propres que celles qui le sont chimiquement, notamment parce qu'un désherbage mécanique est généralement suivi de repiquages. Néanmoins, des essais présentent des efficacités intéressantes, bien que moins élevées que pour du désherbage mixte (chimie localisée sur rang puis mécanique en inter-butte), lui-même présentant des efficacités plus faibles que du 100% chimique (Comité technique de la Pomme de terre Nord-Pas-de-Calais et Chambre d'agriculture Nord-Pas-de-Calais, 2022). A noter également que cet essai indique « [qu']il n'a pas été observé au bout d'une semaine de symptômes ou dégâts pouvant entrainer une perte de rendement », pour l'ensemble des modalités de désherbage chimique et/ou mécanique. Néanmoins, le matériel nécessaire au désherbage mécanique a un coût qui peut paraître rédhibitoire pour certains agriculteurs, notamment ceux cultivant de petites surfaces en pomme de terre ; certains experts soulignent néanmoins que ce coût est moindre que pour un pulvérisateur. Afin d'optimiser les coûts, il pourrait alors être envisagé de fonctionner en CUMA. Cette option est cependant peu réaliste car les fenêtres météo optimales sont trop rares et trop courtes pour que l'ensemble des adhérents d'une CUMA parviennent à travailler dans les temps. C'est d'autant plus le cas lors d'années pluvieuses.

A noter également que le désherbage mécanique est compliqué dans des parcelles ou un cloisonnement inter-butte a été réalisé. Cette technique, qui permet de limiter l'érosion des sols par ruissellement et écoulement, verra les micro-buttes détruites par le passage de la bineuse. Il est nécessaire d'avoir recours à un outil spécifique permettant de les reconstruire juste après l'action de désherbage. Une bineuse rebutteuse pourra faire cela. Cela nécessite donc une implication des constructeurs de matériels agricoles pour démocratiser ces outils ; ils doivent être accessibles financièrement pour pousser au déploiement de ces techniques.

Le désherbage mécanique pose également la question de sa compatibilité avec le tamisage des buttes. Cette technique permet de retirer les cailloux des buttes et ainsi d'assurer une meilleure qualité des récoltes puisque les tubercules sont alors plus réguliers. Pour se faire, les cailloux sont décalés dans l'inter-buttes. Le désherbage mécanique les remonte ensuite sur les buttes. A noter que dans certaines régions, le tamisage de terre est presque systématique. Le désherbage mécanique est possible en système tamisé mais il requière un matériel adapté.

A défaut de réaliser un désherbage exclusivement mécanique, il est de plus en plus utilisé en complément de la chimie, après cette dernière, en condition de rattrapage. Cela pourrait être d'autant plus le cas si les molécules utilisées aujourd'hui en rattrapage étaient amenées à être retirées du marché. Les actions mécaniques peuvent s'avérer très efficaces comme solutions de rattrapage, notamment sur chénopodes.

Enfin, il faut noter que la gestion chimique des adventices localisée sur le rang, combinée à une gestion mécanique des inter-buttes est techniquement possible en culture de pomme de terre selon Arvalis (Roques, 2022), mais quasi inexistante (retours terrain). Il existe des expérimentations mais très peu d'agriculteurs sont équipés. Arvalis indique « [qu']un désherbage localisé sur le rang en prélevée complété par du mécanique en post-levée (avec un passage d'outil de type butteuse à disques ou herse étrille) est une stratégie envisageable ». Il est nécessaire d'utiliser une rampe et des buses adaptées. L'institut indique que cette technique permet de réduire de 75% la surface traitée relativement à un passage en plein. Son efficacité dépend des conditions climatiques. Le recours à cette stratégie mixte de désherbage différentiant les buttes et inter-butes est généralement perçue comme plus coûteuse

économiquement et en temps de travail, et il est nécessaire de travailler sur des adventices jeunes (Roques, 2022).

Cas de la culture de pomme de terre en AB :

Moins de 1% des surfaces cultivées en pomme de terre en France en 2017 le sont en AB. Selon les experts interrogés, cela est notamment dû au marché. En Nord-Pas-de-Calais, aucune conversion vers l'AB n'a eu lieu en 2022 en pomme de terre ; des producteurs arrêtent même de produire en AB car leur production se vend à un prix très proche de celui du conventionnel, pour des charges qui se maintiennent à un niveau élevé en AB.

En AB, le désherbage est réfléchi à l'échelle de la rotation. Il est nécessaire qu'elle soit longue : minimum 5 ans, et de 7 à 10 ans dans l'idéal, en alternant cultures de printemps et d'hiver. Le désherbage en AB est soit mécanique soit thermique :

- Thermique : technique mobilisée par des agriculteurs dont le modèle est proche de celui en conventionnel *i.e.* plantations en buttes définitives ou quasi définitives. Le désherbage thermique est éventuellement associé à un passage de herse étrille. Cette solution pose toutefois des problèmes de maladies fongiques et parasites telluriques. Cette technique est efficace mais coûteuse et lente (Aval Douar Beo, 2016).
- Désherbage mécanique : technique consistant à réaliser trois passages de herse étrille avant la levée des pommes de terre, puis deux à trois buttages consécutifs avant recouvrement du sol. Cette technique est peu coûteuse et efficace mais lente. Un désherbage uniquement à la herse étrille peut également être envisagé. Il nécessite plusieurs passages successifs jusqu'au buttage définitif. Cette technique est peu coûteuse, efficace et rapide (Aval Douar Beo, 2016).

A noter qu'en AB, la fertilisation d'origine organique des cultures de pomme de terre aboutit à un niveau moindre qu'en conventionnel. Or, une forte fertilisation va avoir tendance à favoriser le développement des adventices. Les parcelles en AB et celles en conventionnel ne partent donc en général pas du même niveau de risque d'un point de vue de la pression en adventices. Néanmoins, les parcelles conduites en AB peuvent avoir un aspect similaire à celles en conventionnel : le désherbage non chimique peut donc donner satisfaction mais il reste fortement tributaire de bonnes conditions climatiques sur des parcelles qui s'y prêtent.

Mobiliser l'ensemble des leviers agronomiques :

Pour conclure, que ce soit en AB ou en conventionnel, le désherbage est facilité et rendu plus efficace par la mobilisation de l'ensemble des leviers agronomiques. En voici quelques exemples, certains n'étant pas nécessairement pertinents ou faciles à mettre en œuvre en culture de pomme de terre :

- Rotation : elle dure idéalement entre 7 et 10 en AB, plutôt entre 5 à 6 ans en conventionnel. Plus elle est longue et diversifiée, moins la pression adventice sera forte.
- Décalage dates de semis : si cette technique semble être intéressante pour un certain nombre de cultures de céréales d'hiver, elle ne semble pas être un levier en culture de pomme de terre. En effet, les chantiers de semis en pomme de terre ont lieu dès que le sol se réchauffe, que ce soit en AB ou en conventionnel. Cela rend donc également difficile et moins pertinente la réalisation de faux-semis pour la culture de pomme de terre mais cela reste très pertinent si cela peut être mobilisé dans les précédents.
- Broyage des menues pailles et usage des écimeuses : ces techniques peuvent être mobilisées dans les précédents céréales de la pomme de terre. Elles permettent de contenir la pression en ray-grass mais restent peu pratiquées.

4.5.3. Cas des porte-graines : une situation très tendue

Au-delà des cultures porte-graine rattachées à leurs cultures de consommation sur lesquelles le prosulfocarbe est autorisé, ce dernier est principalement utilisé sur les cultures porte-graine de fétuque élevée (semences fourragères) ainsi que sur quelques cultures de semences potagères (carottes, oignons, et autres apiacées telles que coriandre, persil, panais, fenouil).

Les cultures porte-graine pouvant être traitées au prosulfocarbe représentent une faible surface à l'échelle de la France et relativement aux cultures de consommations traitées au prosulfocarbe. A titre d'exemple, les surfaces cultivées en semences de céréales à paille en 2021 représentent environ 125 000 ha (SEMAE[54]) ; cette même année, les céréales à paille pouvant être traitées au prosulfocarbe représentent environ 7,39 millions d'hectares, semences comprises[55]. Il est néanmoins important d'évoquer leur cas car elles sont aujourd'hui très dépendantes de cet herbicide. En cas de retrait de molécules fortement mobilisées, et sans changements profonds des conduites de ces cultures leur permettant de se défaire de cette dépendance, certaines cultures porte-graines risquent de disparaître du territoire français.

Les filières porte-graine font elles-aussi face à un nombre limité de solutions de désherbage chimique. Les programmes de désherbage combinent l'application de plusieurs molécules en plusieurs passages et il n'existe pas d'alternatives non chimiques facilement mobilisables à ce jour. Par ailleurs, les agriculteurs engagés dans de la production de semences ont généralement un parc matériel bien fourni et représentant un certain coût afin de récolter, battre, sécher, etc.

Par ailleurs, les normes de pureté imposées par les semenciers sont très strictes et parfois supérieures aux normes officielles. En effet, il apparaît très difficile de trier et séparer certaines graines adventices des graines de la culture d'intérêt. Les agriculteurs ont donc finalement peu de choix sur leurs itinéraires techniques et cherchent à assurer un désherbage efficace. L'implication des semenciers et des fabricants de matériels agricoles apparaît pertinente afin de déployer des trieuses post-récolte efficaces et accessibles financièrement. Cela permettrait d'assouplir les normes de pureté imposées aux agriculteurs. Comme il s'agit de volumes relativement limités, les options de couplage entre différents principes de tri, y compris optique, ou nécessitant plusieurs passages peuvent plus facilement se justifier.

On peut aussi se poser la question de changements plus profonds des filières porte-graine. Quid de modèles par petits contrats, voire des récoltes de bandes isolées qui ressemblerait un peu au modèle de l'AB en semences potagères ? Néanmoins, un tel modèle est très exigeant en main d'œuvre et implique donc des coûts très importants.

Pour la production de semence de carottes, des expérimentations ont été conduites pour repiquer des carottes déjà formées et ne pas avoir à laisser la parcelle sur deux campagnes[56] (la carotte ne va

[54] https://www.semae.fr/etudes-donnees-statistiques-semences/
[55] https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2215/cd2022-15_SAA_2021D%C3%A9finiifV2.pdf
[56] En contexte AB : http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_semences/fiche-carotte.pdf

produire des graines que la deuxième saison). La production est moins bonne mais l'approche ouvrait des perspectives qui pourraient s'avérer précieuses.

Finalement, si les cultures porte-graine représentent une faible part de la SAU à l'échelle de la France, il est indispensable d'impliquer l'ensemble des maillons de ces filières afin (i) qu'elles soient résilientes notamment à de potentiels changements réglementaires futurs et ainsi (ii) de maintenir de telles filières sur nos territoires. Des moyens financiers pour la recherche semblent nécessaires ; des enveloppes pourraient également viser le développement de petits contrats.

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

5.1. Scénarios étudiés

Cette partie vise à estimer l'impact sur les volumes nationaux de différents scénarios réglementaires hypothétiques ayant pour objectif la réduction des doses employées de prosulfocarbe. Trois scénarios permettant de réduire les doses moyennes de prosulfocarbe employées par unité de surface ont été envisagés :

- Le premier scénario explore l'impact d'une réglementation qui limiterait l'usage du prosulfocarbe à une campagne sur deux uniquement.
- Le second repose sur le constat effectué en partie ***4.5.1.3***, selon lequel un décalage de 15 jours de la date de semis, par rapport à la date médiane de la région, permet d'économiser en moyenne environ 620 g/ha en blé tendre et 590 g/ha en blé dur, sur les données PK grandes cultures 2014/2017, et explore donc l'impact qu'aurait une généralisation du décalage de la date de semis pour la culture du blé si elle pouvait être conduite partout.
- Enfin, un troisième scénario s'intéresse à l'impact d'une pulvérisation de précision sur les cultures pour lesquelles une telle chose est possible. En pratique, la pomme de terre est la seule culture sarclée recevant du prosulfocarbe, et le troisième scénario se concentre donc sur cette culture. La suite de cette partie détaille la construction de chaque scénario.

5.1.1. Scénario A : emploi du prosulfocarbe un an sur deux uniquement

Ce scénario revient, pour les couples culture-précédent pouvant recevoir tous deux du prosulfocarbe, à autoriser le prosulfocarbe en année N-1 sur le précédent, et à l'interdire en année N sur la culture. L'estimation de la baisse des tonnages est faite en plusieurs étapes. En premier lieu, il convient d'estimer les surfaces concernées, soit les surfaces qui utilisent effectivement le prosulfocarbe deux ans de suite (en année N sur la culture et en année N-1 sur le précédent). On peut ensuite multiplier ces surfaces par la dose moyenne de prosulfocarbe qu'elles reçoivent en année N pour estimer les volumes concernés par l'interdiction proposée dans le cadre de ce scénario. Ces doses moyennes sont issues des données PK Grandes cultures 2014 et 2017, et nous faisons l'hypothèse qu'elles ont peu évolué depuis.

Tout l'enjeu réside donc dans l'estimation des surfaces recevant du prosulfocarbe deux campagnes de suite. Nous estimons ces surfaces par couple culture-précédent pouvant recevoir du prosulfocarbe (par exemple : blé puis orge la campagne suivante), en partant des données du RPG. En pratique, nous manquons d'information (doses moyennes, proportion des surfaces traitées, etc.) à propos d'un certain nombre de cultures sur lesquelles le prosulfocarbe peut être utilisé ; il s'agit des cultures qui ne font pas l'objet d'enquête PK (les arbres et arbustes, le seigle, l'épeautre, le pavot, les oignons, les fraises et les PPAMC). Selon les données du registre parcellaire graphique (RPG) 2020 et 2021, les couples culture-précédent reposant sur ces cultures représentaient environ 112 000 ha, soit près de 7% des surfaces totales pouvant recevoir du prosulfocarbe deux campagnes de suite. Nous avons donc décidé de ne pas les inclure dans les estimations effectuées dans le cadre de ce scénario, par soucis de simplification, et on fait l'hypothèse que leur non-prise en compte ne devrait avoir qu'une influence

marginale sur la baisse des volumes estimés. Par ailleurs, rappelons que le RPG recense les surfaces sujettes aux aides PAC. Ainsi une part des cultures pouvant recevoir du prosulfocarbe n'apparaissent pas dans les données du RPG. Néanmoins, pour les grandes cultures considérées, la quasi-totalité des surfaces est intégrée dans le RPG comme le rappelle l'***Annexe 2.***

Nous avons ainsi estimé les surfaces de chaque couple culture-précédent en retenant la surface moyenne qu'il représentait dans les 5 dernières campagnes du RPG (2016/2017 à 2020/2021). Au sein du RPG, comme chaque parcelle est identifiée, il est possible de suivre l'assolement d'une même parcelle plusieurs années. Les surfaces de chaque couple culture-précédent considéré sont données par le ***Tableau 27***.

Tableau 27 : Surfaces moyennes exprimées en hectare par couple culture-précédent sur les 5 dernières campagnes du RPG (i.e. de 2016/17 à 2020/21)

		Culture					
		Blé dur	**Blé tendre**	**Carotte**	**Orge**	**Pomme de terre**	**Triticale**
Précédent	**Blé dur**	18 836	15 827	132	25 303	647	580
	Blé tendre	6 823	362 175	1 032	838 109	53 166	50 656
	Carotte	167	921	144	354	452	13
	Orge	3 105	67 772	447	177 209	8 743	19 864
	Pomme de terre	1 134	79 109	205	2 478	1 451	224
	Triticale	196	8 353	38	15 834	236	41 536

Source : RPG de 2016/17 à 2020/21
Note : les surfaces sont exprimées en hectares

Ces surfaces correspondent aux surfaces ayant un assolement leur permettant de recevoir du prosulfocarbe deux campagnes de suite (pour les cultures considérées dans l'analyse). Il convient dès lors de les multiplier par la proportion des surfaces recevant effectivement du prosulfocarbe, pour estimer les surfaces recevant effectivement du prosulfocarbe deux campagnes de suite. Il s'agit ensuite de multiplier ces surfaces par la dose moyenne de prosulfocarbe employée pour la culture en année N. De manière plus formelle, on calcule les quantités de prosulfocarbe « économisées » selon ce scénario, pour le couple culture-précédent cp (culture c et précédent p), comme :

$$Q_{cp} = S_{cp} \cdot PST_p \cdot PST_c \cdot D_c$$

Avec Q_{cp} la quantité de prosulfocarbe économisée pour le couple cp, S_{cp} la surface du couple cp (***Tableau 27***), PST_c (resp. PST_p) la proportion de surfaces traitées au prosulfocarbe pour la culture c (resp. le précédent p), et D_c la dose moyenne appliquée dans la culture c. On somme ensuite ces quantités obtenues pour chaque couple culture-précédent : $Q = \sum_{cp} Q_{cp}$, avec Q la quantité totale de prosulfocarbe économisée selon ce scénario. Les valeurs retenues pour les variables PST_c (resp. PST_p, la proportion de surface recevant du prosulfocarbe) ont été choisies sur la base d'échanges avec des experts des cultures concernées et/ou à l'aide des données disponibles dans PK 2017 et/ou dans le SI Agrosyst du réseau DEPHY. Les doses moyennes par culture sont estimées sur la base des données PK 2017 ; on fait l'hypothèse qu'elles ont peu évolué depuis. Les valeurs finales retenues sont données

dans le ***Tableau 28***. Les résultats de ce scénario (ainsi que des autres) est donné plus bas, et le détail complet des calculs est disponible en ***Annexe 7***.

Tableau 28 : Liste des valeurs retenues pour le scénario A

Variable	Valeur retenue en blé tendre	Valeur retenue en blé dur	Valeur retenue orge	Valeur retenue en triticale	Valeur retenue en pomme de terre	Valeur retenue en carotte
PST_c (ou PST_p)	50%	50%	20%	20%	60%	45%
D_c	2,123kg	2,185 kg	2,184 kg	2,227 kg	2,418 kg	1,937 kg

Note : PST_c (resp. PST_p) la proportion de surfaces traitées au prosulfocarbe pour la culture c (resp. le précédent p), et D_c la dose moyenne appliquée dans la culture c

5.1.2. Scénario B : généralisation du décalage de la date de semis sur blé d'hiver

Ce scénario repose sur l'observation faite sur les données des enquêtes PK 2014 et 2017, selon laquelle un décalage de 15 jours de la date de semis en blé d'hiver (dur ou tendre), par rapport à la date médiane de la région, est corrélé à des baisses de dose moyenne de prosulfocarbe de l'ordre de 600g à l'hectare. Il suppose qu'une généralisation de cette pratique à un ensemble élargi agriculteurs est possible, et par là une baisse généralisée des doses employées sur la culture du blé en hiver, qui concentre la majorité des volumes de prosulfocarbe.

Dans ce scénario, on estime la baisse des volumes en multipliant (i) les surfaces (de blé d'hiver) traitées au prosulfocarbe et susceptibles d'employer le décalage de semis par (ii) la dose économisée grâce au décalage. Formellement, cela donne :

$$Q_c = S_c \cdot P_c \cdot PST_c \cdot B_c$$

Avec Q_c la quantité de prosulfocarbe économisée pour la culture c, S_c la surface totale de la culture c, P_c la proportion des surfaces adoptant le décalage de semis, PST_c la proportion des surfaces traitées au prosulfocarbe, et B_c la baisse des doses associée au décalage. Le volume total économisé, Q, s'obtient en somment les volumes de chaque culture : $Q = \sum_c Q_c$

Comme mentionné précédemment, la baisse des doses moyennes à l'hectare est estimée sur la base des données des enquêtes PK Grandes cultures 2014/2017. Les surfaces totales de blé tendre et de blé dur d'hiver sont données par le RPG 2021 (sa version la plus récente à la date d'écriture de ce rapport). Comme pour le scénario A, les proportions de surfaces traitées retenues découlent d'interactions avec des experts de ces cultures.

Reste alors à définir la proportion des parcelles pratiquant le décalage de semis. En pratique, la date de semis dépend largement de la région et du type de sol[57]. Ainsi, en 2017, la date médiane de semis du blé tendre d'hiver gravitait autour du 11 octobre en Bourgogne-Franche-Comté ou dans le Grand-Est, alors qu'elle se situait plutôt autour de fin octobre sur la façade atlantique, jusqu'à début

[57] C'est pratiquement impossible de décaler la date de semis sur un sol limoneux

novembre en Bretagne. Parler de décalage de semis n'a donc de sens qu'en se plaçant par rapport aux pratiques médianes de sa région. Pour cette raison, il est difficile de proposer une unique date butoir avant laquelle il serait déconseillé de semer, même de manière hypothétique pour les fins de ce scénario, afin d'estimer la proportion des parcelles qui devraient effectivement décaler leurs semis. Il est en outre impossible de supposer que 100% des parcelles décalent leur semis. En effet, certains agriculteurs le pratiquent déjà et ne peuvent donc pas repousser davantage ; d'autres ne pourront très probablement pas le mobiliser pour cause de conditions pédoclimatiques défavorables par exemple, ou manque de temps du fait de la multiplication des chantiers se superposant, ou autre. De manière arbitraire, nous avons construit ce scénario B de telle sorte que 50% des parcelles aient recours au décalage des semis. A titre de comparaison, dans les enquêtes PK 2014 et 2017, la part des surfaces extrapolées retardant déjà leur semis de 15 jours par rapport à la médiane régionale est de 10,5% en blé tendre, et 13,2% en blé dur. On voit ainsi que la massification de cette pratique à 50% des surfaces requiert un effort non négligeable. L'ensemble des valeurs retenues pour ce scénario est donné par le ***Tableau 29***.

Tableau 29 : Liste des valeurs retenues pour le scénario B

Variable	Valeur retenue en blé tendre	Valeur retenue en blé dur
S_c	4 942 926 ha (RPG 2021)	285 948 ha (RPG 2021)
P_c	50%	50%
PST_c	50%	50%
B_c	622.12g (PK 2014/2017)	588.56g (PK 2014/2017)

5.1.3. Scénario C : emploi du prosulfocarbe uniquement sur le rang en pomme de terre

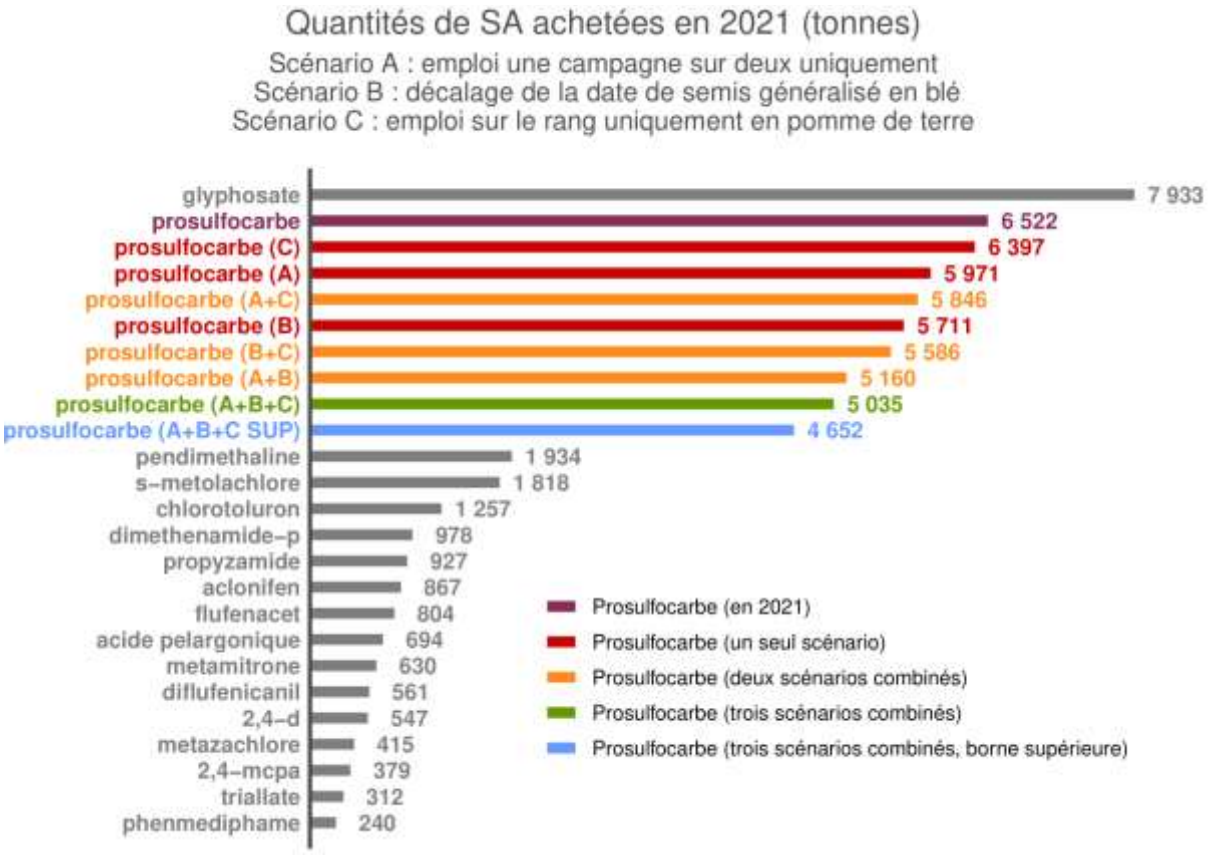
Ce dernier scénario explore l'impact d'une pulvérisation localisée systématique pour la culture de la pomme de terre. Ce scénario est restreint à cette dernière, car les céréales d'hiver ne sont pas sarclées. Généralement, on considère que le rang d'une culture sarclée telle que la pomme de terre représente environ un tiers de la surface de la parcelle. La généralisation d'une pulvérisation localisée correspondrait ainsi à une diminution de deux tiers de la dose employée.

Pour ce scénario, nous employons une méthodologie similaire à celle développée dans le rapport précédent portant sur le S-métolachlore (Reboud *et al.*, 2022). Plus précisément, nous considérons qu'une telle réglementation correspond à une réduction de la dose maximale utilisable à l'hectare de 66% (pour la pomme de terre uniquement), et nous appliquons la projection intermédiaire décrite dans le rapport précédent. Cette projection repose sur l'utilisation de l'indicateur QMC présenté en ***partie 2.4*** et nous renvoyons au rapport précédent pour les détails méthodologiques.

5.2. Résultats

Nous avons tenté d'estimer les baisses de tonnages qui seraient engendrées par l'adoption de différents scénarios, comme décrit précédemment. Nous avons de plus envisagé l'effet combiné de scénarios pris deux à deux, ainsi que l'effet combiné des trois scénarios puisqu'ils ne sont pas mutuellement exclusifs. Le fait que la baisse des tonnages associés soit relativement limitée, comme visible sur la ***Figure 15***, nous a incité à inclure une dernière combinaison de scénarios. Dans cette dernière, nous faisons passer la part des surfaces pratiquant le décalage de semis, dans le scénario B, de 50% à 70%, et nous combinons les trois scénarios. Cette dernière combinaison peut être vue comme une borne supérieure pour la baisse des volumes associée à un effort conséquent pour contenir le prosulfocarbe. Les résultats sont présentés en ***Figure 15***. Dans celle-ci, le violet correspond aux volumes achetés de prosulfocarbe en 2021 tels qu'enregistrés dans la BNVD (2021 étant l'année la plus récente à la date d'écriture de ce rapport), le rouge correspond à l'application d'un seul scénario réglementaire, l'orange à la combinaison de deux scénarios, le vert à la combinaison de trois scénarios, et le bleu à la borne supérieure de la baisse.

Figure 15 : Baisse des volumes de prosulfocarbe selon différents scénarios réglementaires



Dans le détail, on constate que l'impact d'une réglementation sur la culture de la pomme de terre uniquement (scénario C) est extrêmement limité (-125 tonnes environ). L'impact d'une interdiction une campagne sur deux (scénario A) est un peu plus marqué, mais devrait rester faible (-550 tonnes). Le scénario prédisant la plus forte baisse des tonnages est celui d'une généralisation d'un décalage de la date de semis pour la culture du blé (scénario B, -810 tonnes). Toutefois, ce scénario est aussi celui

faisant les hypothèses les plus fortes (décalage de semis systématiquement associé à une baisse de doses, hypothèse sur le nombre de parcelles adoptant le décalage, etc.).

De manière plus générale, on voit que la combinaison de ces différents scénarios fait baisser les volumes de 1 870 tonnes au maximum (borne supérieure), soit un peu moins de 30% des volumes de 2021. A titre de comparaison, cela ramènerait les quantités achetées de prosulfocarbe proches de leur niveau de 2017 (4 647 tonnes), et ne fait pas descendre le prosulfocarbe dans le classement des herbicides les plus utilisés. On voit de plus que de tels scénarios ne permettent pas de respecter les objectifs du Pacte Vert, qui vise une baisse de 50% de l'utilisation des produits phytosanitaires à l'horizon 2030, si on les déclinait à l'échelle de chacune des molécules les plus utilisées.

Par ailleurs, nous ne sommes pas en mesure d'estimer les impacts que pourraient avoir de tels scénarios sur les contaminations de cultures non cibles ou la présence de la molécule dans les différents compartiments environnementaux.

Enfin, il est important de garder en tête que ces scénarios se concentrent uniquement sur la baisse des volumes de prosulfocarbe engendrée par un potentiel changement réglementaire. Ils ne disent toutefois rien du report possible sur d'autres molécules, qui pourraient alors voir leurs volumes respectifs augmenter et modifier en conséquence l'ordre des molécules les plus utilisées en France (en kg de matières actives).

L'effet limité des scénarios, quand bien même on pourrait les cumuler, donne une mesure de l'effort à imaginer pour maintenir le prosulfocarbe.

L'hypothèse d'un scénario conduisant à une interdiction de recours au prosulfocarbe à moins de 500 mètres des cultures sensibles et des jardins privés avait été imaginée mais elle n'a pas été testée, notamment du fait de la complexité à détourer les périmètres concernés.

6. Conclusion et perspectives

A bien des égards, le prosulfocarbe est une molécule très particulière.

Elle est devenue ces dernières années une molécule centrale[58] d'un grand nombre de programmes de désherbage en céréales d'hiver, pomme de terre et quelques cultures porte-graine. Elle répond en effet à un certain nombre d'attentes des agriculteurs pour lancer le programme de désherbage avant le semis de la culture alors que d'autres herbicides ont vu leurs conditions d'utilisation se durcir, voire ont été retirés du marché. L'agriculture française montre ainsi sa forte dépendance au prosulfocarbe. Si la règlementation concernant le glyphosate devait évoluer dans un avenir proche, le prosulfocarbe pourrait devenir la première matière active herbicide utilisée en France. Par sa forte utilisation et sa sensibilité à la dérive et à la volatilisation, le prosulfocarbe se retrouve parfois en concentration anormalement élevée dans certains compartiments environnementaux tels que l'air et les eaux de surface. Il contamine également des cultures n'ayant pas d'usages autorisés. Ces évènements ont conduit à des modifications des AMM des produits à base de prosulfocarbe : d'abord en 2017 avec l'obligation d'utiliser des buses antidérive, puis en 2018 avec l'obligation d'attendre la récolte des cultures non cibles dans un rayon de 1 km (pouvant être réduit à 500 m sous certaines conditions). On peut noter le caractère exceptionnel de cette situation qui conduit à ce que la possibilité d'utiliser un produit soit conditionnée aux actions d'autres personnes et pas seulement à l'adéquation à des conditions d'applications plus classiques. On ne retrouve par ailleurs nulle part des distances tampon d'une telle ampleur en France que le kilomètre ou les 500 m à respecter. Malgré cela, des contaminations s'observent encore aujourd'hui. Les autres pays européens rencontrent les mêmes problèmes. Dans un certain nombre d'entre eux, les buses antidérive réduisant jusqu'à 90% le risque, se sont imposées et les conditions d'utilisations des produits à base de prosulfocarbe ont évolué afin de limiter ces phénomènes. C'est notamment le cas de la Belgique depuis 2021. Pour la situation française, il nous est apparu difficile de savoir comment ces évolutions règlementaires, assez complexes, étaient appliquées.

Nous avons engagé notre travail en différenciant les usages autorisés des produits à base de prosulfocarbe.

Une interdiction du prosulfocarbe se traduirait probablement par un report sur un nombre restreint de molécules qui diffèrent selon les cultures. Néanmoins, que ce soit en céréales d'hiver ou en pomme de terre, nombre de molécules sur lesquelles le report risque de se faire ont un avenir incertain car déjà candidates à la substitution. Leurs profils toxicologiques et écotoxicologiques pourraient entrer en ligne de compte.

Les céréales d'hiver sont généralement semées avec un écartement faible (de 12 à 17 cm[59]), tandis que les pomme de terre ont un écartement plus large (75 et 80 cm[60]). Pour un certain nombre d'alternatives non chimiques, leur mobilisation se réfléchit donc aussi différemment selon les cultures. Le désherbage mécanique est envisageable, à condition notamment que les conditions

[58] Au même titre que tout ce qui est encore efficace sur les graminées résistantes à l'instar du glyphosate, du S-métolachlore ou de la propyzamide.

[59] https://www.arvalis.fr/infos-techniques/semis-de-ble-tendre-serrez-les-rangs

[60] https://www.arvalis.fr/infos-techniques/les-cles-dune-bonne-plantation

pédoclimatiques le permettent. Dans le cas des cultures de pomme de terre, un désherbage chimique localisé sur le rang combiné à des interventions mécaniques entre les buttes est envisageable bien que peu pratiqué à ce jour ; les interventions mécaniques peuvent aussi intervenir en complément d'un traitement chimique en prélevée. D'autres leviers existent afin de réduire la dépendance de l'agriculture française au prosulfocarbe. Leur adoption est limitée en raison de différents freins, notamment le manque de débouchés pour les cultures de diversification, les contraintes sur les conditions pédoclimatiques à réunir comme évoqué précédemment, le besoin de recourir à du matériel spécifique qui peut être cher et les débits de chantiers. Par ailleurs, souvent, les interventions mécaniques ne permettent pas de gérer 100% des adventices, notamment sur le rang. Afin de maximiser leur efficacité, **il est nécessaire de mobiliser plus systématiquement plusieurs leviers préventifs et en les combinant.** On notera aussi que plus on retardera la date de semis des céréales, plus on restreindra les plages possibles d'un désherbage mécanique pratiqué à l'automne. Il y a donc bien des compromis à trouver entre leviers préventifs et leviers curatifs.

C'est dans ce contexte que nous avons envisagé trois scénarios d'évolution règlementaire et analysé leur impact potentiel sur les volumes de prosulfocarbe utilisés à l'échelle nationale.
Le premier scénario consiste à limiter l'utilisation du prosulfocarbe à une année sur deux ; le deuxième correspond à une généralisation d'un recul de la date de semis de 15 jours en blé d'hiver ; le troisième consiste à une utilisation de prosulfocarbe localisée sur le rang uniquement en pomme de terre. L'impact d'un seul scénario est assez limité. La combinaison des trois ne permet pas de réduire les volumes sous les 4000 tonnes à l'échelle française ; elle ne permet pas non plus de répondre aux objectifs du Pacte Vert[61]. Dans tous les cas, le prosulfocarbe reste le deuxième herbicide le plus utilisé en France après le glyphosate. Il reste néanmoins difficile à ce stade d'évaluer quel serait l'impact de tels scénario sur la fréquence et le niveau de contaminations dues au prosulfocarbe, que ce soit sur les cultures ou dans les différents compartiments environnementaux ainsi que sur le risque d'émergence de nouvelles atteintes à la santé ou à l'environnement suite au report du prosulfocarbe sur d'autres molécules.

Dans ce cadre et face à ces résultats, il apparaît donc indispensable (i) de généraliser la mobilisation de l'ensemble des leviers préventifs et (ii) d'impliquer tous les acteurs des filières pour faciliter les évolutions nécessaires.
En effet, la mobilisation des leviers préventifs permet de réduire la pression en adventices et donc le recours aux herbicides de manière générale. Plusieurs pistes ont été développées dans notre document, dont aucune n'est sans conséquence sur les pratiques ou ne ressort comme une évidence. Il s'agit notamment de repenser la place des actions préventives et, sans doute, de retenir des variétés qui s'y prêtent le mieux à travers un bon pouvoir couvrant ou une réponse adaptée à un décalage de semis. On a vu que pour l'ensemble des cultures concernées, des agroéquipements spécifiques seraient à envisager au rang desquels de quoi réaliser la gestion des menues pailles et l'écimage, le désherbage mécanique en pomme de terre, le pilotage de précision, le tri post-récolte. Ce sont des changements importants qui se feront d'autant mieux que les filières amont et aval accompagneront ces changements. Nous pensons toutefois que le jeu en vaut la chandelle car ces solutions ont un fort pouvoir générique avec des retombées, non seulement sur les usages de prosulfocarbe mais sur le

[61] Si on applique la réduction de 50% des utilisations de pesticides d'ici 2030 au prosulfocarbe.

recours à beaucoup d'autres herbicides de manière générale. En se projetant une étape plus loin, des expérimentations sur les associations d'espèces cultivées et sur les couverts végétaux ont sans doute un rôle important à jouer. Dans les deux cas, cela permet d'occuper la niche écologique des adventices, une approche trop peu envisagée jusqu'à présent, alors même que des travaux soulignent leur fort potentiel.

Ainsi, il apparaît nécessaire de mobiliser l'ensemble des maillons des filières afin de lever les freins aux leviers envisagés pour limiter le recours au prosulfocarbe et, plus largement, aux herbicides. Une telle mobilisation peut aussi viser à favoriser l'adoption des alternatives ; elle est nécessaire afin de fiabiliser et massifier des systèmes moins dépendants aux pesticides. Cela peut notamment passer par les acteurs de la recherche pour tester des associations d'espèces ou des variétés plus adaptées pour exercer une forte pression inhibitrice sur la flore adventice par exemple, par les coopératives et les acteurs de la transformation pour assurer des débouchés aux cultures de diversification, par les constructeurs de matériels agricoles pour développer et rendre accessible des outils permettant de gérer les adventices par voie mécanique ou thermique, etc. Dans le ***Tableau 30*** en fin de conclusion, nous présentons des exemples d'actions mobilisables par divers acteurs des filières afin de réduire la dépendance de l'agriculture française au prosulfocarbe.

Nous avons rencontré quelques limites dans le cadre de cette étude.

Tout d'abord, la possibilité de coupler des données sur les pratiques agricoles (aujourd'hui accessibles notamment *via* les Enquêtes Pratiques culturales ou le réseau DEPHY) 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[62]. Pour cette étude, nous avons reconstitué une estimation des indicateurs économiques à partir des données techniques disponibles dans les enquêtes pratiques culturales. La plupart des cultures concernées par le prosulfocarbe sont des grandes cultures. Pour ces dernières, nous avions donc la possibilité d'utiliser les résultats de l'enquête pratiques culturales grandes cultures de 2017. La précédente remonte à 2014 et elle porte seulement sur les pratiques phytosanitaires avec un nombre trop restreint d'indicateurs techniques pour la mobiliser de manière pertinente. Nous avons donc réalisé les évaluations économiques sur une seule année, que nous avons ensuite complétées par une analyse de sensibilité reprenant différentes situations contrastées de prix sur les deux dernières décennies. Or, disposer de plusieurs années pour l'évaluation consoliderait les résultats et permettrait de lisser les situations particulières, par exemple d'un point de vue des implications des conditions climatiques ou de la conjoncture économique. Par ailleurs, le fait de ne pas disposer d'indicateurs économiques attachés à chaque situation ne permet pas de rendre compte des différences de contextes qui peuvent exister d'un agriculteur à un autre. A titre d'exemple, le prix des récoltes n'est pas nécessairement le même pour tous ; cela peut varier selon les coopératives ou selon que l'agriculteur a contracté ou non pour un volume de vente à un prix fixé à l'avance.

Par ailleurs, les bases de données à notre disposition ne sont pas exhaustives en termes d'indicateurs ; nous avions déjà rencontré ces limites dans le cadre de l'étude sur le S-métolachlore

[62] Voir la révision du règlement SAIO ; https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2022/06/02/council-and-parliament-reach-provisional-political-agreement-on-the-new-regulation-on-agricultural-input-and-output-statistics-saio/

(Reboud *et al.*, 2022). En termes d'indicateurs économiques, elles ne prennent notamment pas en compte les aides PAC et autres subventions perçues par les agriculteurs. Nous n'avons donc pas pu les intégrer dans les évaluations économiques. En termes d'indicateurs techniques, il serait bénéfique de connaître plus précisément le type de flore présente ou suspectée sur les parcelles ainsi que la pression adventice. Nous avons tout de même accès à une estimation par l'agriculteur de la pression adventice, et nous l'avons prise en compte dans le cadre de la méthodologie des scores de propension ; celle-ci reste toutefois de l'ordre du ressenti subjectif et cela s'applique à l'ensemble des adventices et non uniquement à celles ciblées par le prosulfocarbe. Ainsi, on ne maîtrise pas dans quelle mesure les choix de désherbage que nous avons pu analyser résultent de situations floristiques différentes, ni même à quelle vitesse se ferait le retour à la normale suite à l'adoption d'une mesure correctrice. Par ailleurs, la méthode mobilisée prend en compte un certain nombre de facteurs confondants tels que le type de sol ou les conditions météorologiques qui jouent eux-mêmes en partie sur le type de flore et le niveau d'infestation, mais plus dans une visée générique de moyen terme qu'à court terme.

Une autre limite de l'évaluation économique tient à ce que les résultats obtenus dans cette étude reposent sur un prix des produits issus de l'AB supérieur (quand les évaluations incluent des agriculteurs en AB). On peut se demander comment évoluerait ce différentiel de prix en cas de fort développement de l'AB ou de changement de stratégie de marché telle qu'une contraction des marges pour capter une part plus importante de consommateurs par exemple.

Par ailleurs, les évaluations techniques et économiques ont été menées à l'échelle de la parcelle. Cela s'explique principalement par le fait que nous avons mobilisé les Enquêtes PK dans le cadre de cette étude ; elles sont réalisées à l'échelle de la parcelle. **Un travail à une échelle plus large, notamment celle de l'exploitation agricole, présenterait un avantage certain.** Il permettrait de mieux comprendre les logiques des systèmes mis en place par les agriculteurs, notamment en termes de débouchés de leurs productions. Nous n'avons pas connaissance de bases de données regroupant de manière complémentaire à l'échelle de l'exploitation des indicateurs à la fois techniques et économiques. La base du RICA comprend très peu de données sur les pratiques. La base de données du réseau DEPHY, Agrosyst, répond partiellement à ces critères ; elle n'a néanmoins pas été construite pour être représentative de la ferme France contrairement aux enquêtes PK que nous avons retenues pour cette raison dans notre étude. Par ailleurs, et nous revenons sur ce point ci-dessous, une réflexion à l'échelle de l'exploitation, mais aussi à celle des territoires et des filières, pourrait permettre d'inclure d'autres leviers.

Une autre difficulté rencontrée est qu'il n'existe pas à notre connaissance de suivi exhaustif et public des contaminations de cultures au prosulfocarbe et des impacts que cela engendre en termes de déclassement, voire de destruction des récoltes, et donc en termes de pertes financières pour les agriculteurs concernés. Si on peut constater que la mise en place des nouvelles conditions d'utilisation ne permet pas à ce jour de stopper ni les contaminations de cultures non cibles ni la présence du prosulfocarbe dans différents compartiments environnementaux, il reste compliqué d'appréhender l'ampleur de ces phénomènes et d'analyser leur répartition dans le temps (i) d'une saison à une autre et (ii) d'une année à une autre. Cela n'aide pas à savoir si l'intérêt des agriculteurs faisant le choix du prosulfocarbe est aligné sur l'intérêt collectif, autrement dit, si les bénéfices des uns excèdent les coûts supportés par les autres.

Par ailleurs, nous avons pu quantifier l'impact de trois scénarios réglementaires hypothétiques sur les volumes de prosulfocarbe à l'échelle de la France. **Néanmoins, nous ne pouvons pas mesurer**

l'ampleur de la réduction d'impact que de tels scénarios auraient sur une moindre contamination des cultures avoisinantes et des compartiments environnementaux.

Enfin, de manière plus générale, nous avons peiné à accéder à différents types de données, qu'elles soient publiques ou privées. A titre d'exemple, les conditions d'application des pesticides dans les autres pays européens ne sont pas toujours facilement accessibles ; une base qui compilerait les cultures autorisées et leurs stades, les doses, les distances à respecter et les autres conditions d'usage faciliterait grandement la comparaison des déclinaisons possibles d'une même homologation de la matière active à l'échelon européen. Par ailleurs, l'accès à des données relatives à des outils d'aide à la décision privés ou des cahiers des charges privés n'est pas toujours possible. Concernant ce dernier point, des outils qui seraient publics permettraient plus de transparence.

Au-delà du cadre de cette étude sur le prosulfocarbe, pour conclure, les limites que nous percevons de l'évaluation comparative nous amènent à vouloir nous écarter du cadre strict fixé par le Règlement (CE) N° 1107/2009.

Tout d'abord, ce cadre est très agriculteur-centré et ne prend pas directement en compte le rôle majeur que peut avoir l'ensemble des maillons de la filière, voire des filières. A titre d'exemple, un travail sur le machinisme agricole couplé à la mise en place d'un réseau de valorisation pour déployer une gestion efficace et rentable des menues-pailles, un travail sur des variétés de céréales plus couvrantes, ou encore un travail sur la manière de rattraper au moins en partie la perte de rendement lié à un retard de la date des semis ressortent comme autant de pistes prometteuses à explorer. Elles impliquent tout un ensemble d'acteurs au-delà des seuls agriculteurs.

De plus, le cadre règlementaire de l'évaluation comparative impose (i) qu'il existe déjà une alternative, voire qu'elle soit d'usage courant dans le cadre de l'article 50.2 relatif aux substances dont on n'envisage pas la substitution, et, implicitement, (ii) que l'alternative n'implique pas de modification profonde des systèmes de production. Cela ne va pas vraiment dans le sens d'une transition agroécologique qui implique une réflexion globale sur la cohérence des systèmes de cultures, leur insertion au sein des territoires et des filières, et des changements souvent profonds à anticiper. Nous avons essayé d'apporter quelques éléments en ce sens et avons été attentifs à ce que les alternatives présentent un caractère générique. Notre travail s'arrête à la faisabilité technico-économique alors qu'il faudrait aussi considérer ce qui relève de retombées sur la santé et l'environnement. Par ailleurs, il nous semble que des solutions au stade de prototype – et donc pas au « stade courant » - gagneraient à être plus systématiquement explorées et intégrées quand elles présentent un fort potentiel. Nous avons proposé quelques ouvertures en ce sens.

Par ailleurs, l'évaluation comparative est centrée sur les alternatives à une molécule ; il nous semble néanmoins pertinent d'en élargir le cadre et d'étudier aussi des situations où ces molécules seraient toujours autorisées, mais en cherchant à diminuer le plus drastiquement possible la dépendance de l'agriculture à ces dernières. Il peut s'agir de diminution des doses utilisées à l'hectare sur une année, ou bien d'élargir cette réflexion sur un pas de temps plus long (exemple : autorisation une année sur deux).

Finalement, il nous semble pertinent de mener une réflexion plus large que celle imposée par le Règlement (CE) N° 1107/2009 qui consiste à étudier les molécules indépendamment les unes des autres. Une réflexion plus globale sur des systèmes qui seraient capables de se passer de tout herbicide de pré-levée ou de post-levée, voire des deux, sans pour autant être nécessairement dans un mode de production biologique, nous semble pertinent. De manière plus fine, et suite aux deux études que nous

venons de mener, l'une sur le S-métolachlore et l'autre sur le prosulfocarbe, il nous semblerait pertinent d'envisager une réflexion englobant l'ensemble des herbicides racinaires. Peut-on envisager également des systèmes de culture qui ne mobiliseraient aucun herbicide foliaire ? Quelles seraient les contraintes techniques et les résultats économiques de tels systèmes de culture ? Pour mener à bien cette réflexion, il serait précieux de mobiliser des réseaux d'essais de systèmes qui testeraient explicitement ces pistes. Si de telles expérimentations marquant une forme de rupture relativement au système conventionnel actuel existent à ce jour, elles demeurent encore rares à l'échelle de la France.

Tableau 30 : Exemples d'actions pouvant concourir à la réduction du recours au prosulfocarbe

Qui	***Action***	***Type d'action***	***Pas de temps***
Europe	Synthèse sur l'ensemble des Etats Membres des distances à respecter en bordure de l'eau ou des jardins privés 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
Etat	Poursuite de la promotion et de l'aide à l'AB (conversion et maintien)	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
	Recensement et transparence des cas de contamination de lots par le prosulfocarbe, évaluation (territorialisée) des manques à gagner engendrés	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
	CEPPs qui apportent une reconnaissance des efforts pour les agroéquipements alternatifs et la diversité collectée	Nouveau levier	Court

Agences 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 (pomme de terre)	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à moyen
Pouvoirs publics 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
	Mise en place de filières de valorisation des menues-pailles	Amélioration relativement à la situation actuelle	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
	Recherche sur des systèmes en rupture de l'existant, notamment ceux employant les méthodes de gestion de la santé des cultures déployés en AB tout en maintenant la fertilisation minérale. Travaux sur la place et les atouts pour une agriculture entre le conventionnel et l'AB pour anticiper les évolutions possibles.	Nouvelles conduites	Moyen à long terme
Semenciers	Proposition de couverts végétaux destinés à un usage en inter-rang (pomme de terre) ou maintenus comme mulch vivant pour des cultures conduites en faible écartement (céréales)	Nouveau levier	Court à moyen
	Rehausser le caractère alternatif[63] ainsi que le pouvoir couvrant ou l'aptitude au mélange des principales cultures à semis automnal	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à moyen

[63] Qui supporte une large plage de dates de semis

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
	Trieur post-récolte cumulant différents principes, densimétrique, optique, par aspiration.	Nouveau levier	Court terme
Entreprises phytosanitaires	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 ou d'Europe	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court
	Rechercher des marges d'amélioration dans la formulation des produits afin de limiter la contamination des différents compartiments environnementaux	Amélioration relativement à la situation actuelle	Moyen
Chambres d'agriculture, filières et instituts techniques	Amplification des travaux sur des conduites sans herbicide, réalisation d'essais de conduite sous mulch vivant et test d'associations de cultures. Production de références sur l'efficacité des mesures préventives. Inscription des démarches préventives dans le conseil stratégique.	Nouvelle conduite / amélioration de l'existant	Court à moyen
ETAs et CUMAs	Offre de service ou équipement de pulvérisation sur le rang, d'écimage avec export, de bineuse-butteuse, et de manière générale, d'équipements mobilisables en AB	Nouvelle conduite et amélioration relativement à la situation actuelle	Court
Agriculteurs	Mobiliser les leviers préventifs, être proactif pour s'assurer que les cultures voisines ont été récoltées	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à moyen
Collecte	Offre d'une collecte diversifiée facilitant la diversité des rotations	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
	Conseil adapté et promotion des actions préventives	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
	Favoriser le partage d'informations entre agriculteurs voisins sur les intentions et contraintes entre chantiers de traitement, récoltes, etc.	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
Entreprises de transformation	Inscription des pratiques vertueuses des adhérents dans leur RSE	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court

Distribution	Juste rémunération des producteurs, valorisation de produits sous label et locaux, transparence sur le contenu des cahiers des charges	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court
Consommateurs et citoyens	Choix alimentaires pour des produits sous label et d'origine locale	Amélioration relativement à la situation actuelle	Court à long
	Porter comme actionnaire/sociétaire un droit de regard sur la RSE des entreprises (semences, agroéquipements, alimentation animale, transformation, approvisionnement, etc.)	Transparence de l'information pour aider au meilleur choix collectif	Court à moyen

Note : un certain nombre de ces actions peut être mis en place à l'aide d'outils variés, mobilisables par différents acteurs cités dans ce tableau. Il peut par exemple s'agir de cahiers des charges privés, de labels publics, des outils financiers de la PAC, des Projets alimentaires territoriaux (PAT), de l'enveloppe Ecophyto en région, des Territoires d'Innovation, de la Stratégie nationale pour la recherche et l'innovation (SNRI), de Projets Casdar, de projets dans le cadre du Programme et équipement de recherche prioritaire (PEPR) Agroécologie et Numérique, etc.

Bibliographie

Agreste (2022). *Statistique agricole annuelle 2021. Chiffres provisoires.* 64 p. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2205/cd2022-5_SAA_2021Provisoire-v4.pdf

Anses (2017). *Extrait de la NOTE d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, du 16 novembre 2017 relatif à « La contamination de certaines cultures par la substance active phytopharmaceutique prosulfocarbe ».* 55p. https://www.anses.fr/fr/system/files/PPV2017SA0150.pdf

Anses (2018a). *Phytopharmacovigilance. Synthèse des données de surveillance. Prosulfocarbe.* 10p. Décembre 2018. https://www.anses.fr/fr/system/files/Fiche_PPV_Prosulfocarbe.pdf

Anses (2018). *Prévention de la dissémination de la substance active prosulfocarbe : renforcement des mesures de gestion des risques pour l'utilisation des produits.* 4 octobre 2018. https://www.fnams.fr/wp-content/uploads/2018/10/prosulfocarbe-2.pdf

Anses (2020). *Campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant. Premières interprétations sanitaires. Préambule. Rapport d'appui scientifique et technique révisé.* Octobre 2020. https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2020SA0030Ra.pdf

APCA (2021). Matériels agricoles. Coûts des opérations culturales 2021. Un référentiel pour le calcul des coûts de production et le barème d'entraide. https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/cout_operations_2021.pdf

Arvalis (2015). *Isoproturon : les bonnes règles d'usage.* 2p. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/plaquette_isoproturon_vff559903573602866055.pdf

Arvalis (2016). *Désherbage : les leviers agronomiques avant tout.* CHOISIR, Blé tendre d'hiver. Variétés et interventions d'automne 2016-2017, Région Poitou-Charentes. 21p. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/guide_preco_ble_tendre_poitou_charentes_2016_desherbage4900374503381919198.pdf

Arvalis (2017). *Guide préconisations. Désherbage Céréales à paille. Août 2017. Région Centre – Ile de France – Limousin – Auvergne.*

Arvalis (2018). *Choisir et décider. Synthèse nationale. Pomme de terre. Résultats d'essais 2018 et préconisations 2019.* 62p. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/choisir_pdt_2018-8965597530926566678.pdf

Arvalis (2020). *Sensibilité des variétés de blé tendre au chlortoluron. Variétés et interventions d'automne 2020. Synthèse nationale.* 2p. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/liste_chlorto5234602497806500723.pdf

Asbl CORDER (2021). *Restrictions d'usage des PPP à base de prosulfocarbe.* Consulté le 23 février 2022. https://www.corder.be/fr/news/restrictions-dusage-des-ppp-base-de-prosulfocarbe

Asbl CORDER - SPW Environnement (2022a). *Estimation quantitative des utilisations de produits phytopharmaceutiques par les différents secteurs d'activité.* CSC O3.02.02-19A377. http://etat.environnement.wallonie.be/files/Studies/Corder%202022a.%20Estimation%20quantitative%20des%20utilisations%20de%20PPP.%20Rapport%20final.pdf

Asbl CORDER - SPW Environnement (2022b). *Estimation quantitative des utilisations de produits phytopharmaceutiques par les différents secteurs d'activité.* Rapport annuel – CSC 03.09.00-21-3261.

http://etat.environnement.wallonie.be/files/Studies/Corder%202022b.%20Estimation%20quantitative%20des%20utilisations%20de%20PPP.%20Rapport%20final.pdf

Atmo Nouvelle-Aquitaine (2022). *Les pesticides dans l'air. Bilan annuel 2021.* 5 juillet 2022. https://www.atmo-nouvelleaquitaine.org/sites/nouvelleaquitaine/files/medias/documents/2022-09/RapportAtmoNA_PEST_INT_20_052_PEST21_VersionFinale_2022-07-05.pdf

Austin, P.C. (2011). 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.

Aval Douar Beo (2016). Guide technique de la culture biologique de pomme de terre. 35p. https://www.bio-bretagne-ibb.fr/wp-content/uploads/1-Itin%C3%A9raire-technique-de-la-pomme-de-terre-AB-Aval-Douar-Beo.pdf

Babaud A. (2022). Agglo de La Rochelle : le ministre répond sur l'herbicide prosulfocarbe. Sud Ouest. Publié le 2 décembre 2022. Consulté le 23 février 2023. https://www.sudouest.fr/charente-maritime/montroy/agglo-de-la-rochelle-le-ministre-repond-sur-l-herbicide-prosulfocarbe-13223929.php

Ballabio C., Panagos P., Montanarella L. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database (2016) Geoderma, 261 , pp. 110-123. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data

Ballabio, C., Lugato, E., Fernández-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borrelli, P., Montanarella, L. and Panagos, P., 2019. Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma*, **355**: 113912. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/chemical-properties-european-scale-based-lucas-topsoil-data

Barba, V., Marín-Benito, J. M., García-Delgado, C., Sánchez-Martín, M. J., & Rodríguez-Cruz, M. S. (2019). Assessment of 14C-prosulfocarb dissipation mechanism in soil after amendment and its impact on the microbial community. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *182*, 109395.

Bilcot A-T., Lannuzel P., Montagne S., Falchier M. (2021). *Désherbage d'automne des céréales.* Chambre d'Agriculture de Bretagne. Mise à jour du 15 septembre 2021. 4p. https://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/35584/$File/FICHE%20CEREALES%20DESHERBAGE%20AUTOMNE%202021%2009%2015.pdf?OpenElement

Blaszczyk N., Vacher C. et Perriot B. (2019). *Les solutions alternatives au désherbage conventionnel de la pomme de terre.* 63p. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/lessolutionsalternativesaudesherbageconventionneldelapommedeterre66125034718482664 74.pdf#page=14&zoom=100,91,329

BNVD Traçabilité (2023). *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/

Bo, X., Sun, J., Mei, Q., Wei, B., An, Z., Han, D., ... & He, M. (2020). Degradation of prosulfocarb by hydroxyl radicals in gas and aqueous phase: Mechanisms, kinetics and toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *191*, 110175.

Bonin L. & Gautellier Vizioz L. (2022). *Lutte contre les adventices – Pratiquer les faux-semis pour diminuer le stock semencier des parcelles.* Arvalis. Publié le 8 septembre 2022. Consulté le 24 février 2023. https://www.arvalis.fr/infos-techniques/pratiquer-les-faux-semis-pour-diminuer-le-stock-semencier-des-parcelles

Bonin L., Réal B. (2008). *Désherbage des céréales d'hiver. Quelle gestion possible pour l'isoproturon ?* Perspectives agricoles N°349, octobre 2008. 4p. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/e6/f4/b7/2e/349_8977781621861795630.pdf

Braun, K. E., Luks, A. K., & Schmidt, B. (2017). Fate of the 14C-labeled herbicide prosulfocarb in a soil and in a sediment-water system. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 52(2), 122-130.

Busi, R., & Powles, S. B. (2013). Cross-resistance to prosulfocarb and triallate in pyroxasulfone-resistant Lolium rigidum. *Pest management science*, *69*(12), 1379-1384.

Carlsen S. C. K., Spliid N. H., & Svensmark B. (2006). *Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 1. Secondary drift (evaporation).* Chemosphere, 64(5), 787-794. DOI : 10.1016/j.chemosphere.2005.10.061

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 (2022). *Guide des grandes cultures et des cultures fourragères.* 223p.

Chambre d'Agriculture d'Eure-et-Loir (2022). *Filière Grandes cultures. Préconisations 2022-2023. Désherbage antigraminées céréales.* 12 p.

Chambre régionale d'Agriculture d'Occitanie et équipe du SRAL, DRAAF Occitanie (2019). *Les groupes 30 000 en Occitanie. Synthèse des indicateurs de suivi 2019.* 21p. https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Agroenvironnement/Gpes-30000-resultats2019-crao2020.pdf

Chambre d'agriculture des Pays de la Loire (2022). *Prosulfocarbe : alternatives et solutions pour un meilleur usage.* 4p. https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays_de_la_Loire/2022/2022_Prosulfocarbe_alternatives_et_solutions_pour_meilleur_usage.pdf

Chambre d'Agriculture Meurthe-et-Moselle (2015). *Les alternatives à l'isoproturon. Note thématique n°3 : Août 2015.* 4p. https://meurthe-et-moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/036_Inst-Meurthe-et-Moselle/RUBR_Environnement/Agrimieux/Notes_techniques_Rupt_de_Mad/2016/NT3_-_Alternatives_isoproturon.pdf

Comité technique Pomme de terre Nord-Pas-de-Calais et Chambre d'agriculture Nord-Pas-de-Calais (2022). *Pommes de terre. Expérimentations 2021 et références techniques.* 44p. https://hautsdefrance.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Hauts-de-France/experimentations-references-techniques-pdt-2022.pdf

Citron G., Réal B., Bousquet N. (2006). *Tout ce qu'il faut savoir sur les herbicides racinaires.* Perspectives agricoles N°327, octobre 2006. 2p.

CUMA AURA (2021). Barème d'entraide 2020-2021. http://www.aura.cuma.fr/actualites/bareme-dentraide-2020-2021

CUMA Ouest, Région Bretagne. *Désherbage mécanique des céréales.* 8p. http://www.ouest.cuma.fr/sites/default/files/189/Documents/machinismeenvironnement/pulverisation-et-desherbage-mecanique/Technique-alternative-de-desherbage/Generalites/desherbage-mecanique-des-cereales.pdf

Davison, A. C., & Hinkley, D. V. (1997). Bootstrap methods and their application (No. 1). Cambridge university press.

Délye C., Colbach N., Le Corre V. (2021). *Résistances aux herbicides : mécanismes, situation en France et bonnes pratiques.* Innovations Agronomiques, 2020, 81, pp.33-49. https://hal.inrae.fr/hal-03152155

Desert, M.; Ravier, S.; Gille, G.; Quinapallo, A.; Armengaud, A.; Pochet, G.; Savelli, J.L.; Wortham, H.; Quivet, E., 2018. Spatial and temporal distribution of current-use pesticides in ambient air of Provence-Alpes-COte-d'Azur Region and Corsica, France. *Atmospheric Environment*, 192: 241-256. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.054

Devault D. A., Guillemin J. P., Millet M., Eymery F., Hulin M. et Merlo M. (2019). *Prosulfocarb at center stage !* Environmental Science and Pollution Research, 29, 61–67 (2022). https://doi.org/10.1007/s11356-019-06928-8

DGAL/SDSPV (2022). *Note de service DGAL/SDSPV/2022-425 publiée le 09-06-2022*. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2022-425

Essama-Nssah, B. (2006). Propensity score matching and policy impact analysis: A demonstration in EViews.

Fayolle B., Peyrard T., Reboud X. (2023) Création d'indicateurs économiques à partir du descriptif technique contenu dans les enquêtes Pratiques Culturales (PK). Note méthodologique. INRAE, 32p. hal-04050101

Fleury J. (2022). *Pesticides dans la plaine d'Aunis : des agriculteurs sous pression mais qui continuent de traiter.* France Bleu La Rochelle. Publié le 14 novembre 2022. Consulté le 23 février 2023. https://www.francebleu.fr/infos/agriculture-peche/pesticides-dans-la-plaine-d-aunis-des-agriculteurs-sous-pression-mais-qui-continuent-de-traiter-1668412382

FNAB (2021). *Plusieurs lots biologiques contaminés par une molécule très volatile, 100 000 euros de perte et aucune indemnisation prévue !* Communiqué de presse du 15 juin 2021. https://www.fnab.org/communiques-presse/plusieurs-lots-biologiques-contamines-par-une-molecule-tres-volatile-100-000-euros-de-perte-et-aucune-indemnisation-prevue/

FNAB, Générations Futures et Forébio (2021). Traitements d'automne en agriculture : les préfets de départements doivent interdire le prosulfocarbe en urgence sur leur territoire. Communiqué de presse du 15 octobre 2021. https://www.forebio.info/post/stop-aux-contaminations-en-bio

Freedman, David. (2005). Statistical Models: Theory and Practice. 10.1017/CBO9781139165495.

Garcia-Delgado, C.; Barba-Vicente, V.; Marin-Benito, J.M.; Igual, J.M.; Sanchez-Martin, M.J.; Rodriguez-Cruz, M.S., 2019. Influence of different agricultural management practices on soil microbial community over dissipation time of two herbicides. *Science of the Total Environment*, 646: 1478-1488. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.395

Gennari, M., Ambrosoli, R., Nègre, M., & Minati, J. L. (2002). Bioavailability and biodegradation of prosulfocarb in soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, *37*(4), 297-305.

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.

Inéris (2014). *Prosulfocarbe – n° CAS : 52888-80-9.* Version 1 : 03/03/2014. 22p.

JOUE - Journal officiel de l'Union européenne (2008). *RÈGLEMENT (CE) N° 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) n° 1907/2006. 31.12.2008. L 353/1 https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:FR:PDF

JOUE - Journal officiel de l'Union européenne (2009). *RÈGLEMENT (CE) N° 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. https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0001:0050:FR:PDF#:~:text=Le%20pr%C3%A9sent%20r%C3%A8glement%20vise%20%C3%A0,en%20am%C3%A9liorant%20la%20production%20agricole.

JOUE - Journal officiel de l'Union européenne (2013). *RÈGLEMENT (UE) No 777/2013 DE LA COMMISSION du 12 août 2013 modifiant les annexes II, III et V du règlement (CE) no 396/2005 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les limites maximales de résidus de clodinafop, de clomazone, de diuron, d'éthalfluraline, d'ioxynil, d'iprovalicarbe, d'hydrazide maléique, de mépanipyrim, de metconazole, de prosulfocarbe et de tépraloxydim dans ou sur certains produits.* 17.8.2013. L 221/1. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0777&rid=2

JOUE – Journal officiel de l'Union européenne (2016). *RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2016/872 DE LA COMMISSION du 1er juin 2016 concernant le non-renouvellement de l'approbation de la substance active isoproturon, conformément au règlement (CE) no 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques, et modifiant le règlement d'exécution (UE) no 540/2011 de la Commission.* 2.6.2016. L 145/7. 3p.

JOUE – Journal officiel de l'Union européenne (2023). *RÈGLEMENT (UE) 2023/129 DE LA COMMISSION du 18 janvier 2023 modifiant l'annexe II du règlement (CE) no 396/2005 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les limites maximales applicables aux résidus d'azoxystrobine, de prosulfocarbe, de sédaxane et de valifénalate présents dans ou sur certains produits.* L 17/56.19.1.2023. 21p.

Kreuger J. et Lindström B. (2019). *Long-term monitoring of pesticides in air and atmospheric deposition in Sweden.* Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Uppsala, Sweden. IUPAC, Ghent, Belgium, 20 May 2019. https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/ckb/publikationer/presentationer/presentation-luft_kreuger-iupac-2019.pdf

Kryger Jensen P., Petersen H-A., & Heinrichson K. (2020). *Samlet forståelse af spraydrift, luftbåren afdrift og fordampning Bekæmpelsesmiddelforskning.* Bekæmpelsesmiddelforskning nr. 191. Oktober 2020. https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2020/10/978-87-7038-240-3.pdf

Lever L., Rolland B., Chauvel B., Cordeau S., Perronne R. 2022. Caractères variétaux associés à la compétition des génotypes de céréales à paille vis-à-vis des adventices et pistes pour leur sélection : une revue bibliographique. *Agronomie, Environnement & Sociétés,* 12-1, 16 p. https://agronomie.asso.fr/aes-12-1-18

Liebman, M., & Dyck, E. (1993). Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological applications*, *3*(1), 92-122.

Mamarot, J., & Rodriguez, A. (2003). Sensibilité des mauvaises herbes aux herbicides en grandes cultures. Version 5. ACTA

Mamy, L., Pesce, S., Sanchez, W., ..., (2022). Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport d'ESCo, INRAE - Ifremer (France), 1408 pages

Melander, B., Rasmussen, I. A., & Bàrberi, P. (2005). Integrating physical and cultural methods of weed control—examples from European research. Weed Science, 53(3), 369-381.

Metais P. & Brun D. (2020). *Technique culturales – La récolte des menues pailles : un levier complémentaire de gestion des adventices à moyen terme.* Arvalis. Publié le 18 juin 2020. Consulté le 24 février 2023. https://www.arvalis.fr/infos-techniques/la-recolte-des-menues-pailles-un-levier-complementaire-de-gestion-des-adventices

Ministère de l'Agriculture (SSP) [Producteur], Pratiques phytosanitaires en grandes cultures - 2014 [Fichiers de données], Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD) [Diffuseur], http://doi.org/10.34724/CASD.162.1639.V1

Ministère de l'Agriculture (SSP) [Producteur], Pratiques culturales sur les grandes cultures - 2017 [Fichiers de données], Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD) [Diffuseur], http://doi.org/10.34724/CASD.56.3033.V1

Ministry of Environment and Food of Denmark (2017). *Danish National Actionplan on Pesticides 2017-2021. Facts, caution and consideration.* 40p. https://food.ec.europa.eu/system/files/2019-03/pesticides_sup_nap_dan-rev_en.pdf

Muff, S., Nilsen, E. B., O'Hara, R. B., & Nater, C. R. (2022). Rewriting results sections in the language of evidence. Trends in ecology & evolution, 37(3), 203-210.

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

Perriot B. (2022). *Efficacité des herbicides racinaires : peu importe le volume de bouillie et le type de buse.* Publié le 20 octobre 2022. Consulté le 6 janvier 2023. https://www.arvalis.fr/infos-techniques/efficacite-des-herbicides-racinaires-peu-importe-le-volume-de-bouillie-et-le-type

Perriot B., Gautellier Vizioz L., Bonin L. (2021). *Désherbage des céréales : bien respecter les règles d'application des produits à base de prosulfocarbe. 30 septembre 2021.* https://www.arvalis.fr/infos-techniques/bien-respecter-les-regles-dapplication-des-produits-base-de-prosulfocarbe

Phytoweb (2022). *Résidus problématiques de prosulfocarbe.* Publié le 23/08/22. Consulté le 22/12/22. https://fytoweb.be/fr/nouvelles/residus-problematiques-de-prosulfocarbe

Prevors A., Massot F., Vergonjeanne H. (2019). *Un outil d'aide à la décision pour aider au bon emploi des herbicides à base de prosulfocarbe.* Végéphyl – 24e Conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Orléans – 3, 4 et 5 décembre 2019.

Ramalanjaona L., Poméon T., Ballot R., Barbu C., Bougon N., Fernandez F., Martin P., Mohamed H. (2020). Mise à jour du calcul des coefficients de répartition spatiale des données de la BNVd. Note méthodologique ODR, 2020. https://odr.inrae.fr/intranet/carto_joomla/index.php/ressource/documents/documents-odr/notes-methodologiques/3239-mise-a-jour-du-calcul-des-coefficients-de-repartition-spatiale-des-donnees-de-la-bnvd/file

Reboud X., Tysebaert M., Benjamin F. (2022). *Alternatives au S-métolachlore et étude de leur mobilisation.* 203 p. 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

Roques C. (2022). *Pomme de terre – Adapter le désherbage de prélevée à la flore présente.* Publié le 21 avril 2022. Consulté le 24 février 2023. https://www.arvalis.fr/infos-techniques/quelques-rappels-sur-le-desherbage-de-prelevee

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.

Sénat (2022). *Vers une limitation de la concentration du prosulfocarbe dans l'air et un moratoire. 16e législature. Réponse du Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire à la Question écrite n° 01815 de Mme Nicole Bonnefoy (Charente - SER).* Réponse publiée dans le JO Sénat du 22/09/2022 - page 4564. https://www.senat.fr/questions/base/2022/qSEQ220701815.html

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.

Soleilhavoup, M., & Crisan, M. (2020). Enquête pratiques culturales en grandes cultures 2017. Principaux résultats. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2009/detail/

Verdier J.L, Rodriguez A., Vuillemin F., Barrier I., Perdrieux G., et al.. Réseau ECOHERBMIP : Faisabilité, performance et durabilité de systèmes de cultures économes en herbicides.. Innovations Agronomiques, 2019, 76, pp.155-167. ff10.15454/xns4voff. ffhal-02478437

Vleugels M. (2021). Prosulfocarb: "Gebruik het niet in graangewassen, tenzij het echt nodig is!". Publié le 29/09/2021. Consulté le 09/03/2023. https://www.landbouwleven.be/11926/article/2021-09-29/prosulfocarb-gebruik-het-niet-graangewassen-tenzij-het-echt-nodig.

Annexes

Annexe 1 : Saisine

GOUVERNEMENT

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 consommatrices 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 DGAl, 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-metolachlore 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 : Comparaison du RPG, de la SAA d'Agreste et des données de l'Agence Bio pour 2021

Tableau 31 : Comparaison des surfaces totales en France issues du RPG et de la SAA d'Agreste en 2021

Cultures	Surfaces (ha)		Couverture (%)
	RPG	Agreste	
Blé dur d'hiver	285 948	285 381	100,20
Blé dur de printemps	9 012	8 901	101,25
Blé tendre d'hiver	4 942 926	4 960 602	99,64
Blé tendre de printemps	22 061	22 165	99,53
Orge d'hiver	1 200 761	1 199 428	100,11
Orge de printemps	532 796	530 971	100,34
Triticale	338 021	338 401	99,89
Seigle	43 283	43 248	100,08
Pomme de terre	204 886	211 657	96,80
Carottes	14 394	16 634	86,53
Oignon (+ échalottes)	19 622	20 604	95,23
Fraise	2 172	4 081	53,22

Source : Registre parcellaire graphique et SAA d'Agreste (Agreste 2022)
Note : La nomenclature des données de la SAA et celle du RPG ne coïncidant pas, seules les cultures facilement identifiables ont été représentées.

Tableau 32 : Comparaison des surfaces en AB en France issues du RPG AB et des données de l'Agence Bio en 2021

Cultures	Surfaces (ha)		Couverture (%)
	RPGAB	Agence bio	
Blé (total)	186 040	189 312	98,27
Orge (total)	48 627	51 223	94,93
Triticale	37 268	38 285	97,34
Seigle	9 519	9 828	96,86
Pomme de terre	5 406	5 442	99,34
Carottes	1 978	2 176	90,90
Oignon (+ échalottes)	1 697	1 316	128,95
Fraise	270	361	74,79

Source : Registre parcellaire graphique pour l'agriculture biologique et Agence Bio[64]
Note : La nomenclature des données communales et celle du RPG AB ne coïncidant pas, seules les cultures facilement identifiables ont été représentées.

[64] 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

Annexe 3 : Description des facteurs confondants pris en compte pour l'analyse technico-économique

Type de variable	Nom de la variable/modalité	Description	Unité
Météorologique (SAFRAN -Météo France) (*)	t_q	Température moyenne journalière	°C
	tinf_h_q	Température minimale journalière	°C
	tsup_h_q	Température maximale journalière	°C
	preliq_q	Précipitations liquides (cumul quotidien)	mm
	swi_q	Indice d'humidité des sols (moyenne quotidienne)	%
	hu_q	Humidité relative (moyenne quotidienne)	%
	ssi_q	Rayonnement visible (cumul quotidien)	J/cm^2
	evap_q	Evapotranspiration réelle (cumul quotidien)	mm
	wg_racine_q	Contenu en eau liquide dans la couche racinaire	m^3/m^3
	ff_q	Vent à 10m (moyenne quotidienne)	m/s
	runc_q	Ruissellement (cumul quotidien)	mm
Pédologique (ESDAC) (**)	AWC	Capacité de rétention d'eau des sols	-
	Bulk_density	Masse volumique apparente	t/m^3
	CaCO3	Quantité de carbonate de calcium	mg/kg
	CEC	Capacité d'échange cationique	mol/kg
	Coarse_frag	Teneur des sols en fragments rocheux	%
	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	-
	N	Quantité d'azote	g/kg
Typologie de la ruralité	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 vieillies à très faible densité ; faibles revenus, économie présentielle et agricole	-

	F_CFD_PRESTOU	Campagnes vieillies à très faible densité ; faibles revenus, croissance résidentielle, économie présentielle et touristique	-
	F_CFD_ESERV	Campagnes vieillies à très faible densité ; faibles revenus, croissance résidentielle, économie présentielle et touristique, très fort éloignement des services d'usage courant	-
Variables propres aux enquêtes PK	ADVENTICES	Pression adventice constatée par l'agriculteur. Peu valoir : - Faible ou nulle - Moyenne - Forte	-
	SUPP	Superficie de la parcelle	ha
	SAU	Surface agricole utile totale de l'exploitation	ha
	TYPEXP	Type d'exploitation. Peut valoir : - Elevage - Grandes cultures - Autre	-
	ANNEE	L'année de la campagne (2014 ou 2017)	-
	SEMENCES	L'origine des semences. Peut valoir : - Certifiées - Semences de ferme - Mélange des deux	-
	AZOTETOT	Quantité totale d'azote (minérale + organique)	kg/ha
	PRECULTN1 PRECULTN2 PRECULTN3	Respectivement le type de culture des trois campagnes pécédentes. Peut valoir : - betterave - céréales - colza - culture industrielle - fourrage - jachère - légumes - non déterminée - pomme de terre - prairie - protéagineux - soja - tournesol - autre	-

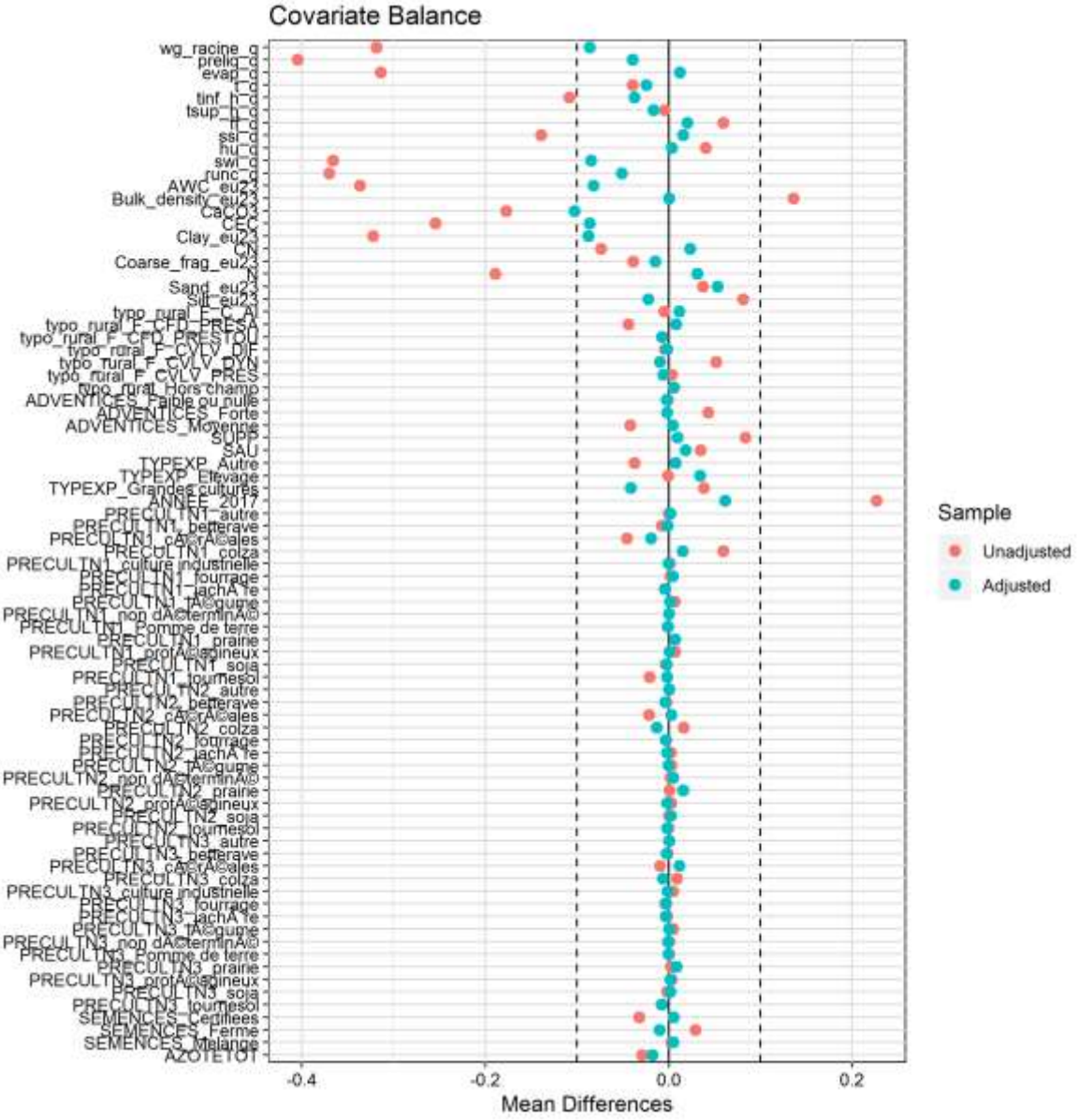
** Moyennes annuelles de la commune à laquelle la parcelle est rattachée*

*** Moyenne de la commune à laquelle la parcelle est rattachée ; valeurs prédites à partir de mesures européennes*

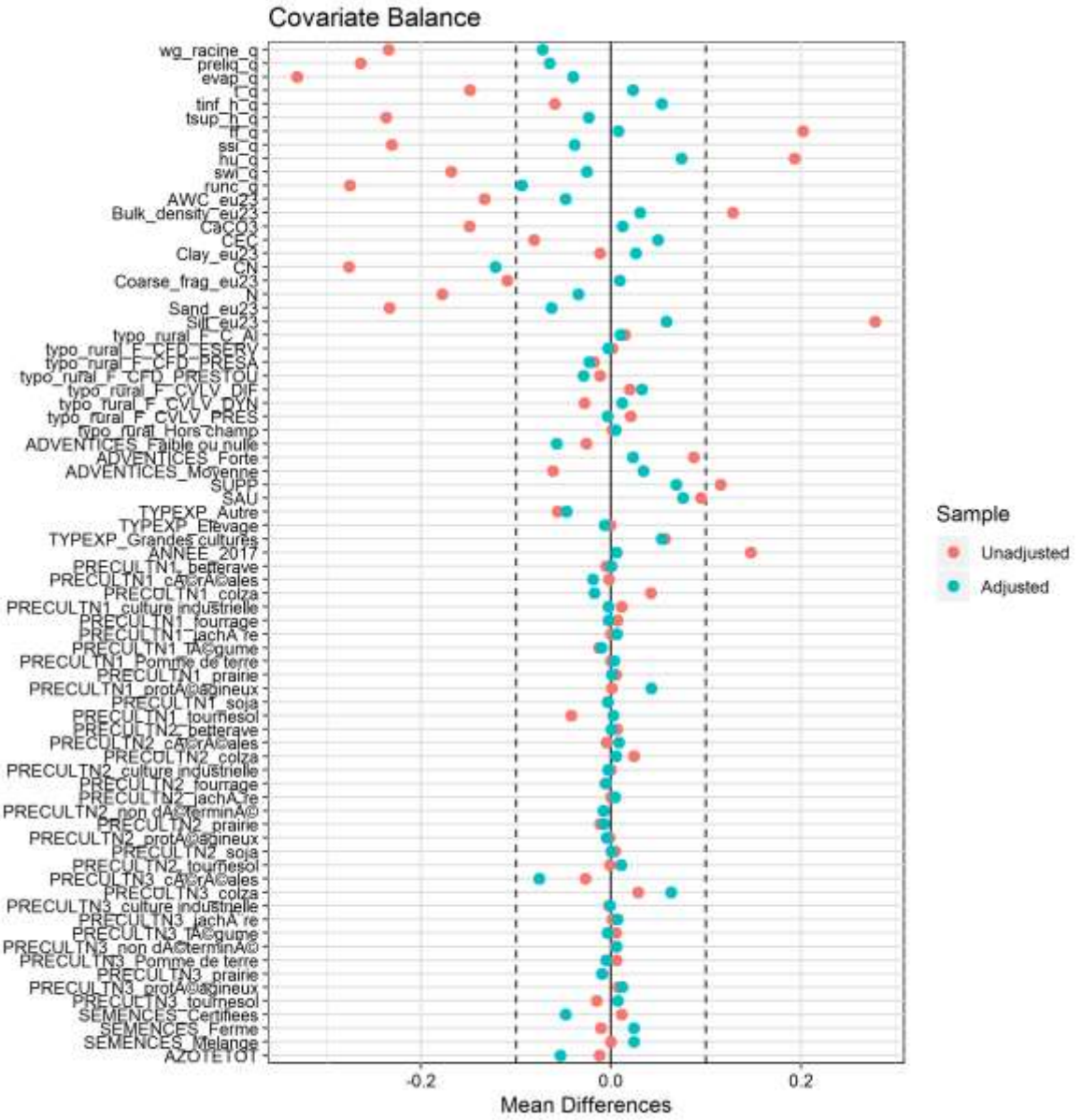
Annexe 4 : Respect des hypothèses de modélisation pour l'analyse technico-économique

Groupe 1 vs groupe 2

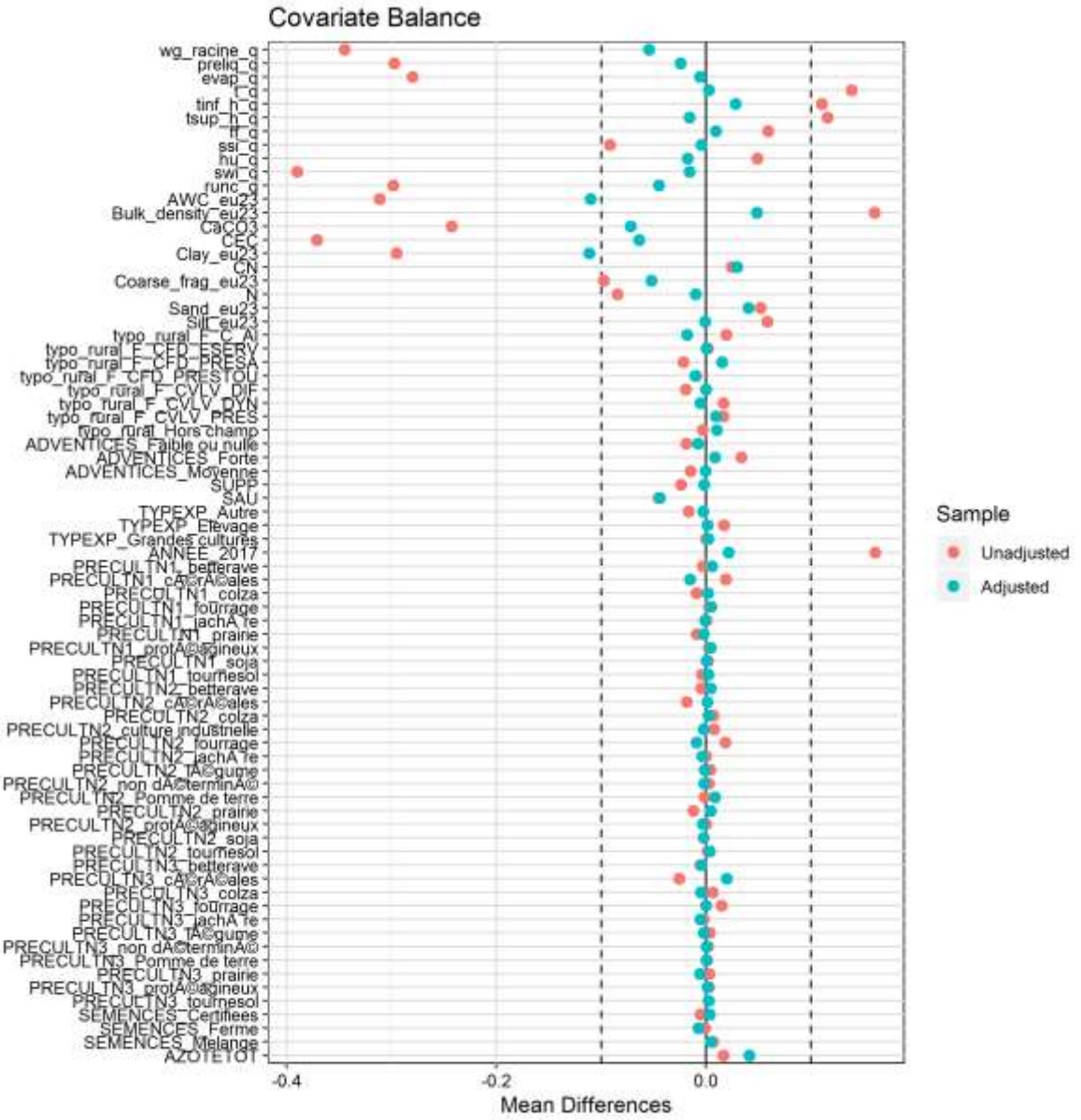
Blé tendre



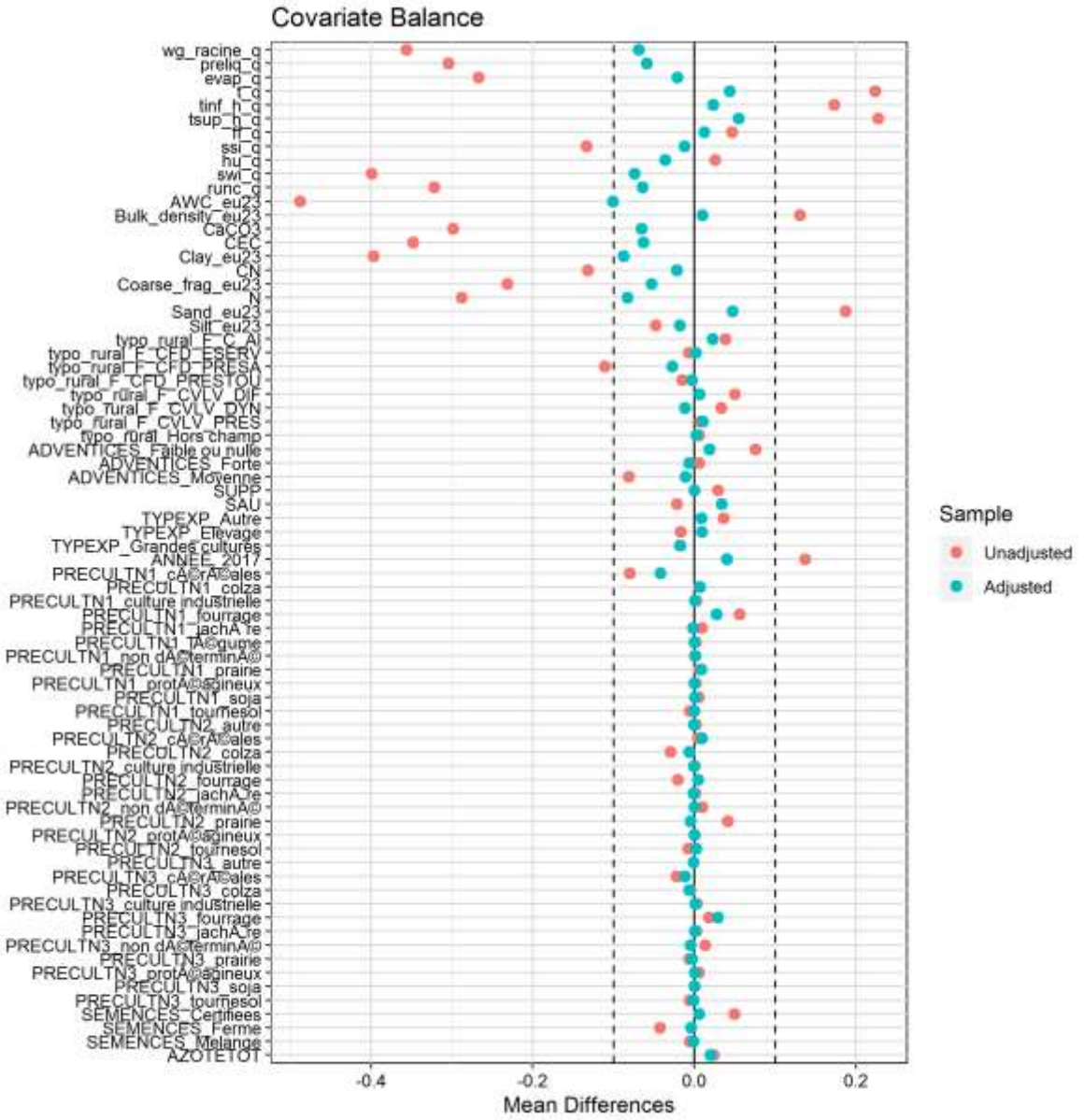
Blé dur


Covariate Balance
wg_racine_q
preliq_q
evap_q
t_q
tinf_h_q
tsup_h_q
tt_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_betterave
PRECULTN1_cA©rA©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_culture industrielle
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachA¨re
PRECULTN1_tA©gume
PRECULTN1_Pomme de terre
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_protA©agineux
PRECULTN1_soja
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_betterave
PRECULTN2_cA©rA©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_culture industrielle
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_jachA¨re
PRECULTN2_non dA©terminA©
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_protA©agineux
PRECULTN2_soja
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_cA©rA©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_culture industrielle
PRECULTN3_jachA¨re
PRECULTN3_tA©gume
PRECULTN3_non dA©terminA©
PRECULTN3_Pomme de terre
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_protA©agineux
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
-0.2
0.0
0.2
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

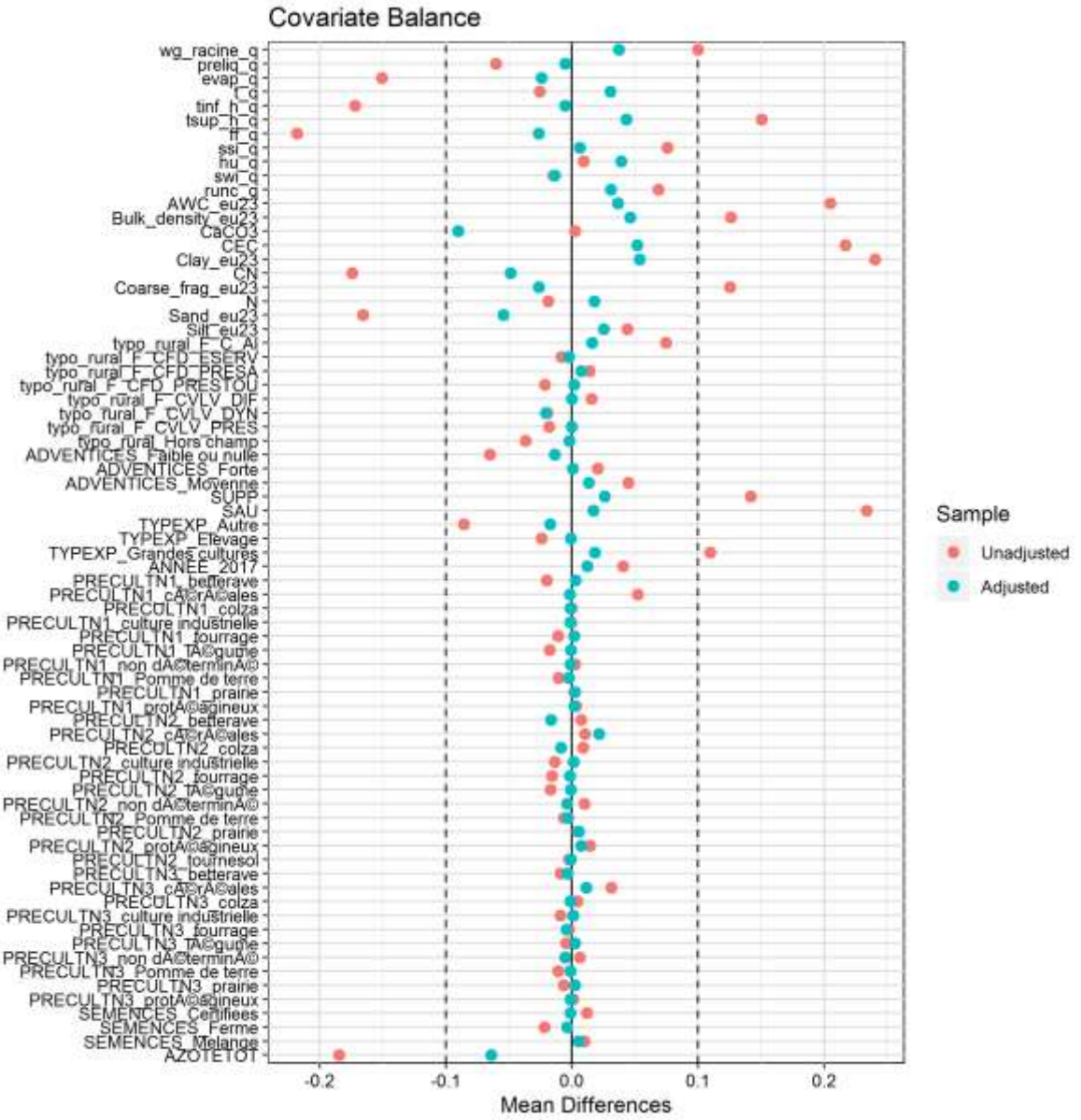
Orge


Covariate Balance
wg_racine_q
prelig_q
evap_q
t_q
tinf_h_q
tsup_h_q
tf_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_betterave
PRECULTN1_cA©rA©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachA¨re
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_protA©agineux
PRECULTN1_soja
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_betterave
PRECULTN2_cA©rA©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_culture industrielle
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_jachA¨re
PRECULTN2_tA©gume
PRECULTN2_non dA©terminA©
PRECULTN2_Pomme de terre
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_protA©agineux
PRECULTN2_soja
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_betterave
PRECULTN3_cA©rA©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_fourrage
PRECULTN3_jachA¨re
PRECULTN3_tA©gume
PRECULTN3_non dA©terminA©
PRECULTN3_Pomme de terre
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_protA©agineux
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
-0.4
-0.2
0.0
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

Triticale

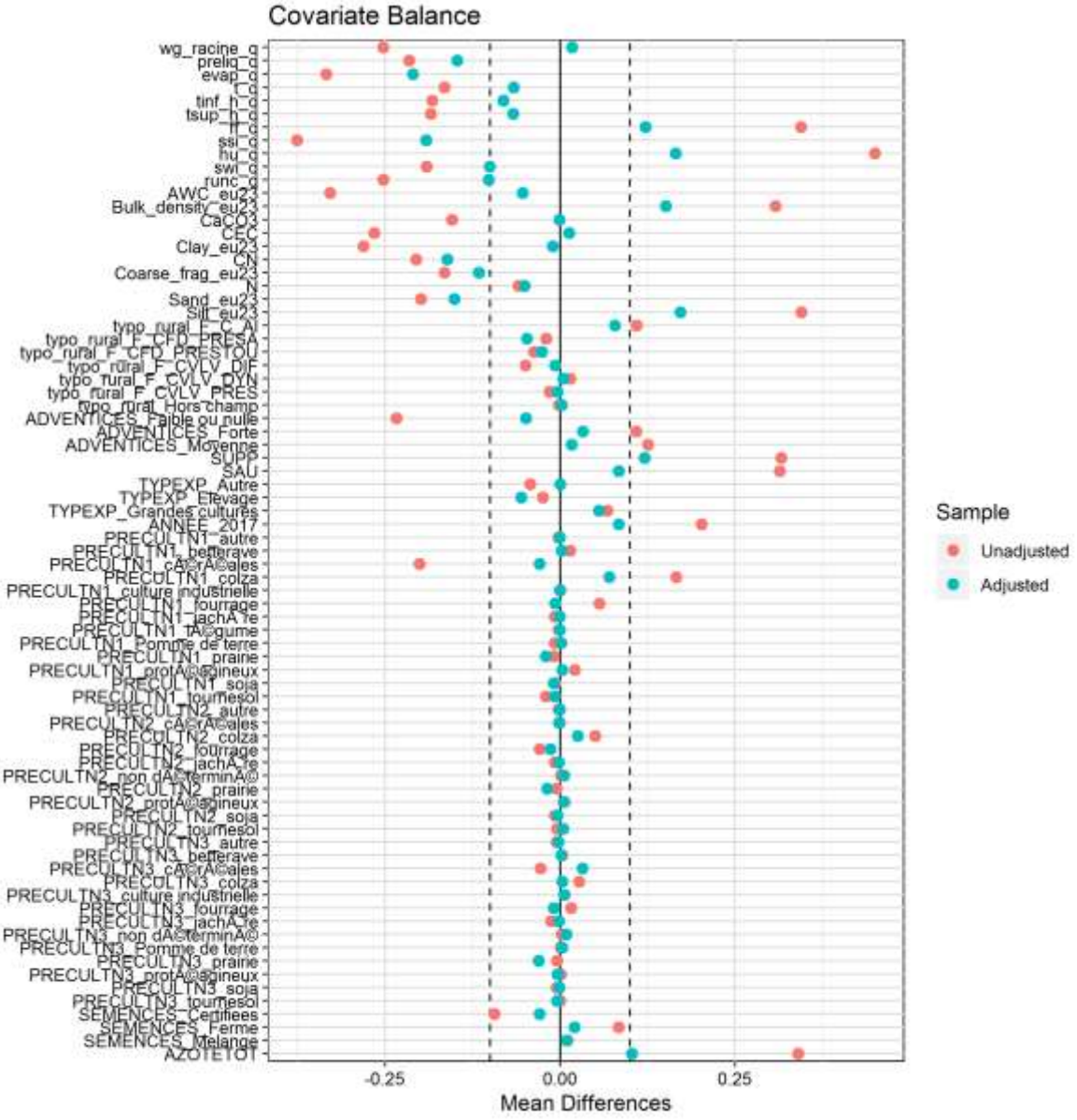

Covariate Balance
wg_racine_q
preliq_q
evap_q
r_q
tinf_h_q
tsup_h_q
tf_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_cA©rA©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_culture industrielle
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachA"re
PRECULTN1_tA©gume
PRECULTN1_non dA©terminA©
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_protA©agineux
PRECULTN1_soja
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_autre
PRECULTN2_cA©rA©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_culture industrielle
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_jachA"re
PRECULTN2_non dA©terminA©
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_protA©agineux
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_autre
PRECULTN3_cA©rA©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_culture industrielle
PRECULTN3_fourrage
PRECULTN3_jachA"re
PRECULTN3_non dA©terminA©
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_protA©agineux
PRECULTN3_soja
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
-0.4
-0.2
0.0
0.2
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

Pomme de terre

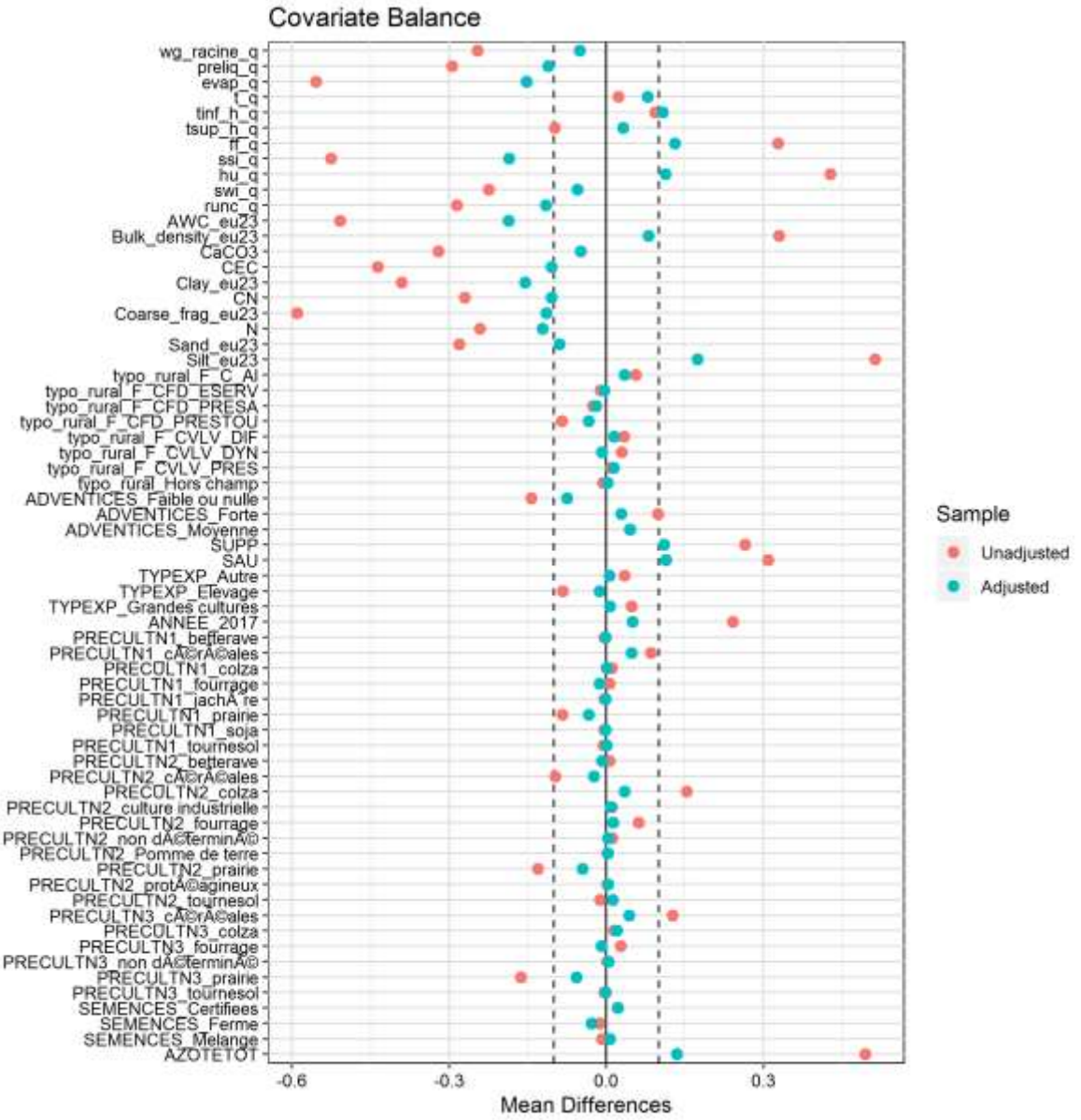


Groupe 1 vs groupe 3

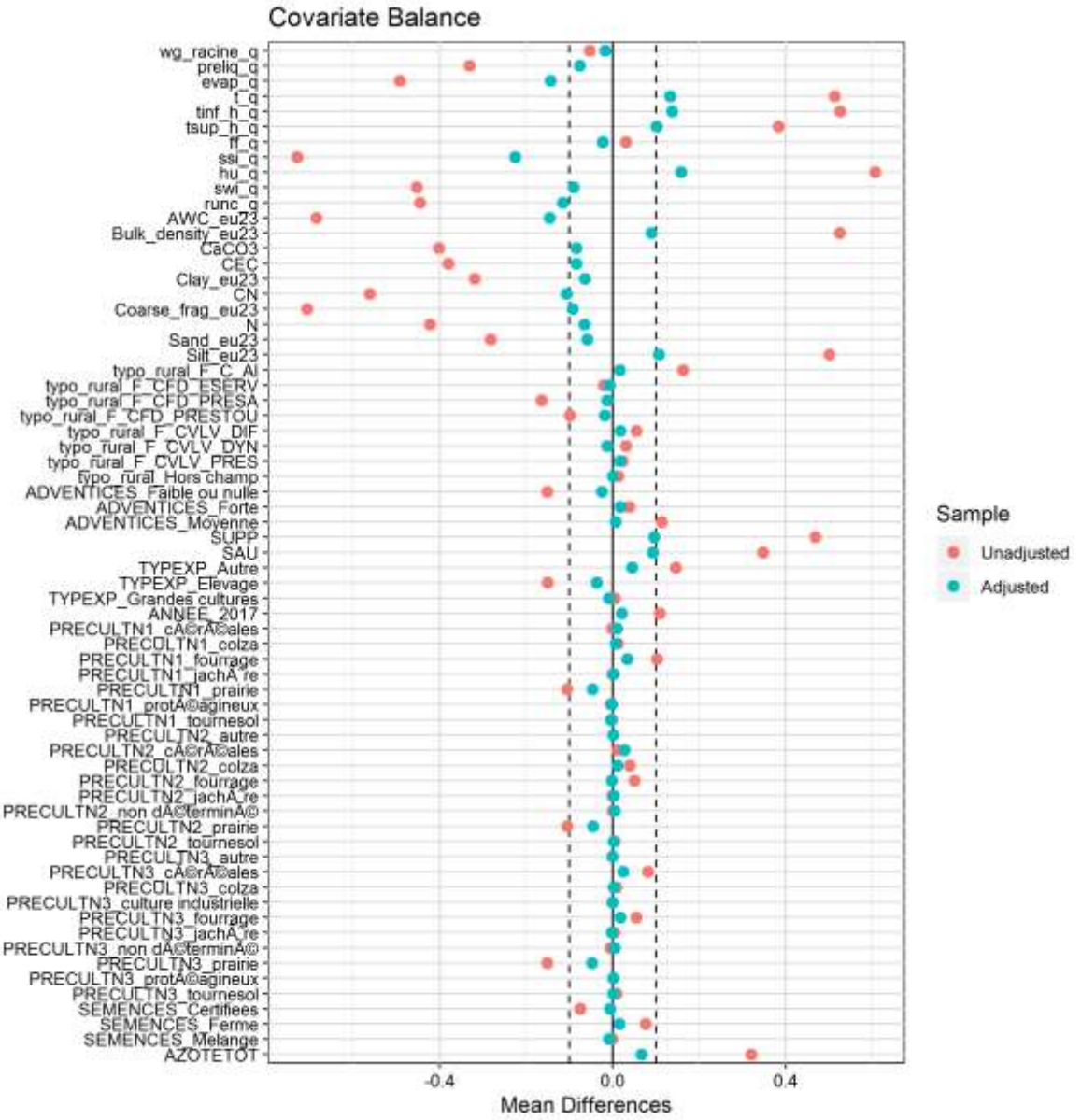
Blé tendre



Orge

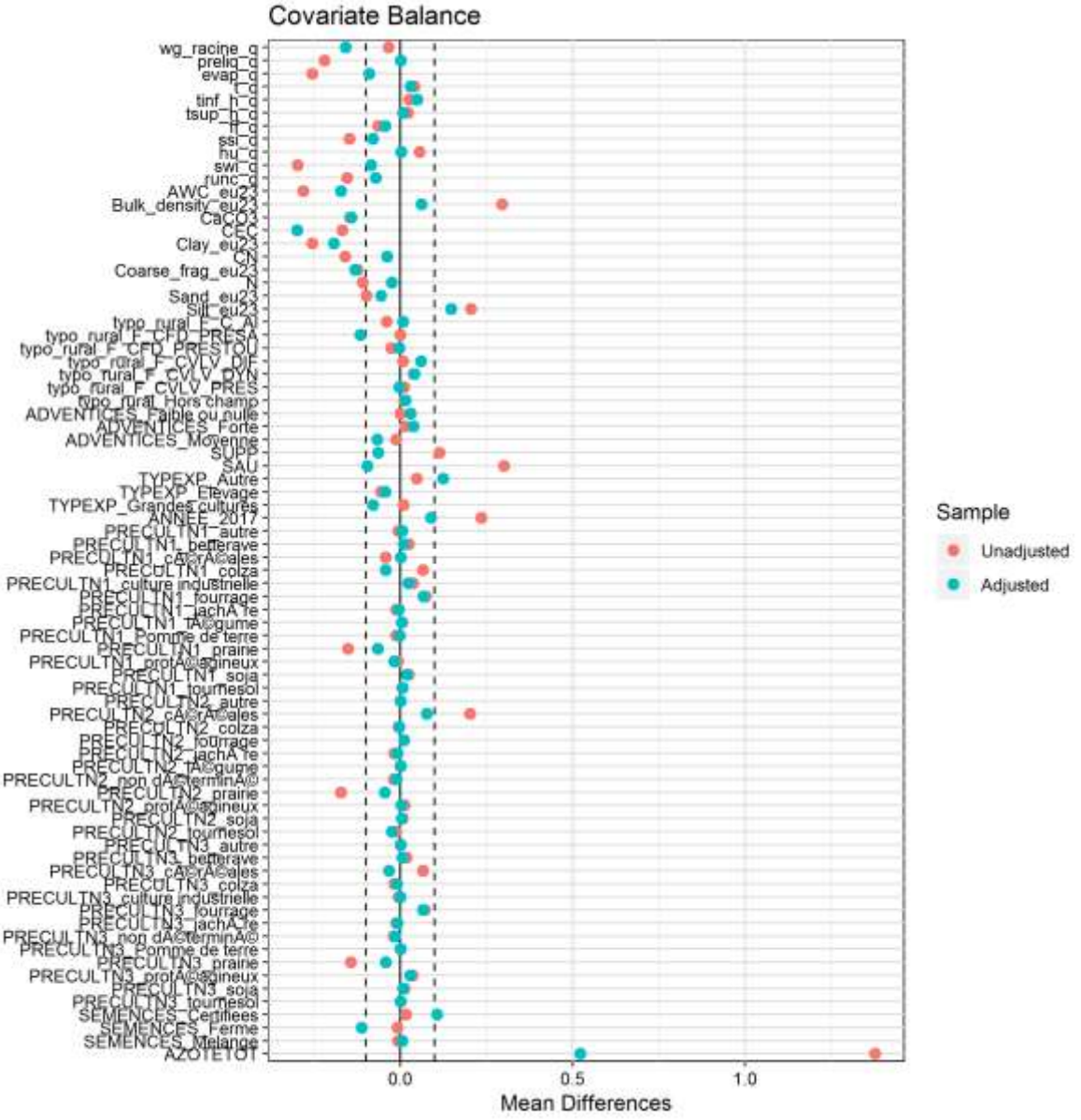

Covariate Balance
wg_racine_q
preliq_q
evap_q
t_q
tinf_h_q
tsup_h_q
ff_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_betterave
PRECULTN1_cÃ©rÃ©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachÃ¨re
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_soja
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_betterave
PRECULTN2_cÃ©rÃ©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_culture industrielle
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_non dÃ©terminÃ©
PRECULTN2_Pomme de terre
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_protÃ©agineux
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_cÃ©rÃ©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_fourrage
PRECULTN3_non dÃ©terminÃ©
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
-0.6
-0.3
0.0
0.3
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

Triticale

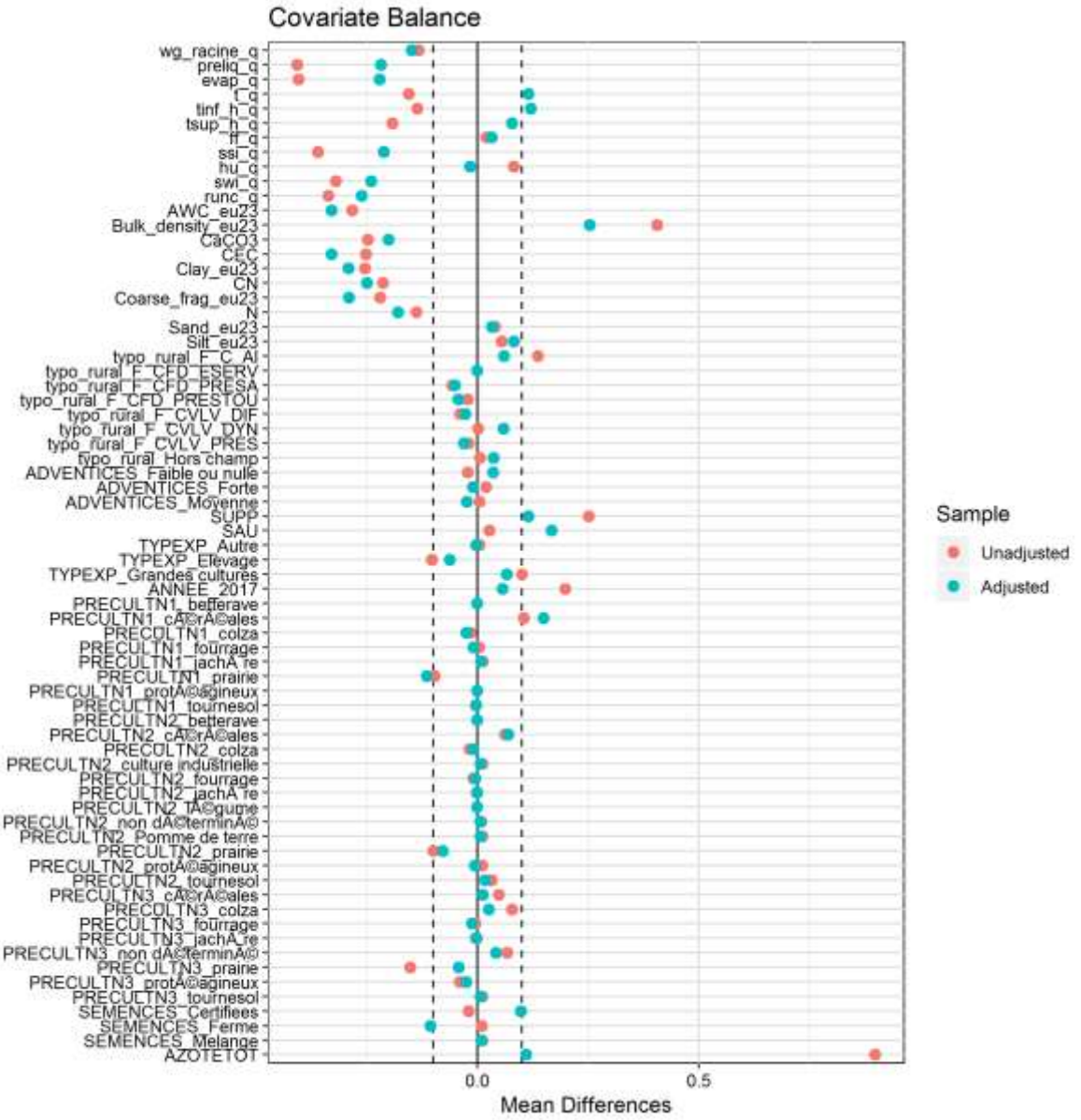

Covariate Balance
wg_racine_q
preliq_q
evap_q
t_q
tinf_h_q
tsup_h_q
ff_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_cA©rA©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachA¨re
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_protA©agineux
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_autre
PRECULTN2_cA©rA©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_jachA¨re
PRECULTN2_non dA©terminA©
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_autre
PRECULTN3_cA©rA©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_culture industrielle
PRECULTN3_fourrage
PRECULTN3_jachA¨re
PRECULTN3_non dA©terminA©
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_protA©agineux
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
-0.4
0.0
0.4
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

Groupe 1 vs groupe 4

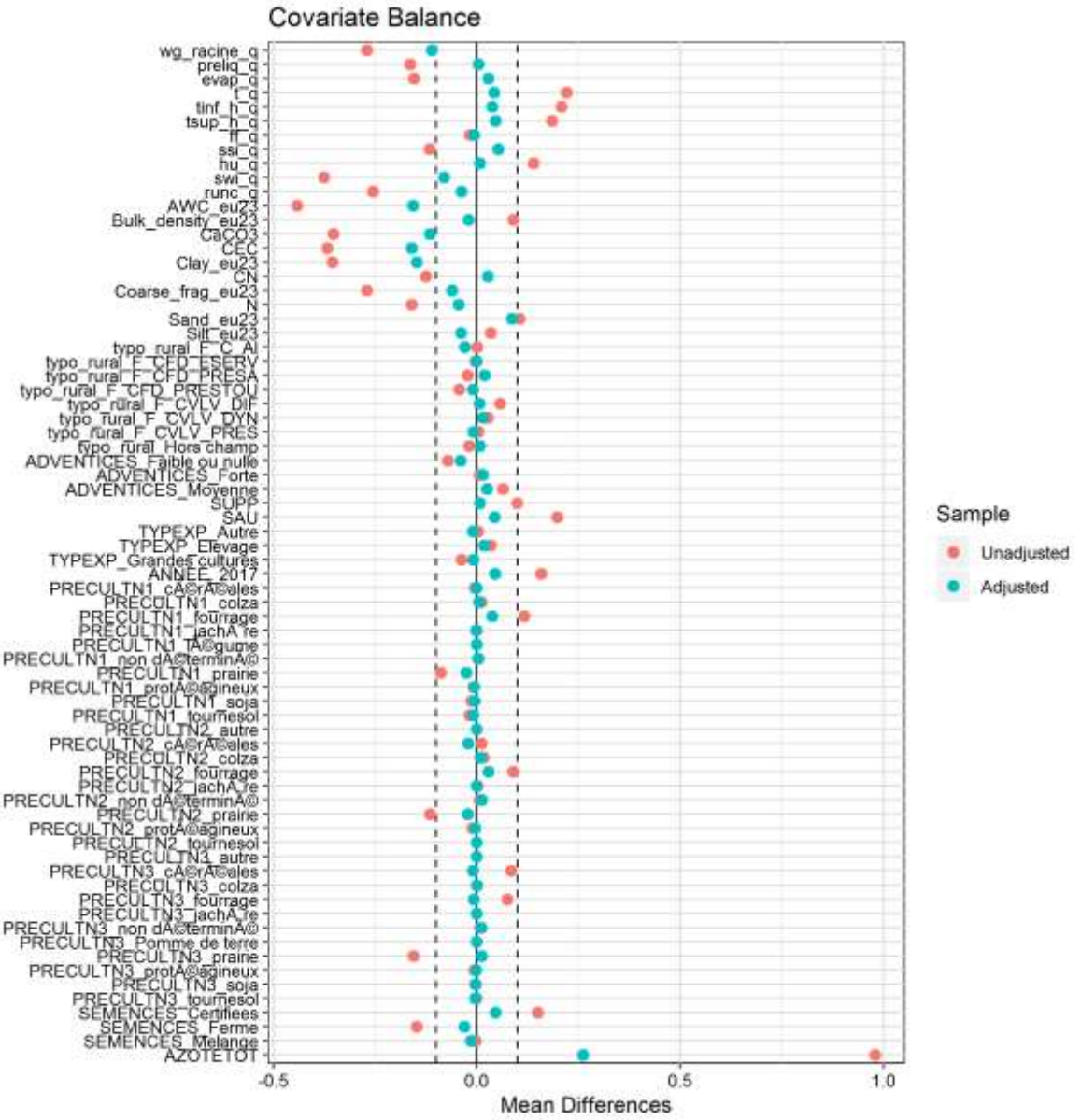
Blé tendre



Orge


Covariate Balance
wg_racine_q
preliq_q
evap_q
t_q
tinf_h_q
tsup_h_q
ff_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_betterave
PRECULTN1_cÃ©rÃ©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachÃ¨re
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_protÃ©agineux
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_betterave
PRECULTN2_cÃ©rÃ©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_culture industrielle
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_jachÃ¨re
PRECULTN2_lÃ©gume
PRECULTN2_non dÃ©terminÃ©
PRECULTN2_Pomme de terre
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_protÃ©agineux
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_cÃ©rÃ©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_fourrage
PRECULTN3_jachÃ¨re
PRECULTN3_non dÃ©terminÃ©
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_protÃ©agineux
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
0.0
0.5
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

Triticale


Covariate Balance
wg_racine_q
preliq_q
evap_q
t_q
tinf_h_q
tsup_h_q
ff_q
ssi_q
hu_q
swi_q
runc_q
AWC_eu23
Bulk_density_eu23
CaCO3
CEC
Clay_eu23
CN
Coarse_frag_eu23
N
Sand_eu23
Silt_eu23
typo_rural_F_C_AI
typo_rural_F_CFD_ESERV
typo_rural_F_CFD_PRESA
typo_rural_F_CFD_PRESTOU
typo_rural_F_CVLV_DIF
typo_rural_F_CVLV_DYN
typo_rural_F_CVLV_PRES
typo_rural_Hors champ
ADVENTICES_Faible ou nulle
ADVENTICES_Forte
ADVENTICES_Moyenne
SUPP
SAU
TYPEXP_Autre
TYPEXP_Elevage
TYPEXP_Grandes cultures
ANNEE_2017
PRECULTN1_cA©rA©ales
PRECULTN1_colza
PRECULTN1_fourrage
PRECULTN1_jachA¨re
PRECULTN1_tA©gume
PRECULTN1_non dA©terminA©
PRECULTN1_prairie
PRECULTN1_protA©agineux
PRECULTN1_soja
PRECULTN1_tournesol
PRECULTN2_autre
PRECULTN2_cA©rA©ales
PRECULTN2_colza
PRECULTN2_fourrage
PRECULTN2_jachA¨re
PRECULTN2_non dA©terminA©
PRECULTN2_prairie
PRECULTN2_protA©agineux
PRECULTN2_tournesol
PRECULTN3_autre
PRECULTN3_cA©rA©ales
PRECULTN3_colza
PRECULTN3_fourrage
PRECULTN3_jachA¨re
PRECULTN3_non dA©terminA©
PRECULTN3_Pomme de terre
PRECULTN3_prairie
PRECULTN3_protA©agineux
PRECULTN3_soja
PRECULTN3_tournesol
SEMENCES_Certifiees
SEMENCES_Ferme
SEMENCES_Melange
AZOTETOT
-0.5
0.0
0.5
1.0
Mean Differences
Sample
Unadjusted
Adjusted

Annexe 5 : Détails de l'analyse technico-économique pour des molécules identifiées comme substituables au prosulfocarbe

Flufénacet – Blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	402	1 051 481	77,97	0,00	2,01	5,29	1 400,49	414,52	376,04	609,92
Flufénacet	423	1 333 893	77,35	0,02	2,16	5,83	1 392,18	412,68	375,21	604,29
ATE			0,62	- 0,02	- 0,16	- 0,53	8,31	1,85	0,83	5,63
Ecart-type			1,65	0,01	0,10	0,18	36,54	17,00	10,46	46,70
Significativité			ns	*	ns	**	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Flufénacet – Orge

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	256	191 993	68,20	0,02	2,21	5,05	1 160,67	379,91	364,82	415,94
Flufénacet	471	486 489	70,25	0,03	1,89	5,05	1 266,95	392,63	378,32	496,00
ATE			- 2,05	- 0,01	0,32	0,00	- 106,28	- 12,73	- 13,50	- 80,06
Ecart-type			4,04	0,02	0,26	0,24	71,23	16,78	9,56	79,46
Significativité			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Chlortoluron – Blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	440	1 276 513	78,40	0,01	2,20	5,81	1 421,49	424,21	381,70	615,58
Chlortoluron	242	531 947	75,56	0,07	2,19	5,52	1 367,82	395,37	379,20	593,25
ATE			2,84	- 0,06	0,01	0,29	53,67	28,84	2,50	22,33
Ecart-type			1,97	0,04	0,12	0,25	45,00	16,43	13,10	44,97
Significativité			ns	ns	ns	ns	ns	.	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Chlortoluron – Orge

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	299	220 988	65,41	0,01	2,19	4,94	1 158,60	367,77	379,87	410,97
Chlortoluron	642	552 423	69,58	0,02	1,99	5,06	1 241,26	377,61	365,04	498,61
ATE			- 4,17	- 0,02	0,20	- 0,12	- 82,66	- 9,84	14,82	- 87,64
Ecart-type			2,94	0,01	0,19	0,25	74,99	19,68	9,16	69,97
Significativité			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Pendiméthaline – Blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	415	1 164 404	79,00	0,00	2,14	5,69	1 438,98	415,14	374,21	649,63
Pendiméthaline	158	431 045	77,69	0,01	2,30	6,13	1 369,59	410,08	374,95	584,55
ATE			1,31	- 0,01	- 0,16	- 0,44	69,39	5,06	- 0,74	65,07
Ecart-type			2,06	0,01	0,16	0,31	44,48	16,49	13,78	44,56
Significativité			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Pendiméthaline – Orge

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	292	223 439	65,64	0,01	2,16	4,90	1 156,03	369,42	374,06	412,55
Pendiméthaline	210	220 189	70,24	0,04	2,25	5,33	1 243,97	363,61	368,55	511,81
ATE			- 4,60	- 0,03	- 0,09	- 0,43	- 87,94	5,81	5,51	- 99,26
Ecart-type			3,08	0,02	0,20	0,26	64,29	21,33	11,61	66,29
Significativité			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Pyroxsulame – Blé tendre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (q/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	478	1 361 345	78,18	0,02	2,18	5,75	1 427,12	429,84	370,52	626,76
Pyroxsulame	565	1 040 133	73,89	0,06	1,68	4,98	1 375,89	409,21	350,17	616,51
ATE			4,28	- 0,04	0,5	0,77	51,23	20,63	20,35	10,25
Ecart-type			1,98	0,03	0,1	0,27	47,22	21,15	11,47	57,46
Significativité			*	ns	***	**	ns	ns	.	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Métribuzine – Pomme de terre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (t/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	119	31 078	48,85	0,03	2,79	16,47	4 884,85	1 951,09	991,69	1 942,07
Métribuzine	203	50 453	49,78	0,09	2,43	16,41	4 977,82	1 913,43	981,76	2 082,63
ATE			- 0,93	- 0,06	0,36	0,06	- 92,96	37,66	9,94	- 140,56
Ecart-type			1,85	0,06	0,26	0,85	184,85	79,81	24,83	218,81
Significativité			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Clomazone – Pomme de terre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (t/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	748	100 376	51,74	0,17	2,23	18,02	5 082,14	2 040,69	990,07	2 051,38
Clomazone	261	76 742	50,39	0,22	2,28	16,76	4 860,95	1 977,31	986,73	1 896,91
ATE			1,35	- 0,05	- 0,05	1,26	221,19	63,38	3,34	154,47
Ecart-type			1,37	0,07	0,1	0,65	189,02	104,98	18,81	268,66
Significativité			ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Aclonifen – Pomme de terre

	Nombre de parcelles	Surfaces extrapolées	Rendement (t/ha)	Nombre de passage de désherbage mécanique	IFT herbicide	IFT total	Produit brut (€/ha)	Charges opérationnelles (€/ha)	Charges de mécanisation (€/ha)	Marge nette (€/ha)
Prosulfocarbe	534	75 929	50,18	0,06	2,48	16,77	4 983,30	1 364,36	971,92	2 647,02
Aclonifen	258	55 712	52,60	0,13	2,28	17,63	5 321,66	1 316,23	954,30	3 051,13
ATE			- 2,42	- 0,07	0,20	- 0,87	- 338,37	48,12	17,62	- 404,11
Ecart-type			1,08	0,04	0,10	0,57	153,17	52,38	23,03	165,40
Significativite			*	*	ns	ns	*	ns	ns	*

Source : propre élaboration à partir des données PK Grandes cultures 2014/2017, des référentiels de prix issus du SI Agrosyst et des barèmes d'entraide mobilisés

Note : la confiance dans l'effet suspecté est donnée par l'intensité de la couleur

Annexe 6 : Séries chronologiques utilisées pour l'analyse de sensibilité

Type d'indicateur	Indicateur corrigé	Série(s) utilisée(s) (moyenne si plusieurs séries)	Lien
Produit brut	Prix des récoltes - blé tendre	Prix agricoles à la production - blé tendre (IPPAP)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538826
	Prix des récoltes - pomme de terre	Prix agricoles à la production - pomme de terre (IPPAP)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538832
Charges opérationnelles	Pris de l'eau d'irrigation	Eau potable à usage non domestique (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539326
	Prix de la fertilisation minérale	Engrais et amendements (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539196
	Prix de la fertilisation organique	Amendements organiques (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539226
	Prix de la protection phytosanitaire	Produits de protection des cultures (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539228
	Prix des semences - blé tendre	Semences de blé tendre (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539169
	Prix des semences - pomme de terre	Plants de pomme de terre (IPPAP)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538872
Charges de mécanisation	Coût des récoltes	Tracteurs (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539337
		Entretien et réparation des véhicules (IPMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539311
		Carburants (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539190
		Matériel de récolte (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539336
	Coût des semis et de la distribution d'engrais	Tracteurs (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539337
		Entretien et réparation des véhicules (IPMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539311

		Carburants (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539190
		Matériel de semis, plantation et distribution (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539333
	Coût de la pulvérisation	Tracteurs (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539337
		Entretien et réparation des véhicules (IPMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539311
		Carburants (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539190
		Matériel de protection des cultures (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539335
	Coût du travail du sol	Tracteurs (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539337
		Entretien et réparation des véhicules (IPMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539311
		Carburants (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539190
		Matériel de travail et mise en état du sol (IPAMPA)	https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010539334

Annexe 7 : Détails des estimations pour le scénario A

Culture (c)	Culture – précédent (cp)	Surfaces (ha) (S_{cp})		Proportion des surfaces utilisant le prosulfocarbe pour la culture (PST_c)		Surfaces utilisant le prosulfocarbe et ayant pu l'utiliser pour le précédent (ha)		Proportion des surfaces ayant utilisé le prosulfocarbe pour le précédent (PST_p)		Surfaces ayant utilisé le prosulfocarbe 2 ans de suite (ha)		Dose moyenne de prosulfocarbe (kg/ha) (D_c)		Quantité de prosulfocarbe qui serait retirée (kg) pour le couple cp (Q_{cp})	Quantité de prosulfocarbe qui serait retirée (t) pour la culture c (Q_c)
Blé dur	Blé dur de blé dur	18 836		50%		9 418		50%		4 709		2,185		10 289	15,56
	Blé dur de blé tendre	6 823		50%		3 411		50%		1 706				3 727	
	Blé dur d'orge	3 105	×	50%	➔	1 552	×	20%	➔	310	×		➔	678	
	Blé dur de pdt	1 134		50%		567		60%		340				743	
	Blé dur de triticale	196		50%		98		20%		19				42	
	Blé dur de carotte	167		50%		83		45%		38				82	
Blé tendre	Blé tendre de blé dur	15 827		50%		7 914		50%		3 957		2,123		8 400	267,59
	Blé tendre de blé tendre	362 175		50%		181 087		50%		90 544				192 224	
	Blé tendre d'orge	67 772	×	50%	➔	33 886	×	20%	➔	6 777	×		➔	14 388	
	Blé tendre de pdt	79 109		50%		39 554		60%		23 733				50 384	
	Blé tendre de triticale	8 353		50%		4 176		20%		824				1 749	
	Blé tendre de carotte	921		50%		460		45%		207				440	

Orge	Orge de blé dur	25 303	×	20%	→	5 061	×	50%	→	2 530	×	2,184	→	5 526	206,13
	Orge de blé tendre	838 109		20%		167 622		50%		83 811				183 043	
	Orge d'orge	177 209		20%		35 442		20%		7 088				15 481	
	Orge de pdt	2 478		20%		496		60%		297				649	
	Orge de triticale	15 834		20%		3 167		20%		624				1 364	
	Orge de carotte	354		20%		71		45%		32				70	
Triticale	Triticale de blé dur	580	×	20%	→	116	×	50%	→	58	×	2,227	→	129	16,89
	Triticale de blé tendre	50 656		20%		10 131		50%		5 066				11 281	
	Triticale d'orge	19 864		20%		3 973		20%		795				1 769	
	Triticale de pdt	224		20%		45		60%		27				60	
	Triticale de triticale	41 536		20%		8 307		20%		1 638				3 648	
	Triticale de carotte	13		20%		3		45%		1				3	
Pomme de terre	PdT de blé dur	647	×	60%	→	388	×	50%	→	194	×	2,418	→	469	43,20
	PdT de blé tendre	53 166		60%		31 900		50%		15 950				38 567	
	PdT d'orge	8 743		60%		5 246		20%		1 049				2 537	
	PdT de pdt	1 451		60%		871		60%		522				1 263	
	PdT de triticale	236		60%		142		20%		28				68	
	PdT de carotte	452		60%		271		45%		122				295	

Carotte	Carotte de blé dur	132	×	45%	➔	59	×	50%	➔	30	×	1,937	➔	58	0,76
	Carotte de blé tendre	1 032		45%		464		50%		232				450	
	Carotte d'orge	447		45%		201		20%		40				78	
	Carotte de pdt	205		45%		92		60%		55				107	
	Carotte de triticale	38		45%		17		20%		3				7	
	Carotte de carotte	144		45%		65		45%		29				56	

Résumé

Résumé_ En 2021, le prosulfocarbe est le deuxième herbicide le plus utilisé en France après le glyphosate et les tonnages n'ont cessé d'augmenter. Avec un peu plus 6500 tonnes achetées, cet herbicide approche 15% de la totalité des substances actives vendues en France en 2021, hors produits de biocontrôle ou applicables en Agriculture Biologique. Il est utilisé pour lutter contre les adventices, tout particulièrement certaines graminées dont la gestion est problématique pour les céréales (à l'automne) et la culture de Pomme de terre (au printemps). L'attrait pour cette molécule s'est accru avec le retrait d'autres herbicides qui avaient un spectre d'activité assez similaire mais présentaient des impacts sur la qualité des eaux de surface et souterraines. La règlementation cadrant les utilisations du prosulfocarbe a été rendue plus stricte en 2017 puis en 2018, conduisant notamment à définir une large zone tampon autour des parcelles à traiter pour ne pas contaminer l'entourage. Cette mesure d'exception n'a toutefois pas permis de faire disparaitre les contaminations des productions de cultures 'non cible' à destination de l'alimentation humaine et animale. Le rapport conclut qu'il n'existe pas à ce jour de levier non chimique curatif apportant une alternative mobilisable pour se substituer au prosulfocarbe à moins de repenser plus en profondeur les systèmes de culture/de production. Les agriculteurs qui s'en passent bénéficient d'une situation relativement saine au départ qu'ils peuvent entretenir en mobilisant des actions préventives comme la diversification des rotations et les décalages de date de semis et du désherbage mécanique. Pour la Pomme de terre, il serait sans doute possible de restreindre les volumes de prosulfocarbe employés en limitant les applications aux seuls rangs de pomme de terre. Cela nécessite toutefois d'équiper en conséquence la ferme France, ce qui peut prendre un peu de temps. Les secteurs amont et aval de l'agriculture disposent de moyens de contribution pour contenir le recours au prosulfocarbe à travers une adaptation de l'offre variétale, de nouveaux équipements ou encore le maintien de filières de diversification.

Mots clé : herbicide, volatilité, zone tampon, désherbage mécanique, prophylaxie, graminées adventices, marge nette, scénario

Abstract _Prosulfocarb is a residual herbicide primarily used on winter cereals and potatoes to control grassy weeds such as ryegrass or foxtail and some broadleaf weeds, in pre -emergence or early post-emergence applications. In 2020, it was the 2nd most used herbicide in France, just after glyphosate. This herbicide is regularly present in the atmosphere and contaminates various products intended for human or animal consumption. The regulatory rule changed in 2017, then in 2018, to avoid this contamination by fixing the need to use low-drift nozzle sprayers and to apply a buffer zone of 500m/1km between the field to be treated with prosulfocarb and the fields of sensitive crops such as orchards, market gardening, buckwheat or chia.
The objective of this work was to identify alternatives to prosulfocarb and to assess the technical and economic impact of their use on farms. When prosulfocarb is not used, it may lead to switching to other chemical herbicides. Organic Farming (OF) systems use non-chemical alternatives to herbicides, such as mechanical weeding and preventative actions, to reduce weed pressure. In many cases, the application of alternatives to

prosulfocarb, whether chemical or not, does not impair the direct marginal costs of benefits per unit area at the plot scale. Although, as for the non-chemical alternatives, the higher prices and lower costs of OF may partly compensate for the lower yields. Weed control systems combining chemical and non-chemical solutions are regularly used. In cereal crops, national statistics show that a two-week shift in the sowing date makes it possible to limit herbicide treatments but slightly reduce yields. In potato fields, farmers could reduce the application of the herbicide only on the row with mechanical interventions on the inter-row.
These approaches can reduce agriculture's reliance on prosulfocarb, but we found that three scenarios including a fairly widespread shift in wheat sowing dates needed to be combined to reduce prosulfocarb by more than 30% consumption. It is a considerable effort. Thus, the mobilization of all the prophylactic levers and the involvement of all the actors concerned (plant breeding, agricultural machinery, etc.) are necessary to accelerate the transitions towards weed management systems less dependent on prosulfocarb.

Keywords: prosulfocarb, herbicide, alternatives, air contamination, cereals, economic analysis, preventive measure, weed infestation.