



HAL
open science

Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Évaluation économique

Alain Carpentier, Adelaïde Fadhuile, Mathilde Roignant, Maud Blanck,
Xavier Reboud, François Jacquet, Christian Huyghe

► **To cite this version:**

Alain Carpentier, Adelaïde Fadhuile, Mathilde Roignant, Maud Blanck, Xavier Reboud, et al.. Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Évaluation économique: Évaluation économique. [0] INRAE. 2020, 161 p. hal-02496282

HAL Id: hal-02496282

<https://hal.science/hal-02496282>

Submitted on 17 Jun 2020

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.

> Alternatives au glyphosate en grandes cultures

Evaluation économique

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huyghe C.

Ce travail d'expertise a été réalisé à la demande du Premier Ministre et des Ministres en charge de l'Agriculture et la Transition Écologique et Solidaire, dans le cadre du plan de sortie du glyphosate. Il vise à fournir à l'Anses des éléments sur les impacts économiques du retrait du glyphosate.

Ce rapport a bénéficié d'interactions avec les experts des Instituts Techniques Agricoles.

Les auteurs remercient en particulier les experts qui ont participé aux groupes de travail, en septembre, novembre et décembre 2019:

Ludovic Bonin (Arvalis)

Jean Paul Bordes (ACTA)

Franck Duroueix (Terres Inovia)

Rémy Duval (ITB)

Emeric Emonet (ACTA)

Lise Gautellier Vizios (Arvalis)

Camille Guérin (FNAMS)

Matthieu Hirschy (ACTA)

Bernard Quere (FN3PT)

Alain Rodriguez (ACTA)

Nathalie Verjux (ARVALIS)

Fanny Vuillemin (Terres Inovia)

Les auteurs remercient également Nathalie Delame (INRAE), pour son aide dans l'accès et le traitement des données du SSP-MAA.

Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique

INTRODUCTION :	9
COURT RAPPEL COMMENTE DE LA COMMANDE	9
CONTEXTE	9
OBJECTIF	9
PERIMETRE DE L'EVALUATION DES EFFETS DU RETRAIT DU GLYPHOSATE	10
NATURE DES SURCOUTS EVALUES	11
ARCHITECTURE GENERALE DE LA DEMARCHE D'EVALUATION DES SURCOUTS DU RETRAIT DU GLYPHOSATE	11
CONCEPTION DES SCENARIOS : LE TRAVAIL DU SOL EN TANT QUE PRINCIPALE ALTERNATIVE AU GLYPHOSATE	12
EVALUATION DES EFFETS DES SCENARIOS : METHODE STATISTIQUE EMPLOYEE	13
PLAN DU RAPPORT	14
1.USAGES GENERAUX DU GLYPHOSATE EN FRANCE	15
1.1 SPECIFICITES ET CARACTERISTIQUES DU GLYPHOSATE	15
a. <i>Un herbicide foliaire, systémique et non sélectif unique</i>	15
b. <i>Données mobilisées</i>	16
1.2 USAGES DU GLYPHOSATE EN GRANDES CULTURE EN FRANCE : QUELQUES DONNEES DE CADRAGE	17
a. <i>Surfaces d'application</i>	17
b. <i>Doses et cibles d'applications</i>	18
c. <i>Un usage en essentiellement en inter-culture</i>	19
1.3 DES USAGES ESSENTIELLEMENT EN INTER-CULTURE	20
a. <i>Préparation de la parcelle au semis</i>	20
b. <i>La destruction de cultures développées</i>	20
c. <i>La régulation des couverts permanents</i>	21
d. <i>Lutte contre les adventices « difficiles »</i>	21
1.4 DES USAGES TRES SPECIFIQUES EN CULTURE	22
a. <i>Contrôle des adventices par applications localisées</i>	23
b. <i>Le désherbage de culture porte-graine en période de repos végétatif</i>	23
c. <i>Dessiccation</i>	23
d. <i>Rouissage du lin</i>	24
1.5. LE CAS PARTICULIER DE LA PRODUCTION DE SEMENCES	24
2. LES PRINCIPALES ALTERNATIVES AU GLYPHOSATE POUR LE CONTROLE DES ADVENTICES, ET LEURS LIMITES	25
2.1 ALTERNATIVES AU GLYPHOSATE POUR LE CONTROLE DES ADVENTICES ET DES INTER-CULTURES	25
a. <i>Désherbage mécanique et travail du sol</i>	25
b. <i>Leviers chimiques sélectif en culture</i>	27
c. <i>Désherbage thermique et électrique</i>	28
e. <i>Implantation de cultures intermédiaires</i>	28
f. <i>Rotations culturales et associations culturales</i>	29
2.2 OUTILS DE REGULATION DES COUVERTS, TRAVAIL DU SOL ET DE DESHERBAGE MECANIQUE CONSIDERES DANS L'ETUDE	29
a. <i>Roulage et broyage des couverts végétaux</i>	29
b. <i>Travail du sol très superficiel et superficiel</i>	29
c. <i>Travail profond du sol sans retournement</i>	30
d. <i>Travail profond du sol avec retournement</i>	30
2.3 RISQUES AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS EN CAS DU RETRAIT DU GLYPHOSATE	30
a. <i>Erosion des sols</i>	31
b. <i>Gestion à long terme de l'enherbement et des vivaces</i>	31
c. <i>Désherbage chimique et résistances des adventices</i>	31

d.	<i>Désherbage chimique et profil toxicologique des substituts au glyphosate</i>	32
e.	<i>Perte de rendement</i>	32
2.4	LE CAS PARTICULIER DE D'AGRICULTURE DE CONSERVATION DES SOLS, EN LIEN AVEC LA REDUCTION DU TRAVAIL DU SOL EN GENERAL	32
a.	<i>Principes de l'agriculture de conservation des sols, et des techniques sans labour</i>	33
b.	<i>Réduction du travail du sol et herbicides chimiques</i>	33
c.	<i>Intérêts économiques et organisationnels de la réduction du travail du sol</i>	34
3.	FACTEURS EXPLICATIFS DE L'UTILISATION DU GLYPHOSATE EN INTER-CULTURE EN GRANDES CULTURES, ET SITUATIONS POTENTIELLEMENT « DELICATES » EN CAS DE RETRAIT DU GLYPHOSATE	35
3.1	ANALYSE DES FACTEURS LIES L'UTILISATION DU GLYPHOSATE EN INTER-CULTURE	35
a.	<i>Stratégie de travail du sol</i>	35
b.	<i>Taille des exploitations</i>	37
c.	<i>Caractéristiques pédologiques</i>	37
d.	<i>Précédent cultural</i>	38
e.	<i>Durée de l'inter-culture</i>	39
f.	<i>Pression des adventices</i>	40
g.	<i>IFT herbicides avec utilisation et sans utilisation de glyphosate</i>	40
h.	<i>Taille des exploitations, stratégie de travail du sol et usage du glyphosate</i>	41
3.2	SITUATIONS POTENTIELLEMENT « DELICATES » EN CAS DE RETRAIT DU GLYPHOSATE EN INTER-CULTURE	43
a.	<i>Parcelles avec pression adventice élevée</i>	43
b.	<i>Systèmes culturaux simplifiés avec synchronisation des flores adventices spécifiques, glyphosate en outil spécifique</i>	43
c.	<i>Sols superficiels (et caillouteux), en lien avec l'agriculture de conservation des sols</i>	44
d.	<i>Sols hydromorphes et/ou argileux, en lien avec les problématiques de jours agronomiques disponibles</i>	45
e.	<i>Préparation anticipée du lit de semence, pour des raisons économique et organisationnelle</i>	45
f.	<i>Interactions entre la taille des exploitations, les sols « difficiles » et les stratégies de travail du sol peu intense</i>	46
4.	COUTS DE TRANSITION, CONTRAINTES D'AJUSTEMENT, ET SURCOUTS NON EVALUES	50
4.1.	COUTS DE TRANSITION	50
a.	<i>Coûts d'apprentissage</i>	50
b.	<i>Coûts de transaction</i>	51
4.2	CONTRAINTES D'AJUSTEMENT	51
4.3	LES SURCOUTS DE LA PHASE DE D'UTILISATION MAITRISEE LIES AUX CHANGEMENTS D'ASSOLEMENT	53
5.	ÉVALUATION DES EFFETS DU RETRAIT DU GLYPHOSATE	55
5.1	DEMARCHE GENERALE DE LA MESURE DES EFFETS DU RETRAIT DU GLYPHOSATE	56
a.	<i>Constat 1. L'utilisation de glyphosate en inter-culture n'est qu'un des moyens de contrôle des adventices dont disposent les agriculteurs</i>	56
b.	<i>Constat 2. L'utilisation de glyphosate en inter-culture répond à plusieurs types de besoin, souvent simultanément</i>	56
c.	<i>Constat 3. Les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol sont nombreux et imbriqués</i>	58
d.	<i>Constat 4. Les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol relèvent d'une logique pluriannuelle</i>	58
e.	<i>Constat 5. Les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol sont impactés par de nombreux facteurs</i>	60

5.2. CHOIX DES SCENARIOS GENERAUX POUR L'ÉVALUATION DU RETRAIT DU GLYPHOSATE, ET DEMARCHE GENERALE DE LEUR EVALUATION	61
a. « Scénarios » et « scénarios généraux »	61
b. Scénario général de référence du retrait du glyphosate : stratégies de travail du sol avec, au minimum, labour fréquent	61
c. Scénario général de référence « extrême » du retrait du glyphosate : stratégies de travail du sol avec labour systématique	64
d. Scénario spécifique pour les parcelles non labourées, en semis direct ou en techniques culturales simplifiées.	65
5.3. PRINCIPALES ETAPES DES CALCULS DES EFFETS ET DES SURCOUTS DES SCENARIOS CONSIDERES	65
a. Etape 1. Estimation des effets du retrait du glyphosate pour les parcelles avec utilisation de glyphosate	67
b. Etape 2. Estimation des effets du retrait du glyphosate pour les parcelles sans utilisation de glyphosate, et hypothèses associées	67
c. Etape 3. Combinaison des estimations des effets du retrait du glyphosate pour l'ensemble des parcelles, avec sans utilisation de glyphosate, par type de stratégie de travail du sol	69
d. Questions soulevées par les effets du retrait du glyphosate sur les utilisations des autres herbicides	69
e. Questions soulevées par l'hétérogénéité des besoins couverts par l'utilisation de glyphosate	70
5.4 ESTIMATION STATISTIQUE DES EFFETS MOYENS DES SCENARIOS : APPROCHE DE PONDERATION PAR LES SCORES DE PROPENSION	72
a. Présentation générale du problème de l'estimation des effets moyens des scénarios	72
b. Problème d'estimation considéré : structure formelle	77
c. Méthodes d'estimation des effets moyens des scénarios de retrait du glyphosate : les limites des estimateurs dits « naïfs »	78
d. Contrôle des effets des facteurs impactant à la fois les choix de stratégie de travail du sol, et ceux des interventions de désherbage et de travail du sol	79
e. Pondération par les scores de propension	82
f. Propension des agriculteurs à réduire le travail du sol	86
g. Mise en œuvre des estimations	86
6 RESULTATS D'ESTIMATION DES SURCOUTS LIES AU RETRAIT DU GLYPHOSATE	92
6.1. CONSIDERATIONS GENERALES	92
6.2 PARCELLES EN « SITUATION DELICATES » EN CAS DE RETRAIT DU GLYPHOSATE	93
6.3 EFFETS ESTIMES SUR LES INTERVENTIONS DE DESHERBAGE ET DE TRAVAIL DU SOL, ET DES SURCOUTS ASSOCIES, POUR LE SCENARIO GENERAL DE REFERENCE	95
a. Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques sur les parcelles avec utilisation de glyphosate	95
b. Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques sur les parcelles sans utilisation de glyphosate	100
c. Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques de désherbage et de travail du sol	102
d. Résultats de l'estimation des surcoûts moyens supportés par les agriculteurs en cas retrait du glyphosate dans le scénario général de référence	104
6.4 ANALYSES DE SENSIBILITE DU SCENARIO GENERAL DE REFERENCE	112
CONCLUSION	120
BIBLIOGRAPHIE	124
RESSOURCES ELECTRONIQUES CONSULTEES	127
ANNEXES	128

Annexe A Démarche d'utilisation des données	128
Annexe B Classification HRAC des modes d'actions des herbicides	142
Annexe C Destruction chimique des CIPAN : Dérogations par régions.	143
Annexe D Sensibilité des différentes espèces aux différents modes de destruction. Elle peut être modulée selon le développement du couvert (couvert développé, variété précoce = plus sensible au gel).	144
Annexe E Taux annuel de décroissance d'adventices et effet d'un labour.	145
Annexe F Méthodes de maitrises des adventices selon les cibles	146
Annexe G Résultats additionnels	147

Table des Figures

Figure 1: Dose moyenne en grammes de glyphosate à l'hectare pour chacun des usages existant pour cette molécule	16
Figure 2 Parts de surfaces traitées au glyphosate par anciennes régions administratives	17
Figure 3 Pourcentage de surface en grandes cultures annuelles avec utilisation de glyphosate en 2016-2017, selon la culture à venir (nombre de parcelles entre parenthèses).....	18
Figure 4 Cibles de l'usage du glyphosate en grandes cultures annuelles.....	19
Figure 5 Périodes d'application du glyphosate selon la culture à suivre.	20
Figure 6 : Faisabilité du désherbage mécanique : Modèle de base Jour Disponible	26
Figure 7 Propriétés des outils de travail du sol.	30
Figure 8 Utilisation de glyphosate, en part de surface traitée, selon la stratégie de travail du sol.....	36
Figure 9 Utilisation de glyphosate selon la SAU de l'exploitation.	37
Figure 10 Utilisations de glyphosate selon des paramètres de sol.	38
Figure 11 Utilisation de glyphosate selon le précédent cultural.	39
Figure 12 Utilisation de glyphosate selon la classification du précédent cultural à repousses ou non.	39
Figure 13 Utilisations de glyphosate selon la durée de l'inter-culture	40
Figure 14: Utilisation de glyphosate selon la note de pression en culture en adventices de la parcelle	40
Figure 15 IFT moyens par parcelle selon la stratégie de travail du sol	41
Figure 16 : IFT moyen par parcelle selon la pression adventice perçue de la parcelle.....	41
Figure 17 Sols de Marais Poitevin-Sud Vendée : jours disponibles issus de J-Dispo pour gérer mécaniquement le salissement en interculture des parcelles à précédent.	45
Figure 18 Répartition des stratégies de travail du sol par classe de taille des exploitations (% de surface)	46
Figure 19 Répartition des tailles d'exploitation par stratégie de travail du sol (% de surface)	47
Figure 20 Parts de surface de grandes cultures par stratégie de travail du sol selon les enquêtes PK-GC de 2011, 2014 et 2017.....	52
Figure 21 Parts de surface de grandes cultures non labourées avant les semis selon les enquêtes PK-GC de 1994, 2001, 2006, 2011, 2014 et 2017	53
Figure 22 Rôle des interventions mécaniques et des traitements herbicides chimiques sur le contrôle des adventices et gestion de l'état du sol.....	57

Table des Tableaux

Tableau 1 : Pourcentage de surfaces avec utilisation et doses moyennes de glyphosate appliquées.....	18
Tableau 2 : Grammage moyen appliqué selon les différentes cibles listées dans l'enquête PK_GCP-2017	19
Tableau 3 Pourcentage de surface avec utilisation de glyphosate en culture par rapport à la surface avec utilisation de glyphosate et par rapport à la surface cultivée par culture.....	23
Tableau 4: Part de surface traitée au glyphosate (%) selon la taille de l'exploitation et la stratégie de travail du sol	42
Tableau 5: Répartition des surfaces traitées au glyphosate selon la taille de l'exploitation et la stratégie de travail du sol	42
Tableau 6: Part de surface des sols très caillouteux ou/et superficiels par classe de taille de SAU des exploitations et/ou stratégie de travail du sol	44
Tableau 7 : Scénario général de référence.....	62
Tableau 8 : Profils moyens des interventions de désherbage et de travail du sol par stratégie de travail du sol	63
Tableau 9 : Scénario général de référence « extrême ».....	64
Tableau 10 : Scénario spécifique pour les parcelles non labourées.....	65

Tableau 11 Taille des sous-échantillons de parcelles avec glyphosate repérées comme étant potentiellement en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate	94
Tableau 12 Effets moyens estimés du scénario général référence sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Cas des parcelles avec traitement(s) au glyphosate, par type de stratégie de travail du sol	96
Tableau 13 Relations en la stratégie de travail du sol, l'utilisation de glyphosate en inter-culture et la perception des agriculteurs de la pression adventice sur leurs parcelles	99
Tableau 14 Effets moyens estimés et supposés du scénario général référence sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Cas des parcelles sans traitement au glyphosate, par type de stratégie de travail du sol	101
Tableau 15 Effets moyens estimés du scénario général référence sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol.....	103
Tableau 16 Surcoûts moyens estimés dans le scénario général référence pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol.....	106
Tableau 17 Coûts moyens par hectare d'une intervention, par type d'intervention et selon la taille de SAU	107
Tableau 17 Coûts moyens par hectare d'une intervention, par type d'intervention et selon la taille de SAU (suite)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 18 EBE/ha moyens, sur la période 2009–2018, des exploitations spécialisées dans la production de grains, par grande région française	113
Tableau 19 Part des surcoûts moyens estimés dans le cadre de notre scénario général de référence du retrait du glyphosate et des EBE/ha moyens sur la période 2009–2018 des exploitations spécialisées dans la production de grains, par grande région française	114
Tableau 20 Analyse de la sensibilité des surcoûts moyens estimés au niveau des charges de mécanisation et de main d'œuvre.....	115
Tableau 21 Surcoûts moyens estimés dans le scénario général référence « extrême » pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol.....	116
Tableau 22 Surcoûts moyens estimés dans le scénario « spécifique pour les parcelles sans labour » pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol	118

Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation des impacts économiques

Introduction :

Court rappel commenté de la commande

Le 22 juin 2018, le gouvernement a présenté un plan d'action pour la sortie du glyphosate qui a pour objet de réduire au maximum les utilisations de produits contenant du glyphosate dans un délai de 3 ans. Dans le cadre de ce plan, les ministres chargés de l'agriculture, de l'écologie, de la recherche et de la santé ont saisi l'ANSES afin notamment qu'elle effectue, sur la base de l'article 50.2 du règlement (CE) n°1107/2009, une évaluation comparative des alternatives aux usages des produits à base de glyphosate actuellement autorisés en France.

La sortie du glyphosate mobilise le règlement européen n°1107/2009, qui stipule que le retrait d'une AMM pour une molécule autorisée au niveau européen est possible par un Etat membre s'il existe une ou plusieurs méthodes alternatives, chimiques ou non chimiques, de prévention ou de lutte pour la même utilisation et si elles sont d'usage courant, ceci a priori sans impact environnemental et sans impact économique majeur.

Au regard du champ des missions de l'ANSES, les ministres chargés de l'écologie et de l'agriculture ont saisi INRAE pour qu'il contribue, s'agissant des usages agricoles, à identifier les alternatives non chimiques aux usages des produits à base de glyphosate et à estimer l'impact économique de ces pratiques en grandes cultures.

Le choix a été fait, en accord avec les commanditaires de ce cette saisine et avec l'ANSES, de se focaliser sur les alternatives non-chimiques au glyphosate.

Contexte

Le glyphosate est le premier herbicide utilisé dans le monde (www.epa.fr) et en France (BNV-D). Son autorisation de commercialisation sur le marché européen et français est aujourd'hui remise en question, pour diverses raisons environnementales et de santé publique. Le présent rapport ne traite pas des liens avec la santé publique ou l'environnement qui justifieraient ou non de bannir le glyphosate à plus ou moins longue échéance. Il se focalise sur l'identification des principaux usages actuels du glyphosate en France, les alternatives non chimiques identifiables et la définition des impacts pratiques et économiques de la mise en œuvre de ces alternatives pour les grandes cultures. L'autorisation européenne, approuvée par la commission européenne en décembre 2017 pour cinq ans, court actuellement jusqu'au 15 décembre 2022. Le gouvernement Français a annoncé que la France sortirait de l'usage du glyphosate en 3 ans, pour la majorité des usages du glyphosate. Depuis le 1^{er} janvier 2019, la commercialisation et la détention de produits à base de glyphosate à usage non professionnel est interdite en France.

Objectif

Le premier objectif de l'étude est d'identifier les alternatives non-chimiques à l'utilisation du glyphosate en grandes cultures. Notre travail s'est appuyé sur une analyse de la littérature scientifique et professionnelle traitant de ce sujet, et en particulier sur le rapport d'expertise de Reboud *et al* (2017), sur l'article de synthèse de Labreuche *et al* (2018) ainsi que sur le document de synthèse publié

par la Cellule d'Animation Nationale du Réseau DEPHY Ferme (CAN DEPHY Ferme, 2018). Nous avons également bénéficié de la contribution des experts des Instituts Techniques Agricoles des filières de grandes cultures. Nous avons considéré la mise en œuvre des alternatives au glyphosate dans les exploitations, non seulement selon un point de vue agronomique, mais également sous un angle économique et organisationnel.

Le second objectif de l'étude est d'estimer les surcoûts qui seraient ou pourraient être subis par les agriculteurs utilisateurs de glyphosate en cas de retrait de cet herbicide. Conformément au cahier des charges de l'étude, l'approche que nous avons retenue s'appuie sur les données de l'enquête « Pratiques culturales sur les grandes cultures et prairies » de la campagne 2017 (PK-GCP_2017), complétées par : *i*) les caractéristiques des sols de la typologie d'Arvalis employée dans cette enquête (Arvalis, 2017), *ii*) les données fournies par les barèmes d'entraide pour les coûts des interventions (APCA, 2018), *iii*) l'enquête conduite en juillet 2019 par les instituts techniques agricoles auprès des agriculteurs, *iv*) les données sur les prix des pesticides qui nous ont été fournis par la cellule d'animation du réseau national DEPHY et l'EPCIA, et enfin *v*) les données du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA).¹

Les données de PK-GCP_2017 nous permettent de caractériser les pratiques de travail du sol et de désherbage, dont l'utilisation de glyphosate, pour 17 grandes cultures en France métropolitaine. L'échantillon que nous utilisons pour nos évaluations est composé de 17342 parcelles de grandes cultures conduites selon un mode de production conventionnel. Cet échantillon est représentatif d'une superficie de 11,3 millions d'hectares qui couvre 90,4 % de la surface de grandes cultures, hors agriculture biologique, lors de la campagne 2017.

Périmètre de l'évaluation des effets du retrait du glyphosate

L'utilisation du glyphosate est autorisée en inter-culture et pour un nombre limité d'usages en culture. Les données de l'enquête PK-GCP_2017 montrent que 98% des traitements au glyphosate sont mis en œuvre durant l'inter-culture pour contrôler les adventices, les couverts d'inter-culture (*e.g.*, CIPAN, cultures dérochées) ou/et les repousses de précédents culturaux. Notre évaluation des effets du retrait du glyphosate ne concerne que ses usages en inter-culture.

L'usage de glyphosate pour dessiccation est interdit depuis décembre 2019. La filière lin s'est engagée dans une démarche de recherche de solutions alternatives à l'utilisation du glyphosate pour le rouissage.

Les filières de production de semences certifiées (cultures porte-graines) sont particulièrement concernées par le retrait du glyphosate. D'une part, le contrôle des adventices est une préoccupation majeure pour la production de semences en raison des exigences de pureté des récoltes des grains destinés à être utilisés en tant que semences. D'autre part, ces filières bénéficient d'autorisation d'usages de glyphosate en culture. La production de semences certifiées fait l'objet d'une analyse qualitative dans ce rapport.

¹ Les données mobilisées sont décrites dans l'Annexe A.

Nature des surcoûts évalués

Le travail du sol contribuant au contrôle des adventices, les producteurs de grandes cultures ont d'autant moins recours au glyphosate qu'ils travaillent leurs sols. Cette relation entre travail du sol et utilisation de glyphosate a été mise en évidence par Reboud et al (2017), elle est confirmée par notre analyse des données de l'enquête PK-GCP_2017. Le retrait du glyphosate inciterait la plupart des agriculteurs à modifier leurs pratiques de désherbage et de travail du sol.

Tout changement de pratique comporte une phase de transition, plus ou moins longue, de l'ancienne vers la nouvelle pratique. Durant cette phase, les agriculteurs expérimentent la nouvelle pratique et adaptent les modalités de sa mise en œuvre aux conditions prévalant sur leur exploitation. En cas de succès, cette phase de transition est suivie d'une phase d'utilisation maîtrisée de la nouvelle pratique.

Les surcoûts que nous estimons ne concernent que la phase d'utilisation maîtrisée des nouvelles pratiques. Plus spécifiquement, ce que nous nommons surcoûts correspond aux différences entre les coûts des pratiques (maîtrisées) de contrôle des adventices sans glyphosate par rapport à ceux des pratiques actuelles, ces dernières pouvant plus ou moins s'appuyer sur des traitements au glyphosate.

Les coûts spécifiques de la transition des changements de pratique qui pourraient être induits par un retrait du glyphosate sont discutés de manière qualitative, de même que les contraintes d'ajustement qui peuvent ralentir la transition ou la rendre plus coûteuse.

Nos estimations de coûts portent sur l'ensemble des coûts des interventions de désherbage et de travail du sol (*e.g.*, pulvérisation d'herbicides, labour, binage, broyage de couverts). Nous estimons (*i*) les dépenses d'herbicides, (*ii*) les consommations en carburant et les besoins de main d'œuvre de l'ensemble des interventions et (*iii*) les charges de mécanisation de l'ensemble des interventions. Ces charges de mécanisation sont définies comme la somme des charges d'investissement, d'amortissement et d'entretien des équipements (*e.g.*, tracteurs, charrues, herses, pulvérisateurs) telles que ces charges ont été calculées par l'APCA (APCA, 2018). Lorsque nécessaire, nous avons adapté nos estimations de coûts à la taille des exploitations (*e.g.*, pour le dimensionnement de la puissance des tracteurs et de la taille des outils) et à la pierrosité des sols (*e.g.*, pour les charges d'entretien des outils de travail du sol). Toutes nos mesures de coûts sont annualisées et rapportées à l'hectare.

Architecture générale de la démarche d'évaluation des surcoûts du retrait du glyphosate

Les choix des agriculteurs en matière de désherbage sont très liés à leurs choix en matière de travail du sol. En outre, ces deux types de choix relèvent d'une logique pluriannuelle et dépendent de nombreux facteurs. Ces derniers sont relatifs aux caractéristiques pédoclimatiques des parcelles, aux types d'inter-cultures, à la structure et au système de cultures de l'exploitation et, bien entendu, à la pression adventice sur les parcelles.

Compte-tenu des données à notre disposition et des connaissances établies sur les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol, nous avons construit des scénarios crédibles quant aux choix de pratiques alternatives au glyphosate et estimé les effets de ces scénarios.

Notre approche d'évaluation consiste en la combinaison deux éléments : la conception de scénarios et l'utilisation de méthodes d'évaluation statistiques des effets des scénarios conçus. Nos scénarios « imposent » des stratégies de travail du sol aux agriculteurs choisies parmi celles de la typologie établie par Reboud *et al* (2017) : semis direct, techniques culturales simplifiées, labour occasionnel,

labour fréquent et labour systématique. Nous estimons ensuite, par des méthodes statistiques, le choix que feraient les agriculteurs en cas de retrait du glyphosate concernant les interventions de désherbage et de travail du sol dans les limites définies par la stratégie de travail du sol considérée.

Conception des scénarios : le travail du sol en tant que principale alternative au glyphosate

Schématiquement, nos scénarios consistent à « forcer » les agriculteurs à adopter des stratégies de travail du sol suffisamment intenses pour contrôler les adventices sans glyphosate, tout au moins pour ceux qui n'emploient pas déjà ces stratégies. Pour ces derniers, nos scénarios consistent simplement à leur retirer l'option du glyphosate pour le désherbage.

La conception de nos scénarios repose sur deux hypothèses principales. (a) Intensifier suffisamment la stratégie de travail du sol permet de contrôler efficacement les adventices sans glyphosate. Cette hypothèse est cohérente avec les faits observés. Par exemple, les agriculteurs qui labourent fréquemment leurs sols ont très peu recours au glyphosate. Nombre d'entre eux n'en utilisent pas, à l'instar des agriculteurs qui conduisent leurs cultures en agriculture biologique. (b) Notre seconde hypothèse est que les agriculteurs seraient en mesure de contrôler les adventices sans glyphosate en adoptant des stratégies de travail du sol relativement intenses. Cette hypothèse est également cohérente avec les faits observés, pour la même raison. Les agriculteurs qui seraient contraints d'adopter des stratégies de travail du sol relativement intenses ne feraient qu'adopter des pratiques déjà utilisées par des agriculteurs qui utilisent peu ou pas de glyphosate (et que beaucoup mettaient en œuvre jusqu'à un passé plus ou moins récent).

De ces deux hypothèses découlent deux éléments importants pour l'évaluation des effets de nos scénarios. (a) Dès lors qu'un travail suffisamment intense du sol permet de contrôler les adventices sans glyphosate, aucune perte de rendement significative n'est attendue dans nos scénarios. Les expertises publiées sur le sujet n'évoquent pas l'éventualité d'un « défaut généralisé » de contrôle des adventices en cas de retrait du glyphosate (e.g., Reboud et al, 2017 ; Labreuche *et al*, 2018). Les pertes de rendements évoquées dans ces expertises sont ponctuelles. Elles sont la conséquence de retards de semis ou de lits de semence dégradés dus à des interventions de travail du sol décalées ou réalisées dans de mauvaises conditions. Les questions soulevées par le contrôle des flores adventices « difficiles », comme celles composées de vivaces ou d'espèces résistantes aux herbicides en culture, font l'objet d'une analyse spécifique dans notre étude mais ne remettent pas en cause notre hypothèse d'absence de perte significative de rendement en cas de retrait du glyphosate. (b) De la même manière, aucun changement d'assolement significatif n'est attendu dans nos scénarios. Supposer qu'un travail du sol adapté permet de contrôler les adventices sans glyphosate permet de définir des scénarios crédibles de retrait du glyphosate sans modification d'assolement. Ceci ne remet en cause, ni l'intérêt de la diversification des rotations pour le contrôle prophylactique des adventices, ni l'intérêt de la diversification des assolements pour éviter les pics de travail, notamment ceux liés au travail du sol. De fait, la mise en œuvre ces stratégies de diversification pourrait permettre aux agriculteurs de diminuer les surcoûts liés au retrait du glyphosate en deçà de ceux estimés dans cette étude.

Nos scénarios ignorent également l'intérêt des couverts d'inter-culture pour le contrôle des adventices. Il s'agit d'une conséquence de ce que l'implantation de couverts d'inter-culture est obligatoire dans certaines zones et pas dans d'autres, de même que la destruction chimique de ces couverts est autorisée dans certaines zones et pas dans d'autres. Notre méthode d'évaluation des effets de nos scénarios s'accommode difficilement de ce type de situation, sauf à considérer la

présence ou l'absence d'un couvert comme une caractéristique des inter-cultures, ce que nous avons fait. Les conditions pédoclimatiques qui justifient certaines autorisations de destruction chimique, réalisées essentiellement au glyphosate, des couverts d'inter-culture sont prises en compte dans la méthode d'évaluation des effets de nos scénarios.

Notre évaluation s'articule autour d'un « scénario de référence ». Nous définissons également deux scénarios alternatifs de sorte à analyser la sensibilité des résultats obtenus pour le scénario référence. Le scénario de référence suppose que les parcelles en semis direct, techniques culturales simplifiées ou labour occasionnel passent en labour fréquent en cas de retrait du glyphosate. Dans ce scénario, les parcelles en labour fréquent restent en labour fréquent et celles en labour systématique restent en labour systématique. Ce scénario a été choisi en tant que scénario de référence parce que les exploitations pratiquant des systèmes à labour fréquent sont nombreuses, utilisent très peu de glyphosate et ont des caractéristiques très variées, ce qui implique que les stratégies de travail de sol avec labour fréquent sont des stratégies qui peuvent être mises en place sur la plupart des exploitations et permettre de contrôler les adventices de manière satisfaisante sans glyphosate. Il est probable que les agriculteurs actuellement en travail du sol réduit adopteraient des stratégies de travail du sol moins coûteuses que celles à labour fréquent en cas de retrait du glyphosate.

Evaluation des effets des scénarios : méthode statistique employée

Nous mesurons les effets de nos scénarios sur un ensemble de sept groupes de choix techniques :

- IFT des herbicides avec et sans glyphosate,
- Nombre d'interventions mécaniques sur les couverts d'inter-culture,
- Nombre des interventions de travail du sol très superficiel, superficiel et profond sans retournement,
- Nombre de labours

ainsi que les coûts des évolutions des interventions considérées :

- Dépenses d'herbicides avec et sans glyphosate,
- Coûts de main d'œuvre, en h/ha et €/ha,
- Coûts de carburant, en l/ha et €/ha,
- Coûts de mécanisation, avec une décomposition entre outils et tracteurs, en €/ha.

Nous estimons les effets de nos scénarios en moyenne pour les sous-populations d'agriculteurs définies par les stratégies de travail sol. Dans l'exemple de notre scénario général de référence, nous estimons les effets de passer à une stratégie de travail du sol avec labour fréquent sans glyphosate pour les agriculteurs conduisant leurs parcelles en semis direct, pour ceux les conduisant en techniques culturales simplifiées et pour ceux labourant occasionnellement leurs parcelles. Nous estimons également les effets du retrait du glyphosate pour les agriculteurs que nous supposons rester en stratégie de travail du sol avec labour fréquent et pour ceux que supposons continuer à labourer systématiquement leurs sols. L'effet d'un scénario est défini par la différence entre ce que feraient les agriculteurs dans le scénario considéré et ce qu'ils font actuellement.

L'approche statistique usuelle pour la mesure des effets de nos scénarios consisterait à estimer les choix moyens des agriculteurs « forcés » d'adopter une stratégie de travail du sol sans glyphosate donnée à partir des choix moyens des agriculteurs qui mettent déjà en œuvre cette stratégie de travail du sol sans glyphosate. Ces moyennes seraient calculées pour un ensemble de conditions types qui

seraient pertinentes pour le désherbage et le travail du sol en grandes cultures. Considérer des cas types permet, de manière intuitive, de ne « comparer que ce qui est comparable ». Cette approche a été employée pour estimer les effets du retrait du glyphosate dans le cas de la vigne (Jacquet *et al*, 2019a) et de l'arboriculture (Jacquet *et al*, 2019b).

Cette approche est impossible à mettre en œuvre dans le cas des grandes cultures car les combinaisons potentiellement pertinentes de conditions pédoclimatiques, de niveaux de pression adventice, de configurations d'inter-culture et de structures d'exploitation sont potentiellement extrêmement nombreuses. Nos estimations statistiques des surcoûts mobilisent 16 variables discrètes – qualitatives ou quantitatives par intervalles – expliquant potentiellement les choix des agriculteurs, pour un total de 75 modalités.

Afin de contourner ce problème nous avons employé une méthode statistique permettant d'estimer les choix moyens des agriculteurs « forcés » d'adopter une stratégie de travail donnée à partir des choix observés des agriculteurs qui mettent déjà en œuvre cette stratégie tout en employant, de manière simultanée et en tenant compte d'effets d'interaction, les 16 variables dont nous disposons pour contrôler les effets des conditions pédoclimatiques, des configurations d'inter-culture, de la pression adventice et de la structure des exploitations. Cette méthode, dite de pondération par les scores de propension, est couramment employée en statistique médicale, pour l'évaluation des effets de traitements médicaux, et en économétrie, pour l'évaluation des effets de politiques publiques (*e.g.*, Imbens et Wooldridge, 2015, Li, Morgan et Zaslavsky, 2018).

La taille très importante de l'échantillon de parcelles de l'enquête PK-GCP_2017 et la richesse de l'information que cette enquête collecte sur les pratiques des agriculteurs et sur les conditions de mise en œuvre de ces pratiques nous permettent d'obtenir des estimations très précises et très informatives des effets de nos scénarios.

Cette méthode a par ailleurs l'avantage de permettre d'identifier, selon des critères statistiques, des agriculteurs potentiellement en situation « délicate » en cas de retrait du glyphosate. Il s'agit des agriculteurs utilisateurs de glyphosate dont les conditions d'exploitation sont telles qu'il n'existe pas, ou très peu, d'agriculteurs qui n'utilisent pas de glyphosate dans des conditions « statistiquement équivalentes ».

Plan du rapport

Ce rapport est organisé comme suit. La première partie présente la photographie des usages de glyphosate en grandes cultures en France métropolitaine. La seconde partie présente les alternatives au glyphosate et discute leurs avantages et leurs limites. Le cas de l'agriculture de conservation des sols, actuellement très dépendante de l'utilisation de glyphosate, fait ici l'objet d'une attention particulière. La seconde partie analyse, à partir de statistiques descriptives, deux aspects de l'utilisation de glyphosate en inter-culture : ses relations avec la stratégie de travail du sol et l'utilisation des herbicides en culture d'une part, et les caractéristiques des parcelles et des exploitations impactant son utilisation d'autre part. Nous portons ici une attention particulière à la taille des exploitations. Les questions soulevées par la phase de transition des changements de pratique qui seraient induits par le retrait du glyphosate sont discutées dans la quatrième partie. Notre approche d'évaluation des surcoûts liés au retrait du glyphosate est présentée en détail dans la cinquième partie. Enfin, la dernière partie présente nos estimations des effets économiques du retrait du glyphosate.

1. Usages généraux du glyphosate en France

1.1 Spécificités et caractéristiques du glyphosate

a. Un herbicide foliaire, systémique et non sélectif unique

Le glyphosate est une substance active agissant en tant qu'herbicide foliaire, systémique et total. Il est absorbé par les feuilles et circule ensuite dans toute la plante, des parties aériennes jusqu'aux parties souterraines. Il affecte ainsi la plante entière, pouvant aboutir à destruction selon la dose appliquée. Son mode d'action (groupe HRAC G, voir Annexe B) agit sur l'avant-dernière étape de la voie de synthèse de l'acide shikimique qui produit le chorismate et conduit aux acides aminés aromatiques : phénylalanine, tyrosine et tryptophane (Expertise scientifique collective de l'Inra sur les variétés tolérantes aux herbicides, 2011). Le glyphosate inhibe l'avant-dernière enzyme de cette voie métabolique, l'enzyme EPSP synthase (énol-pyruvyl-shikimate 3-phosphate synthase) qui catalyse la condensation du shikimate-3-phosphate et du phosphoénolpyruvate en 5-énol-pyruvyl-shikimate-3-phosphate. Le glyphosate se fixe sur le site actif du phosphoénolpyruvate carboxylase et exerce une inhibition compétitive.

Son caractère d'herbicide total fait référence à son large spectre d'action, le glyphosate affecte la quasi-totalité des espèces végétales. Les herbicides systémiques à large spectre sont peu nombreux et le glyphosate est la seule substance active commercialisée qui cible la 5-énolpyruvyl-shikimate-3-phosphate synthase (EPSPS).

Hors de toute considération sur les effets en matière de santé et d'environnement (toxicité, écotoxicité, génotoxicité) engendrés par un potentiel usage massif et généralisé, son large spectre d'action, son absorption foliaire et sa translocation jusqu'aux parties souterraines des plantes cibles font du glyphosate un herbicide à l'efficacité prouvée contre tous types d'adventices, en adaptant la dose requise. Il contribue de fait à limiter l'apparition de résistances des adventices aux herbicides dans la rotation (Labreuche et al, 2019). En cas d'un usage généralisé et massif, comme dans les situations de rotations avec des cultures de variétés OGM résistantes au glyphosate, de nombreuses espèces résistantes au glyphosate apparaissent.

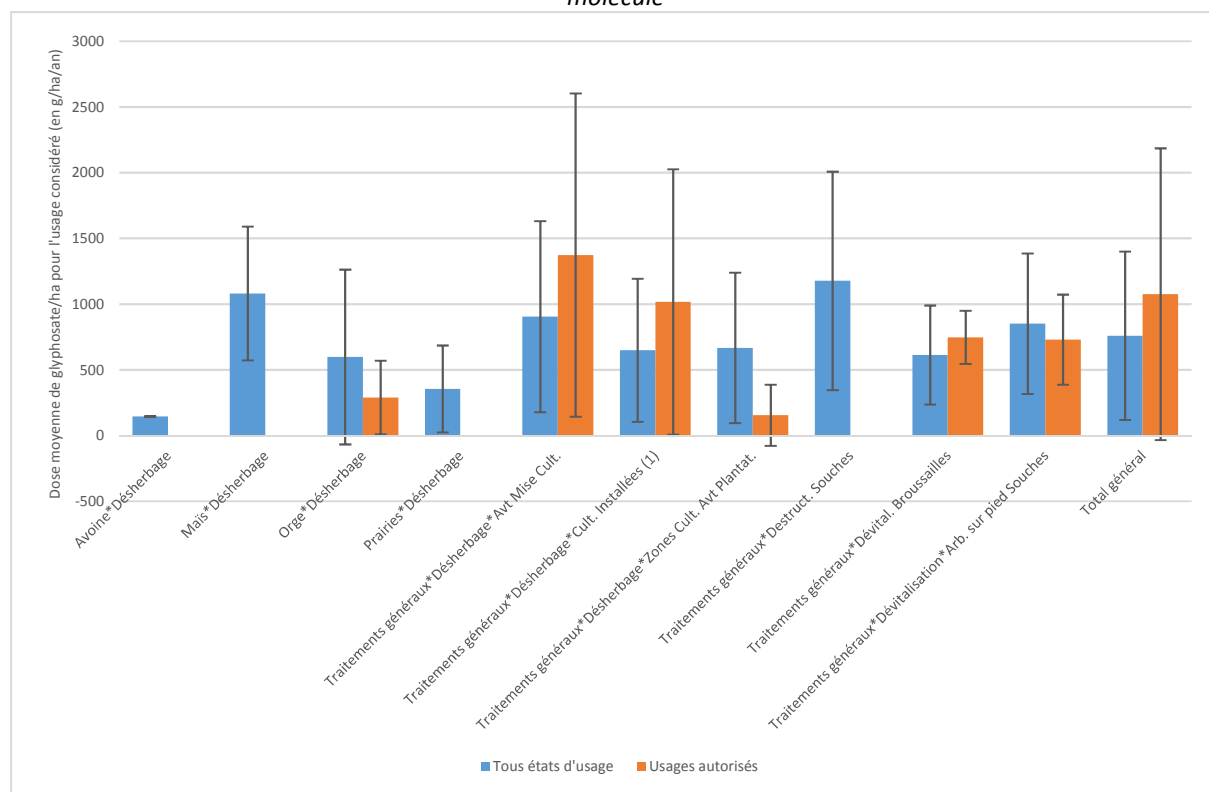
Le glyphosate a été breveté et commercialisé en tant qu'herbicide à partir de 1974 par l'entreprise Monsanto. L'expiration du brevet, tombé dans le domaine public en 2000 et la fabrication par la suite de nombreux génériques à base de glyphosate pour répondre aux usages en cultures et en inter-culture ont exercé une pression globale à la baisse sur les prix des produits à base de glyphosate (Benbrook, 2016). Au niveau mondial, les usages en culture n'ont pas cessé d'augmenter depuis la création à partir de 1996 de cultures génétiquement tolérantes au glyphosate. En 2008, près de 90% des cultures transgéniques cultivées dans le monde étaient tolérantes au glyphosate (Duke et Powles, 2008) ce qui contribue à des utilisations importantes de spécialités commerciales à base de glyphosate à travers le monde. Le glyphosate étant commercialisé mondialement, le prix des produits à base de glyphosate est relativement faible ce qui contribue à son faible coût. En France, son prix a également diminué ; d'après les bases de données utilisés (Dephy-Agrosyst/ EPCIA), le prix moyen est actuellement inférieur à 10€/ha.

La dose unitaire de glyphosate est spécifique à chaque produit commercial et chaque usage. Il y a 11 usages du glyphosate autorisés (base de données E-phy de l'ANSES disponible en ligne). La base contient l'ensemble des produits dont certains sont aujourd'hui interdits.

Le Figure 1 présente la dose moyenne en grammes de glyphosate à l'hectare pour chacun des usages recensés (extraction février 2020), en distinguant les produits/usages autorisés aujourd'hui et l'ensemble des produits répertoriés dans la base.

Ce sont les usages en inter-culture qui sont majoritairement mobilisés par les agriculteurs en grande culture. Ils sont représentés sur l'histogramme par les usages traitements généraux*désherbage* avant mise en culture (Tr_gén*Désh*Avt Mise Cult.) et traitements généraux*désherbage*Zones cultivées avant plantation (Tr_gén*Désh*Zones Cult.Avt Plantat.). Ces usages comportent des doses spécifiques pour la flore annuelle, vivaces voire bisannuelles ce qui explique la variabilité des doses unitaires représenté ci-dessous par les barres d'écart-type.

Figure 1: Dose moyenne en grammes de glyphosate à l'hectare pour chacun des usages existant pour cette molécule



b. Données mobilisées

Les données mobilisées sont issues de l'enquête sur les « pratiques culturales sur les grandes cultures et prairies » portant sur la campagne culturale 2016-2017 conduite par le Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère en charge de l'agriculture (PK-GCP_2017). L'échantillon total est constitué de 27 958 parcelles culturales. Cette enquête permet d'identifier l'itinéraire technique de 17 grandes cultures annuelles (blé tendre, blé dur, orge, triticale, colza, tournesol, pois protéagineux, maïs fourrage, maïs grain, betterave sucrière, pomme de terre, féverole, soja, lin fibre, lin oléagineux, mélange de céréales et mélange avec protéagineux) ainsi que des prairies permanentes, temporaires et mélanges fourragers. Ces cultures sont réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain et l'échantillon est représentatif de la superficie totale des cultures considérées.

L'enquête PK-GCP_2017 renseigne notamment sur les herbicides utilisés (produits commerciaux). Les usages et les doses des substances actives dans les spécialités commerciales à base de glyphosate sont identifiés par l'utilisation des données réglementaires de l'ANSES (Ephy)² qui délivre les autorisations de mises sur le marché (AMM) des spécialités commerciales.

Toutes les sources de données sont présentées dans l'Annexe A.

Toutes les statistiques présentées dans ce rapport, hors indication contraire, sont calculées en pondérant chaque parcelle par la surface dont elle est représentative.

1.2 Usages du glyphosate en grandes culture en France : quelques données de cadrage

a. Surfaces d'application

Selon l'enquête PK-GCP_2017, le pourcentage de surface de grandes cultures et de prairies recevant du glyphosate s'élève à 11.5 %. Hors prairies temporaires, permanentes et mélange fourrager, 18.9% des surfaces de grandes cultures ont reçu du glyphosate. Lorsqu'il est utilisé, le glyphosate est appliqué en grande majorité une seule fois sur la campagne culturale.

L'utilisation sur grandes cultures annuelles en France est plus fréquente dans une bande Sud-Ouest / Nord-Est, où le pourcentage de surface en grandes cultures annuelles varie entre 17-30% et 30-40%. Les parts de surfaces de grandes cultures traitées au glyphosate sont les plus importantes dans les anciennes régions administratives Centre et Lorraine, caractérisées par des exploitations de grandes tailles.

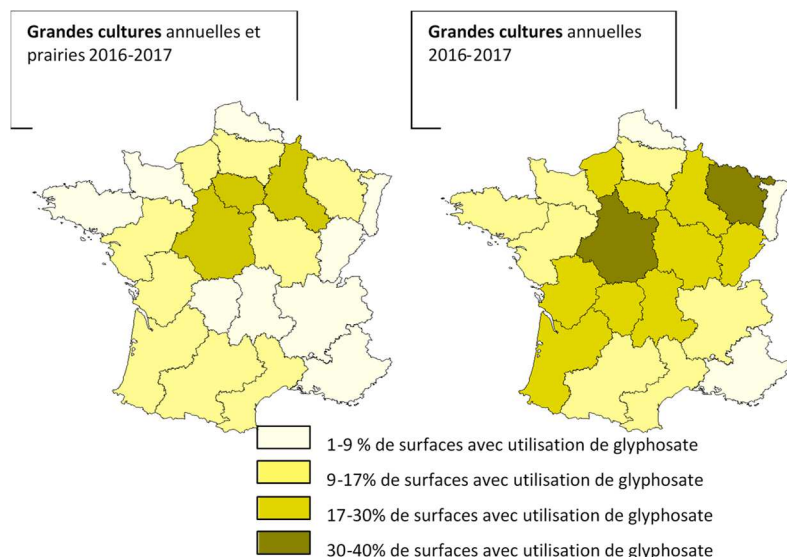


Figure 2 Parts de surfaces traitées au glyphosate par anciennes régions administratives

Note : Cultures annuelles et prairies à gauche ; Cultures annuelles à droite, avec utilisation de glyphosate au cours de la campagne culturale 2016-2017, Source : PK-GCP 2017, calculs des auteurs, Figure de gauche 27958 parcelles, figure de droite 22708 parcelles.

² Source : Ephy via data.gouv, l'extraction des données a été réalisée en septembre 2019. Les données des pratiques culturales portent sur la période culturale 2016/2017. Les spécialités commerciales retirées depuis notre extraction n'influencent pas notre analyse.

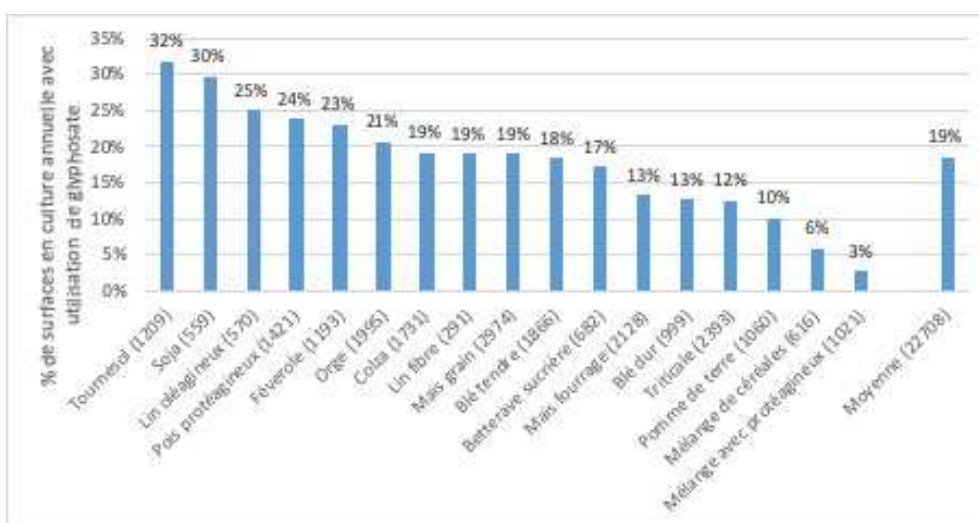


Figure 3 Pourcentage de surface en grandes cultures annuelles avec utilisation de glyphosate en 2016-2017, selon la culture à venir (nombre de parcelles entre parenthèses).

La Figure 3 donne les parts de surface des différentes grandes cultures traitées au glyphosate avant implantation. Ces parts varient de 32%, pour les surfaces de tournesol, à 10% pour celles de pomme de terre. Les surfaces de mélanges de céréales et de mélanges de céréales et de protéagineux sont peu traitées.

b. Doses et cibles d'applications

Pour l'ensemble des grandes cultures annuelles, la dose moyenne appliquée par parcelle recevant du glyphosate est de 824 grammes/ha, soit 2.3 l/ha pour une spécialité commerciale dont la concentration en glyphosate est de 360g/l. La dose moyenne appliquée sur les prairies est de de 442 g/ha (Tableau 1), ce dosage plus faible s'expliquant par des applications localisées.

Tableau 1 : Pourcentage de surfaces avec utilisation et doses moyennes de glyphosate appliquées

	% de surfaces avec utilisation de glyphosate	Dose moyenne en g/ha par parcelle avec utilisation de glyphosate	Superficie extrapolée en millions d'ha en France métropolitaine
Grandes cultures	18.9%	832 g/ha	12.8
Prairies	0.5%	442 g/ha	8.6
Ensemble grandes cultures et prairies	11.5 %	824.5 g/ha	21.4

Source : PK CGP 2017, calculs des auteurs, N=27958

Il est difficile de préciser les cibles des utilisations de glyphosate, une pulvérisation pouvant avoir plusieurs cibles. Par exemple, une pulvérisation, visant à détruire un couvert d'inter-culture dans lequel des adventices sont présentes, cible à la fois la plante de couverture et les adventices.

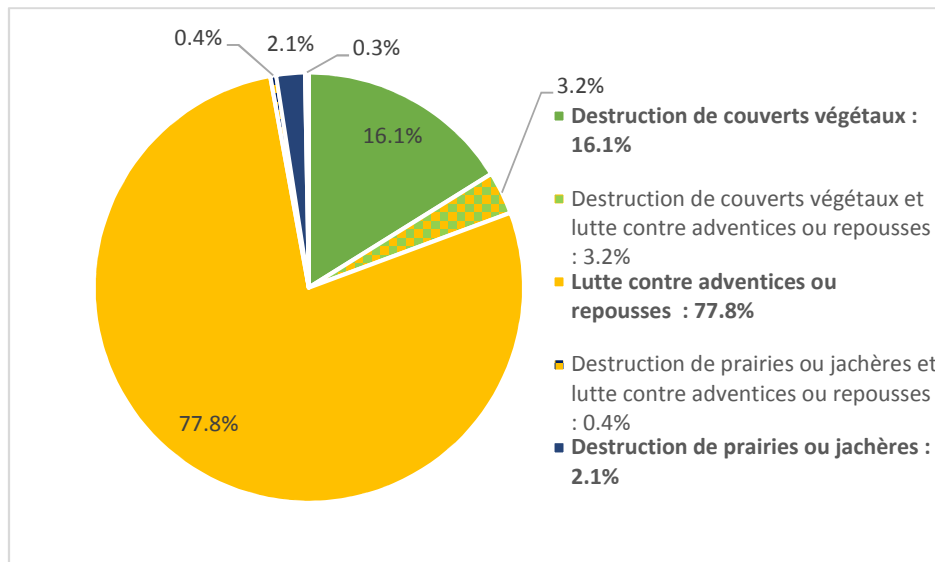


Figure 4 Cibles de l'usage du glyphosate en grandes cultures annuelles.
Source : PK CGP 2017, calculs des auteurs, N=27958

Le glyphosate est majoritairement utilisé pour lutter contre les adventices et/ou les repousses des cultures précédentes (81% des applications). La destruction de couverts végétaux est visée par 19.3% des applications et la destruction de prairies par 2.5% des applications (Figure 4).

Les doses moyennes d'utilisation du glyphosate diffèrent selon la cible visée par l'application, mais relativement peu (Tableau 2). En moyenne, 892 g/ha sont appliqués pour une destruction de prairies, 782 g/ha pour une destruction de couvert végétal d'inter-culture, 886 g/ha pour les applications ciblant les vivaces, 780 g/ha pour détruire des repousses de cultures et 773 g/ha pour détruire des adventices non vivaces.

Tableau 2 : Grammage moyen appliqué selon les différentes cibles listées dans l'enquête PK_GCP-2017

Cibles	Grammage moyen (g/ha)	Nombre de cibles*
Destruction du couvert	782.2	738
Destruction du précédent prairie ou jachère	891.8	100
Destruction des repousses du précédent	780.3	1583
Adventices-graminées annuelles	756.7	1117
Adventices-dicotylédones annuelles	770.2	833
Adventices-dicotylédones bisannuelles	745.2	181
Adventices-mélanges ou espèces inconnues	785.9	417
Adventices-vivaces	886.0	407

Source : PK CGP 2017, calculs des auteurs, N=27958.

* Note : 5376 déclarations de cibles pour 3821 applications de glyphosate. Les moyennes sont établies à partir des cibles d'applications de glyphosate, les applications pouvant concerner une seule ou plusieurs cibles. 738 indique que 738 applications de glyphosate ont ciblé la « destruction du couvert ».

c. Un usage en essentiellement en inter-culture

Toutes cultures confondues, 98% des 3821 applications de glyphosate repérées dans l'enquête PK-GC_2017 sont réalisées en inter-culture (Figure 5).

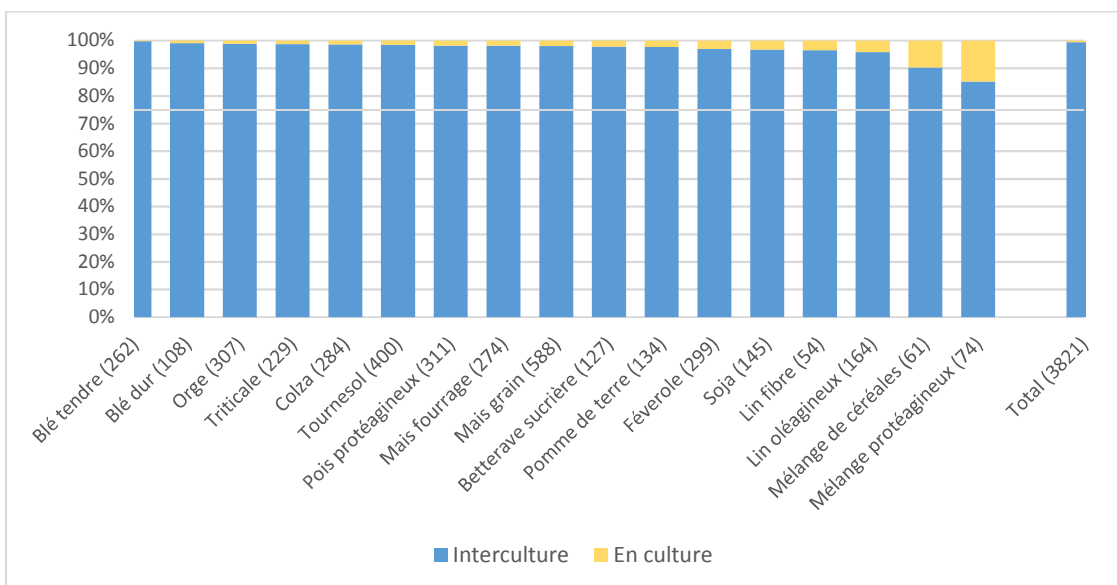


Figure 5 Périodes d'application du glyphosate selon la culture à suivre.
 Note : le nombre d'applications est précisé entre parenthèses.

1.3 Des usages essentiellement en inter-culture

Comme indiqué précédemment, il est difficile d'associer une ou plusieurs cibles à chaque application de glyphosate repérée dans les données de l'enquête PK-GCP_2017. Chaque utilisation de glyphosate peut avoir plusieurs cibles et peut être décidée pour des raisons tactiques – résoudre un problème ponctuel – ou/et stratégiques – pour éviter qu'un problème ne prenne de l'ampleur.

a. Préparation de la parcelle au semis

En inter-culture, le glyphosate sert à préparer la parcelle au semis de la culture à suivre en la nettoyant du couvert intermédiaire, des adventices et des éventuelles repousses des cultures précédentes jusqu'à 3 semaines en avance tout en s'assurant d'avoir une parcelle propre lors du semis.

Le glyphosate est utilisé pour moitié (54%) en pré-semis, *i.e.* entre 3 semaines avant le semis et le semis. L'autre moitié des applications a lieu entre la récolte de la culture précédente et 3 semaines avant le semis (après-récolte du précédent cultural).

b. La destruction de cultures développées

La destruction chimique des couverts végétaux (CIPAN ou cultures dérobées) est interdite en France, (Directive Nitrates) sauf pour les ilots en techniques culturales simplifiées ainsi que pour les parcelles destinées à des légumes, cultures maraîchères ou porte-graines (Annexe C). Elle est également autorisée en cas d'infestation généralisée par des adventives vivaces sous réserve d'une déclaration à l'administration. Une déclaration à l'administration n'est pas nécessaire en cas d'infestation par des ambrosies.

Le semis de couvert végétal obligatoire a été instauré depuis 2011 par la Directive Nitrates afin de réduire les pertes d'azote et d'autres nutriments par lixiviation lors de l'hiver. La présence de couvert

végétal présente d'autres avantages, tel qu'apporter de la matière organique aux sols et réduire le risque d'érosion pendant l'hiver. L'instauration de couverts végétaux a entraîné des modifications de pratiques en inter-culture. La gestion du couvert s'effectue dès la récolte, voire avant la récolte de la culture précédente, pour un semis sous couvert, jusqu'à la destruction du couvert.

La destruction du couvert végétal s'effectue plus ou moins tôt selon la culture suivante à semer. Une destruction tardive est propice à une augmentation de la biomasse et du rapport C/N du couvert alors qu'une destruction précoce permet une minéralisation du couvert en avance afin que celle-ci n'affecte pas le développement de la culture suivante. Plus la destruction sera tardive, plus le temps nécessaire pour détruire le couvert végétal et effectuer les passages mécaniques de préparation de la parcelle au semis sera court. Certains agriculteurs font le choix d'attendre au maximum afin d'avoir une plus forte biomasse de couverts à retourner au sol ou à récolter pour les dérobées. Ce choix peut s'accompagner d'une destruction par le glyphosate au regard du temps imparti pour les parcelles concernées par la dérogation.

Dans notre échantillon, l'usage de glyphosate pour détruire les couverts végétaux semés en inter-culture concerne 19.3% des applications de glyphosate. Mais moins de 9% des couverts végétaux ont été détruits de manière chimique. Plus de 88% des couverts sont détruits par des interventions mécaniques, la part restante étant détruite, par exemple, par l'action du gel.

La destruction des prairies par le glyphosate représente 2.5% des applications de glyphosate. Cet usage concerne principalement les parcelles en travail réduit du sol.

La destruction des prairies est en grande partie assurée par le labour dans les systèmes avec labour. Cependant, la destruction mécanique des prairies est parfois complétée par les utilisations de glyphosate. Le glyphosate peut être utilisé, de manière spécifique, avant la destruction mécanique de la prairie afin de l'affaiblir et de faciliter le travail mécanique. Le glyphosate peut également être utilisé après la destruction mécanique de la prairie pour gérer les repousses, en particulier si les conditions sont défavorables aux interventions de travail du sol. Cette utilisation du glyphosate n'est pas spécifique, le glyphosate étant utilisé pour gérer les repousses d'autres précédents culturaux (*e.g.*, colza, céréales à paille).

c. La régulation des couverts permanents

Les couverts permanents sont des leviers de gestion des adventices par leur effet de couverture du sol. Mais ces couverts doivent être régulés, voire détruits, afin que la culture semée sous couvert vivant, voire mort, puisse lever sans être étouffée. La régulation peut s'effectuer par fauches ou par application de glyphosate. L'application de glyphosate à dose réduite permet d'atténuer la reprise de croissance du couvert sans le détruire.

Le désherbage des couverts permanents n'est pas identifiable avec les données de l'enquête PK-GCP_2017.

d. Lutte contre les adventices « difficiles »

La lutte contre les adventices « difficiles » concerne la lutte contre les vivaces, les plantes invasives et plantes parasites. Les espèces « difficiles » apparaissent sur les bords de champs puis pénètrent les parcelles cultivées. Leur maîtrise est nécessaire et doit s'effectuer le plus tôt possible, en raison de leur capacité de multiplication souvent élevée et de la difficulté de détruire des plantes développées.

Par son large spectre de cibles, le glyphosate est la seule solution chimique contre certaines adventices « difficiles ». Ses seuls concurrents en inter-culture, le Dicamba et le 2.4D, ciblent les dicotylédones mais pas les graminées (Labreuche *et al*, 2019), et ils ont des profils toxicologiques et écotoxicologiques très défavorables.

Le glyphosate a également l'avantage d'être systémique, cette propriété étant particulièrement utile contre les adventices vivaces. En effet, en détruisant l'ensemble de la plante, le glyphosate empêche les plantes vivaces partiellement détruites de se développer par voie végétative à nouveau à partir d'organes restés indemnes.

L'utilisation de glyphosate participe à la gestion des adventices « difficiles » que ce soit en inter-culture par une pulvérisation sur l'ensemble de la parcelle ou en culture par des pulvérisations localisées.

La gestion des vivaces au sein des parcelles nécessite une attention particulière. Le glyphosate est particulièrement utile contre les adventices pluriannuelles car son mode d'action total conduit à la destruction de tous les organes de la plante. Cette action systémique est d'autant plus importante que les vivaces ont un faible taux annuel de décroissance (Annexe E) et une capacité de multiplication élevée. Les vivaces se multiplient par graines et surtout par multiplication de leurs racines et rhizomes. Le glyphosate peut notamment être utilisé en période de levée qui correspond à un stade de fragilité.

La gestion des plantes invasives, tel que l'ambroisie ou le datura, fait l'objet d'une gestion attentive, en raison de l'enjeu de santé publique que représentent ces plantes. Par exemple, le pollen d'ambroisie à feuilles d'armoise, émis de fin juillet à début octobre selon les conditions météorologiques, est très allergisant (Ministère des solidarités et de la santé). Le datura peut contaminer la chaîne alimentaire et provoquer des intoxications alimentaires par ingestion si ses graines contaminent la récolte, et ceci en raison de la scopolamine contenue dans les graines. Le tri des graines de datura est possible et facile pour les cultures aux graines de tailles différentes (*e.g.*, tournesol, maïs) mais est difficile pour les cultures aux graines de tailles similaires, telles que les cultures légumières ou le sarrasin (Reboud, 2020). Dans les champs, le développement végétatif luxuriant du datura le rend concurrentiel des cultures estivales, notamment des maïs, sojas, tournesols et productions maraîchères. Le datura a ainsi pu profiter de la monoculture de maïs et du déploiement des tournesols pour progresser depuis le Sud (Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Provence) jusqu'en Poitou-Charentes, Centre et Val-de-Loire. Son aire de répartition s'étend maintenant jusqu'en Picardie et Nord Pas-de-Calais (Reboud, 2020).

La gestion des plantes parasites, en particulier l'orobanche du trèfle ou du tournesol (*Orobanche cumana*), de certaines cultures légumières et du tabac peut faire l'objet d'un usage de glyphosate en inter-culture afin de couper le cycle du parasite et en culture.

Le glyphosate est ainsi un levier de prévention et de gestion de ces adventices coriaces.

1.4 Des usages très spécifiques en culture

Les 2% d'applications de glyphosate en culture concerne différents types de cultures mais représente une très faible part de la surface cultivée (voir Figure 5), moins de 0.7 % (Tableau 3).

Distinguer les différents usages du glyphosate en culture est difficile à partir des données de l'enquête PK-GCP_2017. Ces usages peuvent concerner des cultures porte-graines (production de semences certifiées), ces dernières n'étant pas identifiées comme telles dans les données. Ces usages peuvent

également être localisés, dans la parcelle cultivée ou à ses abords. Ces deux types d'applications ne peuvent être séparés dans les données.

En outre, la distinction entre usages sur des cultures spécifiques telles que les porte-graine et usages localisés est délicate. En effet, un examen simultané des grammages utilisés, des surfaces d'application et des dates d'application tend à montrer que les réponses portant sur les usages localisés prêtent à confusion. Les grammages reportés et les surfaces d'application révèlent fréquemment des incohérences.

Tableau 3 Pourcentage de surface avec utilisation de glyphosate en culture par rapport à la surface avec utilisation de glyphosate et par rapport à la surface cultivée par culture.

Groupe de Cultures annuelles	Part de surface avec utilisation de glyphosate en culture dans la surface avec utilisation de glyphosate par groupe de cultures	Part de surfaces avec utilisation de glyphosate en culture dans la surface cultivée par groupe de cultures
<i>Céréales à paille</i>	2.0%	0.4%
<i>Protéagineux</i>	4.9%	1.0%
<i>Oléagineux</i>	3.7%	0.7%
<i>Lin fibre</i>	8.6%	1.8%
<i>Pomme de Terre</i>	11.7%	1.2%
<i>Betterave sucrière</i>	0.2%	0.0%
<i>Mais grain</i>	0.8%	0.6%
<i>Mais fourrage et Tournesol</i>	1.2%	0.2%
Total	2.0%	0.7%

Source : PK-CGP_2017, calculs des auteurs, N=27958.

*0.0%=0.03%.

a. Contrôle des adventices par applications localisées

Le glyphosate peut être utilisé par applications localisées dans les parcelles, voire sur les bords de champ, lorsque la présence d'adventices « difficiles » est observée, de sorte à juguler leur développement.

b. Le désherbage de culture porte-graine en période de repos végétatif

Le glyphosate est également utilisé pour désherber les cultures porte-graines (production de semences certifiées) lorsque celles-ci sont en période de repos végétatif. Cet usage permet d'éviter un enherbement par les adventices qui lèvent dans cette période. Cette pratique est d'autant plus importante pour les producteurs de porte graines que la récolte de ces cultures doit respecter des seuils de pureté en adventices (Guérin, 2019).

Le désherbage de cultures porte-graine n'est pas identifiable avec les données de l'enquête PK-GCP_2017, ces dernières ne distinguant pas les cultures porte-graines des cultures « classiques ». En outre, certaines des cultures les plus concernées par l'usage du glyphosate considéré ici, comme la luzerne porte-graine, ne sont pas couvertes par l'enquête PK-GCP_2017.

c. Dessiccation

L'usage de glyphosate pour dessiccation, *i.e.* avant récolte à des fins d'assèchement des grains est interdite en France sur toutes cultures installées depuis décembre 2019 (Ephy). Les experts des ITA qui ont accompagné notre travail considèrent que l'utilisation du glyphosate pour la dessiccation des grandes cultures est quasi-inexistant en France.

d. Rouissage du lin

Le glyphosate est utilisé en culture lors du rouissage du lin fibre sur certaines parcelles (moins de 9% des surfaces en lin fibre avec utilisation de glyphosate), afin de gérer le verdissement et l'enherbement possible des fibres suite à l'arrachage du lin. Cette application dépend des conditions d'humidité lors de la période de rouissage.

La filière lin fibre s'est déjà engagée dans une démarche de recherche de solutions alternatives à l'utilisation de glyphosate pour le rouissage.

1.5. Le cas particulier de la production de semences

Les cultures de semences, malheureusement non identifiables dans PK-GCP_2017, font l'objet d'un usage de glyphosate, *a priori* plus élevé que les autres cultures. En effet, la production de semences doit répondre à des critères de pureté élevés des récoltes de grains (Guérin, 2019).

Le glyphosate est utilisé sur la parcelle cultivée, avant le semis de la culture pour la destruction des couverts et la destruction des adventives, mais également en culture pour la destruction localisée des adventives levées en culture. Le glyphosate est également employé sur les bords de champ pour éviter tout risque sanitaire provenant des bords de champs (Guérin, 2019).

Le glyphosate est donc utilisé sur les cultures de production de semences pour les mêmes raisons que sur les autres cultures. Mais, son efficacité, son faible coût et la facilité de son utilisation font du glyphosate un outil de désherbage très utilisé dans les cas où les exigences en matière de pureté des parcelles sont très élevées.

Sur les 118 producteurs de semences interrogés par la FNAMS en 2019, 12 envisagent d'abandonner la production de semences en cas de retrait du glyphosate, soit par crainte de ne pouvoir atteindre les niveaux requis de pureté des récoltes sans glyphosate, soit en raison du coût jugé prohibitif des alternatives au glyphosate pour atteindre ces niveaux de pureté (Guérin, 2019).

Il est cependant à noter que l'évolution de certaines technologies pourraient offrir, à plus ou moins court terme, des solutions aux problèmes évoqués ici. En effet, trier les grains après récolte permettrait de diminuer significativement les exigences en matière de désherbage au niveau de la production des semences tout en atteignant la même pureté spécifique finale. En outre, le fait que les volumes à trier soient limités tend à atténuer les questions liées à la lenteur des opérations de tri.

2. Les principales alternatives au glyphosate pour le contrôle des adventices, et leurs limites

Le reste de ce rapport ne porte que sur l'utilisation du glyphosate en inter-culture, cette dernière représentant 98% des utilisations de glyphosate observées dans l'enquête PK-GCP_2017.

Les principales alternatives directes à l'utilisation du glyphosate en inter-culture sont le travail du sol et l'utilisation d'autres herbicides chimiques. Ceux-ci peuvent se substituer, plus ou moins aisément, au glyphosate. Autrement, se passer de glyphosate et réduire la protection herbicide chimique en général suppose de mettre en œuvre des mesures prophylactiques visant à diminuer la pression adventice. La couverture végétale des inter-cultures, avec des couverts bien choisis, et la diversification des successions culturales, là encore définie de manière pertinente, sont les principaux leviers mobilisables pour réduire le développement des adventices, non seulement pendant les inter-cultures, mais également en culture.

Les principales alternatives, directes ou indirectes, au glyphosate sont présentées dans la première section de cette partie. Nous présentons à la fois leurs intérêts et leurs limites pour le contrôle des adventices sans glyphosate.

La seconde section de cette partie présente les risques, agronomiques et environnementaux, qui pourraient être induits par le retrait du glyphosate. Ces risques peuvent être dus à la perte des propriétés spécifiques du glyphosate, essentiellement pour le contrôle des adventices, mais également la mise en œuvre des alternatives au glyphosate, comme l'effet du travail du sol sur l'érosion des sols.

Une remarque s'impose quant à la rédaction de cette partie du rapport. L'ensemble des éléments contenus dans cette partie sont issus de trois documents de synthèses très complets sur le sujet des alternatives au glyphosate : le rapport d'expertise de Reboud *et al* (2017), l'article de Labreuche *et al* (2018) et le document rédigé par la Cellule d'Animation Nationale du réseau DEPHY FERME (CAN DEPHY, 2018).

Il s'agit pour nous ici de présenter les alternatives au glyphosate dans la perspective de l'évaluation des effets de son retrait présentée dans la dernière partie de ce rapport, c'est-à-dire en développant plus le point de vue économique que dans les documents cités ci-dessus.

2.1 Alternatives au glyphosate pour le contrôle des adventices et des inter-cultures

a. Désherbage mécanique et travail du sol

Le travail du sol et le désherbage mécanique en inter-culture (voire en début de culture pour le désherbage mécanique) sont les principaux leviers de contrôle des adventices sans glyphosate (Reboud *et al*, 2017). Les interventions de travail du sol et le désherbage mécanique peuvent sectionner les adventices, remonter en surface tout ou partie des adventices de sorte à les faire sécher ou les enfouir. Elles permettent également de réaliser des faux-semis, qui après destruction des plantes ayant levé, diminuent la pression adventice. En outre, le travail du sol peut avoir impact positif sur les conditions du sol qui impactent la dormance, la germination et la croissance des adventices (Peigné *et al.*, 2007).

De fait, la gestion des adventices est uniquement assurée par le travail du sol et le désherbage mécanique sur les parcelles conduites selon les modalités de l'Agriculture Biologique, c'est-à-dire sans herbicides chimiques de synthèse (donc, de fait, sans aucun herbicide chimique).

Cependant, le travail du sol et le désherbage mécanique posent des problèmes spécifiques de mise en œuvre et d'efficacité, ces deux types de problèmes étant en grande partie liés.

i. Questions liées aux fenêtres d'intervention, en lien avec la notion de « jours agronomiques disponibles »

Les principaux défauts du travail du sol, du strict point de vue de sa mise œuvre, pour la gestion des adventices tiennent essentiellement en deux points. D'une part, les interventions de travail du sol les plus profondes sont plus longues à mettre œuvre que des pulvérisations de glyphosate. D'autre part, les interventions de travail du sol nécessitent des conditions de portance du sol plus exigeantes que des pulvérisations de glyphosate. Aussi, les fenêtres d'intervention sont généralement plus courtes pour les interventions de travail du sol que pour les traitements au glyphosate.

La taille des fenêtres d'intervention est spécifique à un type d'intervention et dépend, de manière cruciale, de la nature des sols considérés et des conditions météorologiques. Elle se mesure en « jours agronomiques disponibles », cette notion étant illustrée dans la Figure 6.

La disponibilité d'un nombre suffisant de « jours disponibles » peut être bien plus problématique dans certaines conditions pédo-climatiques (e.g., Gaubrie, Clavé et Ratier, 2020) que dans d'autres (e.g., Gautellier Vizioz *et al*, 2020). Ces questions seront analysées plus en détail dans la suite car elles pointent certaines des situations que nous considérons par la suite comme des « situations délicates » en cas de retrait du glyphosate.



Figure 6 : Faisabilité du désherbage mécanique : Modèle de base Jour Disponible

Note : Source : Quemener Jouanneau E., Metais P., Verdier J-L., colloque maîtriser les adventices en Grandes cultures, Paris, 4 décembre 2015)

ii. Questions liées à l'efficacité du travail du sol et du désherbage mécanique

Les interventions de travail du sol ou de désherbage mécanique peuvent avoir une efficacité plus aléatoire que des pulvérisations au glyphosate, pour trois types de raisons.

Tout d'abord, l'efficacité de certaines interventions de désherbage mécanique peut dépendre des conditions météorologiques durant les jours qui la suivent. Par exemple, 2 à 3 jours de conditions

asséchantes peuvent être nécessaires pour éviter que des organes d'adventices sectionnés ou remontés à la surface ne repiquent.

Ensuite, des interventions de désherbage mécanique ou de travail du sol peuvent être moins efficaces pour le contrôle des adventices lorsqu'elles sont mises en œuvre dans de mauvaises conditions de sol ou lorsqu'elles doivent être décalées en raison de conditions de sol défavorables. Ce problème est directement lié à celui de la taille des fenêtres d'intervention évoqué plus haut. En outre, ces interventions peuvent soit détériorer l'état du lit de semence lorsqu'elles sont mises en œuvre dans de mauvaises conditions de sol, soit retarder les semis lorsqu'elles doivent être elles même retardées en raison de conditions de sol défavorables. Dans les deux cas des pertes de rendement sont possibles.

Enfin, certaines interventions de travail du sol peuvent stimuler le développement d'une flore adventice. Par exemple, un labour peut enfouir des graines d'adventices dans des horizons de sol où ces graines ne germent pas mais, à l'inverse, faire remonter des graines d'adventives vers des horizons de sol où elles germent si le temps d'enfouissement n'a pas dépassé la durée de viabilité de ces graines. De même, la gestion mécanique de parcelles infestées par des vivaces doit être raisonnée en ce qui concerne les outils. Les outils à dents doivent être privilégiés, les outils à disque risquant de multiplier les rhizomes et racines en les divisant. La gestion à long terme des vivaces se raisonne au cas par cas en fonction de l'espèce et la prophylaxie doit rester la règle.

De manière à simplifier la suite de l'exposé, **nous considérons ici comme intervention de travail du sol toute intervention impactant l'état du sol, même de manière très superficielle. Ce que nous nommons ici intervention de travail du sol incluent donc les interventions principalement dédiées à la gestion de l'état du sol (e.g., labour) et les interventions de désherbage mécanique qui ont une action sous la surface du sol (e.g., scalpage).**

Ce choix est lié au rôle dual, à la fois sur l'état du sol et sur les adventices, du travail du sol en général, et du labour en particulier. En effet, nos analyses des données de l'enquête PK-GCP_2017,³ montrent que la stratégie de travail du sol, telle qu'elle peut être mesurée par la fréquence de labour, est le principal déterminant de l'utilisation de glyphosate.

b. Leviers chimiques sélectif en culture

Les herbicides de synthèse sont des leviers de gestion des adventices souvent efficaces et faciles à mettre en œuvre. Les conditions de passage du pulvérisateur sont moins restrictives que les outils de désherbage mécanique et de travail du sol du fait du poids plus faible des pulvérisateurs. Cette légèreté permet un passage sur parcelle où la portance du sol est faible et où l'action d'un désherbage mécanique pourrait affecter la structure du sol.

Deux substances actives de synthèse, autres que le glyphosate, sont actuellement autorisées pour un usage en inter-culture : le Dicamba et l'hormone 2.4D. Aucune de ces deux molécules n'est efficace sur graminées (Labreuche et al, 2019). Contre les repousses de cultures dicotylédones (e.g., colza), le différentiel d'efficacité et d'étendue du spectre des cibles entre le glyphosate et ses concurrents les plus directs et de coût fait que les possibilités de substitution des utilisations de glyphosate en inter-culture sont plutôt limitées.

³ A l'instar de celles menées par Reboud et al (2017) sur les enquêtes précédentes.

En outre, le 2.4D présente des limites de dates de récolte après application élevée (2 mois avant récolte de betterave sucrière) et n'est pas autorisée avant colza et légumineuses à petites graines. Le Dicamba est quant à lui très volatile. Le produit lorsqu'il est épandu sur la culture cible s'épand sur les parcelles environnantes et cause des dégâts sur les cultures avoisinantes et les bords de champs.

Les possibilités de substitution des utilisations du glyphosate par des utilisations d'herbicides autorisés en culture sont *a priori* encore plus limitées. D'une part, si les cultures majeures (*e.g.*, blé, colza, maïs) peuvent être désherbées chimiquement avec plusieurs herbicides, le nombre d'herbicides homologués pour des usages en culture diminue généralement avec la diminution de l'importance économique des cultures. D'autre part, les herbicides autorisés en culture ciblent des adventices qui lèvent soit juste avant la levée des semis des cultures soit après.

c. Désherbage thermique et électrique

Le désherbage thermique et le désherbage électrique sont très peu utilisés en grande culture, probablement en raison de leur coût, d'un débit de chantier faible et d'un déficit d'efficacité des outils actuels.⁴ Ces options de désherbage non chimique et non mécanique ne sont pas considérées dans la suite de cette étude.

e. Implantation de cultures intermédiaires

Les couverts d'inter-culture ont une action de régulation des adventices qui se fait directement par compétition pour les ressources (lumière, eau, azote) et, pour une faible part, par allélopathie. Les couverts réduisent la germination des adventices, et les concurrencent dans leur développement et croissance (Cordeau et Moreau, 2017). Toutefois, les couverts d'inter-culture régulent uniquement les adventices qui émergent lors de la présence du couvert.

Le choix des espèces semées au sein du couvert végétal est un des leviers de gestion des adventices et prend aussi en compte d'autres objectifs du couvert que sont la structuration du sol par les racines ou la nutrition du sol par l'implantation de légumineuses par exemple.

L'implantation d'un couvert végétal pose le problème de sa destruction ou de sa régulation pour semer les cultures.

La destruction des couverts végétaux peut se faire sans travail du sol. Le choix d'espèces gélives dans les régions où l'occurrence du gel est fréquente, le choix d'espèces pouvant être détruites par roulage mécanique ainsi que l'adaptation du choix du couvert en fonction de la culture à suivre sont des axes de développement pour se passer de glyphosate (Labreuche et al, 2019). Lorsque l'objectif est de gérer le salissement, les mélanges d'espèces ne sont pas forcément plus efficaces qu'un couvert mono spécifique (Smith, Warren et Cordeau, 2020). La régulation des couverts par broyage est également possible pour les parcelles travaillées en semis sous couverts vivants.

La destruction des couverts par des interventions de travail du sol, notamment le labour, est également possible. Ces interventions sont plus exigeantes en matière de portance du sol que des pulvérisations, roulages ou broyages. Ce problème se pose, particulièrement à la fin de l'automne, sur des sols hydromorphes (peu fréquents) ou à ressuyage lent. Il justifie les dérogations locales à l'interdiction de la destruction chimique des couverts d'inter-culture. En outre, un passage de broyeur peut faciliter la

⁴ Voir, *e.g.*, Gautellier Vizioz et al (2020) pour des cas d'étude considérant ces options de désherbage.

destruction mécanique du couvert lorsque sa quantité de biomasse est importante (Labreuche et Collet, 2010).

f. Rotations culturales et associations culturales

Alterner des cultures à cycles biologiques variés (*e.g.*, cultures d'hiver et de printemps) empêche la sélection de la flore adventice sur des espèces dont les cycles sont synchronisés avec ceux des cultures de la rotation. En diminuant la pression adventice de manière prophylactique, les systèmes diversifiés réduisent les besoins en matière de contrôle des adventices (Reboud *et al.*, 2017). Ceci a été particulièrement bien documenté dans le cas de successions culturales avec introduction d'une espèce pérenne, la luzerne, en rotation avec le blé (Meiss *et al.*, 2010⁵). La structure de la flore adventice est profondément modifiée et sa gestion facilitée, en particulier du fait de la disparition des graminées comme le vulpin ou le ray-grass qui présentent fréquemment des résistances aux herbicides ALS, largement utilisés dans les rotations à forte fréquence de céréales d'hiver. Ces flores difficiles, contre lesquelles le glyphosate est souvent utilisé, peuvent donc être gérées par une évolution des successions culturales.

2.2 Outils de régulation des couverts, travail du sol et de désherbage mécanique considérés dans l'étude

Dans cette partie, nous décrivons les outils de travail du sol et de désherbage mécanique que nous avons pris en compte lors de nos calculs économiques. L'utilisation de ces outils est identifiable dans les données de l'enquête PK-GCP_2017. Les coûts associés à cette utilisation ont été mesurés à partir de l'information contenue dans le référentiel des coûts de production de l'APCA (APCA, 2018) et dans les barèmes d'entraide des CUMA (Annexe A). L'enquête PK-GCP_2017 différencie les outils de travail du sol selon leur profondeur de travail et le retournement ou non du sol. Nous suivons cette typologie.

a. Roulage et broyage des couverts végétaux

Les rouleaux, lisses ou non lisses, ainsi que les broyeurs de végétaux permettent de détruire les couverts végétaux. Ils sont passés au-dessus de la surface du sol et sont utilisés dans tout type de stratégie de travail du sol. Le passage de ces outils est faiblement limité par les jours agronomiques disponibles quelle que soit la saison (automne ou printemps).

b. Travail du sol très superficiel et superficiel

Les travaux très superficiels (TS, travail strictement supérieur à 8 cm) et superficiels (S, entre 8 et 15cm) du sol peuvent être réalisés à l'aide de nombreux types d'outils. Les outils pris en compte dans ces catégories sont les suivants : déchaumeur, cultivateur à dents rigides, vibroculteur, sarcluse, bineuse, déchaumeur à disques, herse classique, herse étrille, houe rotative, écroûteuse, pulvérisateur, cultivateur animé et herse animée.

Le choix de ces différents outils par les agriculteurs est effectué selon leur capacité à réaliser un faux-semis, détruire des adventices, répartir les pailles, incorporer les pailles et selon la qualité de la préparation réalisée par l'outil (Figure 7).

⁵ Meiss H. *et al.*, 2010. *Weed Research* 50, 331-340

	Profondeur de travail (en cm)	Objectif agronomique				
		Répartition des pailles en surface	Faux semis	Destruction des repousses et adventices	Incorporation des pailles	Restructuration des zones tassés
Herse de déchaumage	1-3		FS			
Bêches roulantes	3-5					
Déchaumeurs à disques indépendants	3-5	HP		A		
	6-10	HP				
Vibrodéchaumeurs	3-5			D		
Déchaumeur à trains de disques	6-10					
Cultivateurs à 2 rangées de dents et disques de nivellement	6-10					
	10-20					
Cultivateurs à 3 rangées de dents et disques de nivellement	6-10					
	10-20					



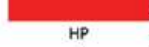
	Aptitude bonne
	Aptitude moyenne
	Aptitude faible
HP	Amélioration possible si outil équipé d'une herse à paille
D	Nécessité d'intervenir sur des adventices ou repousses peu développées
FS	Nécessité de faire plusieurs passages
A	A nuancer selon les angles d'attaques et d'entrure

Figure 7 Propriétés des outils de travail du sol.

Note : Tableau de classification des outils pour réaliser des faux-semis et des destructions d'adventices. Ces données ont été obtenues en période séchante sur des repousses de blés développées. Source Arvalis-Institut du végétal.

c. Travail profond du sol sans retournement

Les outils de travaux profonds (TP) du sol sans retournement considérés sont les sous-soleuses, décompacteurs, roto bêche, machine à bêcher, chisel, cultivateur à dents et cultivateur à disques.

d. Travail profond du sol avec retournement

Les outils de travail profond ou labour (LB) du sol avec retournement considérés sont les charrues à versoirs et charrue à disques.

Le labour enfouit le stock semencier de la surface du sol entraînant la mise en dormance voire le blocage de la germination des semences, mais aussi favorisant leur destruction par la faune du sol ou leur perte progressive de viabilité. Il permet de diminuer le taux de germination par effet de dilution des semences sur l'épaisseur travaillée, et la destruction des adventices germées. Le labour perturbe également le développement des rhizomes des vivaces.

Néanmoins, un labour annuel peut faire remonter en surface une proportion de semences d'adventices enfouies encore capables de germer lorsqu'elles remontent à la surface (Hirschy *et al*, 2018).

2.3 Risques agronomiques et environnementaux potentiels en cas du retrait du glyphosate

Selon les professionnels agricoles, le retrait du glyphosate pourrait induire certains effets agronomiques ou environnementaux qu'il est difficile de mesurer *a priori*. De même, l'évaluation de ces effets potentiels est très difficile et n'est pas considérée dans ce rapport.

a. Erosion des sols

Le retrait du glyphosate risque d'accroître l'érosion des sols s'il est accompagné d'une augmentation forte du travail du sol et des périodes de sol nu. L'effet principal de cette érosion est la perte de fertilité du sol, pouvant entraîner à long terme des baisses de productivité. Les parcelles en sols superficiels cultivent très peu de plantes sarclées pour cette raison. La formation d'un sol étant lente, toute action engendrant la perte de sols arables peut avoir des effets à moyen-long terme. L'érosion des sols a également des effets en dehors de la parcelle car cette dernière régule moins bien les flux d'eau (FAO, 2001). Cependant, les risques d'érosion sont à traiter de façon plus globale à l'échelle de la succession culturale et l'implantation de couverts intermédiaires, quel que soit le mode de destruction, apporte une réponse favorable pour limiter l'érosion et améliorer la fertilité des sols.

b. Gestion à long terme de l'enherbement et des vivaces

Le retrait du glyphosate questionne la gestion pluriannuelle des adventices.

D'une part, le glyphosate peut être employé en tant que solution de rattrapage relativement rapide, pratique et efficace. Il peut s'agir de remplacer un désherbage mécanique impossible à mettre en œuvre ou de corriger les effets d'interventions de désherbage qui se sont avérées être inefficaces.

D'autre part, le retrait du glyphosate soulève des inquiétudes quant au contrôle à long terme des adventices « difficiles » en général, et des vivaces et graminées en particulier.

Une enquête en ligne et à réponses volontaires, a été menée par les Instituts Techniques Agricoles en juillet 2019 sur les utilisations de glyphosate en grandes cultures. Ont été obtenues 7677 réponses exploitables, dont une grande majorité d'agriculteurs utilisateurs de glyphosate (94.8% des répondants). Dans cette enquête, les usages les plus fréquemment signalés sont la destruction des adventices vivaces (70% des usages déclarés) et la gestion des repousses lors des inter-cultures. Dans le cas des vivaces, il s'agit le plus souvent d'un traitement 1 an sur 3, aux doses recommandées sur vivaces (de 1 à 5 l de produit commercial/ha). Sur l'usage en inter-culture, courte ou longue, les doses sont cohérentes avec les recommandations : entre 1 et 3l/ha, avec soit des usages très fréquents (tous les ans) ou ponctuels (1 année sur 3). La quantité moyenne de glyphosate qu'ils déclarent utiliser (2028 réponses) est de 2.15 l/ha, ce qui sur la base d'un produit à 360 g substance active/l serait équivalent à 775 g/ha.

Par ses propriétés d'herbicide « total », le glyphosate peut être considéré comme une solution de dernier recours contre les adventices « difficiles ». Néanmoins, il convient de remarquer que le glyphosate est également une solution rapide, efficace et bon marché contre les adventices « difficiles ». Il peut également être employé aux abords des parcelles pour éviter des contaminations. En comparaison, le désherbage mécanique, et le travail du sol en général, offre des solutions moins rapides, plus coûteuses et moins pratiques à mettre en œuvre.

c. Désherbage chimique et résistances des adventices

Le glyphosate a un mode d'action unique dans la famille des herbicides. Son retrait réduirait les possibilités d'alternance pour la protection herbicide chimique des cultures et, par conséquent, pourrait en théorie favoriser le développement de résistances de certaines adventices. La gestion des vivaces graminées, chiendent et sorgho d'Alep, par des anti-graminées foliaires est en particulier concerné par ce risque de résistances (Labreuche *et al*, 2019). Dans la réalité, l'existence et l'utilisation

du glyphosate sont venues corriger une flore adventice spécialisée, à base de graminées résistantes aux herbicides de pré- et post-levée.

d. Désherbage chimique et profil toxicologique des substituts au glyphosate

Le remplacement possible des utilisations actuelles de glyphosate par l'utilisation d'autres herbicides pose question d'un point de vue environnemental si les substituts au glyphosate présentent des risques de toxicité et d'écotoxicité élevés. Par exemple, le Dicamba, un des deux substituts les plus proches du glyphosate avec le 2.4D, présente un risque toxicologique et écotoxicologique relativement élevé, en plus d'être volatile.

e. Perte de rendement

Le retrait du glyphosate pose la question d'une possible perte de rendements liée à une mauvaise gestion de la flore adventice et/ou à la dégradation physique des sols que pourrait engendrer un travail du sol plus intense.

Reboud *et al* (2017) n'ont pas établi de lien entre le rendement et la qualité des produits récoltés et l'usage ou non de glyphosate. Notre analyse comparative des rendements entre parcelles avec utilisation et sans utilisation de glyphosate pour la campagne 2016-2017 n'établit pas non plus de différences significatives de rendements quelle que soit l'espèce considérée. Dès lors qu'on contrôle les effets de la stratégie du travail du sol et des caractéristiques des parcelles et des inter-culture l'utilisation de glyphosate a un impact négligeable sur les rendements.

Ces résultats suggèrent, que le travail du sol et les techniques de désherbage mécaniques et chimiques permettent de contrôler les adventices aussi efficacement qu'avec du glyphosate. Deux constats appuient cette conclusion. D'une part, le caractère très bon marché du glyphosate étant très souvent souligné, il serait particulièrement étonnant que plus de 80% des surfaces de grandes cultures ne soient pas traitées si le glyphosate avait un effet bénéfique un tant soit peu systématique sur les rendements de ces cultures. D'autre part, les expertises publiées sur le sujet n'évoquent pas l'éventualité d'un « défaut généralisé » de contrôle des adventices en cas de retrait du glyphosate (*e.g.*, Reboud *et al*, 2017 ; Labreuche *et al*, 2018). Les pertes de rendements évoquées dans ces expertises sont essentiellement ponctuelles. Elles sont la conséquence de retards de semis ou de lits de semence dégradés dus à des interventions de travail du sol décalées ou réalisées dans de mauvaises conditions, ce type de problème pouvant parfois être évités grâce à des traitements au glyphosate.

Il n'est donc pas anticipé d'effet négatif sur le rendement en cas de retrait du glyphosate du fait d'un défaut de maîtrise de flores.

2.4 Le cas particulier de d'agriculture de conservation des sols, en lien avec la réduction du travail du sol en général

Etant donné qu'une grande partie des principales alternatives à l'utilisation de glyphosate suppose de travailler le sol, il convient de discuter ici des pratiques de production sans labour et de leurs intérêts et limites. En effet, la mise en œuvre de ces techniques pourrait être remise en cause par le retrait du glyphosate, tout au moins pour les agriculteurs qui refuseraient de labourer occasionnellement leurs sols et dans l'état actuel des connaissances.

Néanmoins, alors que les discussions autour de ces techniques se focalisent souvent sur les aspects agronomiques et environnementaux, nous aborderons également les questions économiques (et organisationnelles) relatives à l'utilisation de ces pratiques. En particulier, si les techniques de production sans labour ont d'abord été développées aux Etats-Unis pour répondre à des problématiques d'érosion des sols, leur très large diffusion sur le continent américain ou en Australie, est justifiée non seulement par les problèmes d'érosion affectant les sols de ces pays, mais également pour des raisons économiques (Serpantié, 2009). Il est très probable que ces pratiques se diffusent également en France pour ces raisons très pragmatiques, que ces raisons s'ajoutent à une attitude protectrice vis-à-vis des sols et de leur biodiversité ou qu'elles se suffisent tout simplement à elles-mêmes.

a. Principes de l'agriculture de conservation des sols, et des techniques sans labour

Bien que les acceptions de l'expression « agriculture de conservation des sols » diffèrent d'une publication à l'autre et d'un groupe d'agriculteurs à l'autre, l'agriculture de conservation des sols est systématiquement définie comme reposant sur trois piliers : une stratégie de travail minimal du sol, la couverture végétale permanente ou quasi-permanente des sols et la diversification et l'allongement des cultures (FAO, 2001; Schaller, 2013). La question se pose en général de savoir ce qu'on entend par « travail minimal du sol », étant entendu qu'un sol travaillé de manière minimale ne peut être labouré. Les techniques de semis direct permettent de limiter le travail du sol aux seules lignes de semis (strip-till). Les techniques de l'agriculture de conservation des sols sont alors généralement assimilées à celles de semis direct. Les techniques culturales simplifiées sont également des techniques sans labour mais qui peuvent inclure des interventions plus profondes et plus ou moins fréquentes de travail du sol.

Les techniques de semis direct permettent de tirer avantage de la couverture végétale et de l'activité biologique des sols (cette dernière étant perturbée par le travail du sol, le labour en particulier). La couverture des sols contribue à la lutte contre l'érosion, limite les phénomènes de ruissellement et apporte de la matière organique, voire de l'azote pour les couverts incluant des légumineuses. L'activité biologique des sols contribue à la minéralisation de l'azote organique, l'activité de la macrofaune ayant également un rôle structurant. Les techniques culturales simplifiées permettent de limiter la perturbation des sols et n'excluent pas des périodes de sols nus.

Si la réduction du travail du sol diminue la consommation de carburant d'origine fossile et préserve le fonctionnement biologique, les stocks de matière organique et la structure des sols, elle tend également à favoriser le développement des adventices (que du travail du sol « intense » contribue à contrôler). La réduction du travail du sol doit donc être accompagnée de mesures prophylactiques, comme la couverture des sols durant les inter-cultures ou des rotations diversifiées, et, généralement, d'une protection herbicide chimique efficace. En effet, malgré leurs deux piliers agronomiques, les techniques de conservation des sols ont l'inconvénient d'accroître le besoin de contrôle chimique des adventices et des couverts d'inter-culture, ce dernier étant largement assuré aujourd'hui par l'utilisation de glyphosate.

b. Réduction du travail du sol et herbicides chimiques

Une consommation importante d'herbicides chimiques est, de manière plus générale, associée à l'ensemble des techniques sans labour. Par exemple, dans son analyse historique de la diffusion des techniques sans labour, Serpantié (2009) met en évidence les effets de l'efficacité croissante de la protection herbicide chimique sur l'accroissement des surfaces sans labour aux Etats-Unis depuis les

années 70. L'effet spectaculaire sur cette diffusion suite la mise en marché des variétés de maïs, puis de soja et de coton, génétiquement modifiées résistantes au glyphosate à partir du milieu des années 90 s'explique en partie par le fait que ces variétés permettent de bénéficier des propriétés du glyphosate, non seulement en inter-culture, mais également en culture.

Ceci dit, l'évolution de l'efficacité des herbicides chimiques ne peut à elle seule expliquer la très forte utilisation des techniques sans labour sur le continent américain et en Australie et le rythme de leur diffusion actuelle en Europe et en France en particulier.

c. Intérêts économiques et organisationnels de la réduction du travail du sol

Si le bilan agro-environnemental de la réduction du travail du sol peut paraître mitigé, ses avantages économiques et organisationnels sont indéniables. Même si elle a tendance à augmenter les dépenses d'herbicides, et de glyphosate en particulier, la réduction du travail du sol permet de diminuer significativement la consommation de carburants ainsi que les charges de mécanisation et de main d'œuvre. En effet, en comparaison des pulvérisations d'herbicides chimiques les interventions de travail du sol sont chronophages, nécessitent différents types d'outils et, pour les plus profondes, nécessitent d'importantes puissances de traction. La réduction des coûts de main d'œuvre peut être substantielles pour les grandes exploitations, en particulier lorsque l'(les) exploitant(s) ne peu(ven)t assurer lui(eux)-même(s) les interventions considérées.

De fait, la diffusion des pratiques de travail du sol réduit et de l'agriculture de conservation des sols en particulier, n'est qu'un des phénomènes rendu en partie possible par les propriétés des herbicides chimiques en général, et du glyphosate en particulier. L'agrandissement de certaines exploitations en est un autre. Par exemple, Hurley (2016) met en évidence les relations entre plusieurs évolutions observées au cours des deux dernières décennies dans le secteur de la production de soja et de maïs aux Etats-Unis : la diffusion des variétés tolérantes au glyphosate⁶, l'agrandissement des exploitations spécialisées en grandes cultures et le développement du travail à temps partiel des agriculteurs dans les exploitations de taille réduite. En effet, l'utilisation de glyphosate permet de réduire le travail du sol et, par là-même, permet d'exploiter de plus grandes surfaces avec une main d'œuvre réduite sur l'exploitation.⁷

Il est donc très probable que ces pratiques se soient diffusées également en France pour ces raisons très pragmatiques, que ces raisons s'ajoutent à une attitude protectrice vis-à-vis des sols et de leur biodiversité ou qu'elles se suffisent tout simplement à elles-mêmes. Notre analyse des effets économiques du retrait du glyphosate apporte des éléments, statistiquement étayés, en faveur de cette hypothèse. En particulier, elle met également évidence de très fortes relations entre la réduction du travail du sol, l'utilisation de glyphosate (et d'herbicides chimiques en général) et la taille des exploitations.

La simplification des rotations dans les exploitations de grande taille et l'augmentation de la taille moyenne des parcelles agricoles conduisent à une réduction de la biodiversité (Sirami et al, 2019, PNAS). Ceci souligne la complexité des relations que nous cherchons ici à éclairer.

⁶ Ainsi que celle des variétés Bt-résistantes et des semences avec enrobage de néonicotinoïdes

⁷ La diffusion des variétés Bt-résistantes et des semences enrobées participant à ce phénomène en réduisant le nombre de traitements phytosanitaires à mettre en œuvre aux seules pulvérisations de glyphosate.

3. Facteurs explicatifs de l'utilisation du glyphosate en inter-culture en grandes cultures, et situations potentiellement « délicates » en cas de retrait du glyphosate

Malgré leur intérêt évident pour l'analyse des pratiques de gestion de l'état du sol et de contrôle des adventices sans herbicides chimiques en général, et sans glyphosate en particulier, nous avons exclu de notre analyse les parcelles en Agriculture Biologique, car les pratiques de contrôle des adventices des exploitations de grandes cultures en Agriculture Biologique ne peuvent pas être séparées des autres dimensions de la conduite technique des cultures dans ces exploitations rendant pour cela la comparaison avec les exploitations en « conventionnel », sur ce seul point de la gestion des adventices, délicate.

Nous échantillon d'analyse contient donc 17342 parcelles en grandes cultures annuelles conduites selon un mode de production conventionnel. Cet échantillon est représentatif d'une superficie de 11,3 millions d'hectares qui couvrent 90,4 % de la surface de grandes cultures conduite selon un mode de production conventionnel en France lors de la campagne 2016/2017. Tous les résultats statistiques présentés dans le reste de ce rapport reposent sur cet échantillon.

Nous présentons dans un premier temps nos résultats concernant les facteurs impactant l'utilisation de glyphosate. La plupart des résultats que nous obtenons à partir de l'enquête PK-GCP_2017 sont tout-à-fait cohérents avec ceux obtenus par Reboud *et al* (2017) à partir des enquêtes PK-GCP_2014 et PK-GCP_2011. Nous complétons l'analyse classique de l'effet des facteurs agronomiques sur l'utilisation de glyphosate par une analyse des relations entre la taille des exploitations et l'utilisation de glyphosate. Cette analyse apporte des éléments très utiles pour l'évaluation des effets du retrait du glyphosate.

Puis nous présentons l'ensemble des cas-types d'exploitations ou conditions, qui ont été identifiés comme étant potentiellement en « situation délicate » dans l'éventualité d'un retrait du glyphosate.

3.1 Analyse des facteurs liés l'utilisation du glyphosate en inter-culture

Nous analysons successivement les effets sur l'utilisation de glyphosate (*a*) de la stratégie de travail du sol, (*b*) de la taille des exploitations, (*c*) des caractéristiques pédologiques, (*d*) du précédent cultural et (*f*) de la pression adventice perçue par les agriculteurs. Nous étudions ensuite les relations entre l'utilisation de glyphosate et l'utilisation des autres herbicides.

La plupart des résultats présentés dans cette section s'expliquent en grande partie par une relation de substitution entre travail du sol et utilisation de glyphosate pour le contrôle des adventices et des couverts.

a. Stratégie de travail du sol

Afin d'analyser les effets des pratiques de travail du sol sur l'utilisation de glyphosate, nous retenons la typologie de stratégies de travail du sol définies par Reboud *et al* (2017). Cette typologie est composée de cinq stratégies d'intensité de travail du sol croissante dont les caractéristiques sont renseignées dans les données de l'enquête PK-GCP-2017 :

Typologie de stratégie de travail du sol de Reboud et al (2017)

Semis direct (SD) : aucun labour sur la période 2012–2017 et aucun travail du sol durant la campagne 2017

(1.7% des surfaces de grandes cultures en 2017)

Techniques culturales simplifiées (TCS) : aucun labour sur la période 2012–2017 et au moins une intervention de travail sol sans retournement durant la campagne 2017

(18.1% des surfaces de grandes cultures en 2017)

Labour occasionnel : un ou deux labours sur la période 2012–2017

(18.6% des surfaces de grandes cultures en 2017)

Labour fréquent : trois, quatre ou cinq sur la période 2012–2017

(33.7% des surfaces de grandes cultures en 2017)

Labour systématique : un labour tous les ans sur la période 2012–2017

(27.9% des surfaces de grandes cultures en 2017)

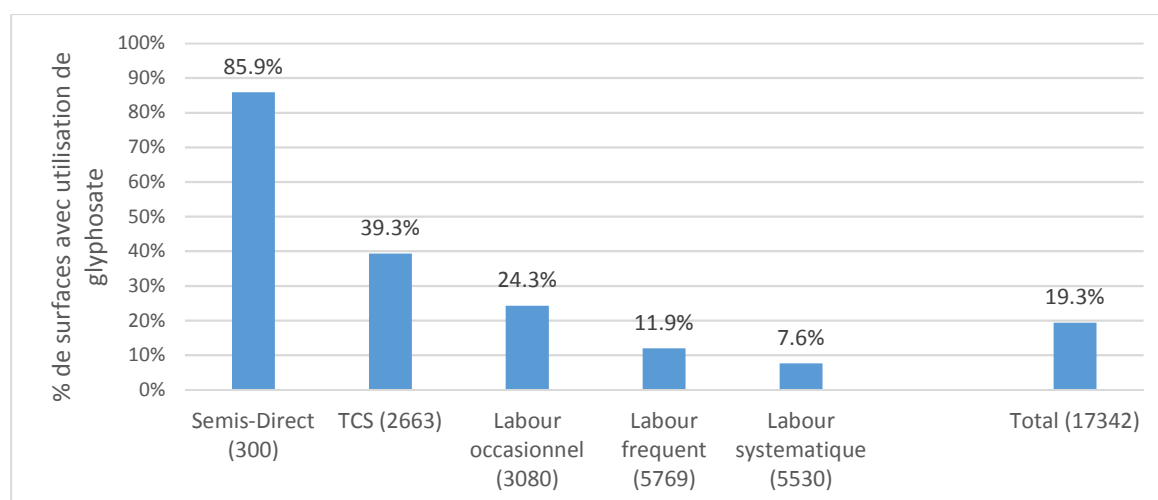


Figure 8 Utilisation de glyphosate, en part de surface traitée, selon la stratégie de travail du sol
Note : le nombre de parcelles est précisé entre parenthèses. L'échantillon concerne 17 342 parcelles.

La Figure 8 montre que l'utilisation de glyphosate augmente nettement lorsque l'intensité du travail du sol diminue. De manière fréquentielle, près de 9 parcelles sur 10 en semis direct sont traitées, ce qui correspond potentiellement pour une parcelle en semis direct à être traitée presque 9 années sur 10 et 4 parcelles sur 10 en techniques culturales simplifiées. Le travail du sol en général, et le labour en particulier, contribuant significativement au contrôle des adventices, les parcelles aux sols non travaillés ou non labourés doivent être protégées chimiquement contre les adventices. L'utilisation de glyphosate sur les parcelles en semis direct peut également s'expliquer par la nécessité de réguler le développement ou de détruire les couverts végétaux. Les parcelles labourées sont moins traitées au glyphosate que les parcelles non labourées, et les parts des surfaces labourées traitées au glyphosate diminuent à mesure que la fréquence de labour augmente. Cette relation négative entre la fréquence de labour et les traitements au glyphosate s'explique également par la contribution des labours au contrôle des adventices en général, et en inter-culture en particulier.

L'intensité de la stratégie du travail du sol est le facteur le plus impactant de l'utilisation de glyphosate en inter-culture. Il est à noter que la quantité de glyphosate utilisée sur les parcelles traitées varie peu en fonction de la stratégie de travail du sol.

b. Taille des exploitations

La taille des exploitations est un facteur très corrélé à l'utilisation de glyphosate, selon un effet par paliers. Les parts de surface traitées au glyphosate sont de l'ordre de 14% pour les exploitations de moins de 150 ha de SAU, d'environ 23% pour celles dont la SAU est comprise entre 150 et 350 ha et de près de 40% pour celles dont la SAU dépasse 350 ha (Figure 9).

Comme cela sera vu dans la suite, cet effet s'explique pour partie par des facteurs économiques et/ou organisationnels et pour partie par des corrélations entre la taille des exploitations (notamment les plus élevées) et certaines caractéristiques pédologiques.

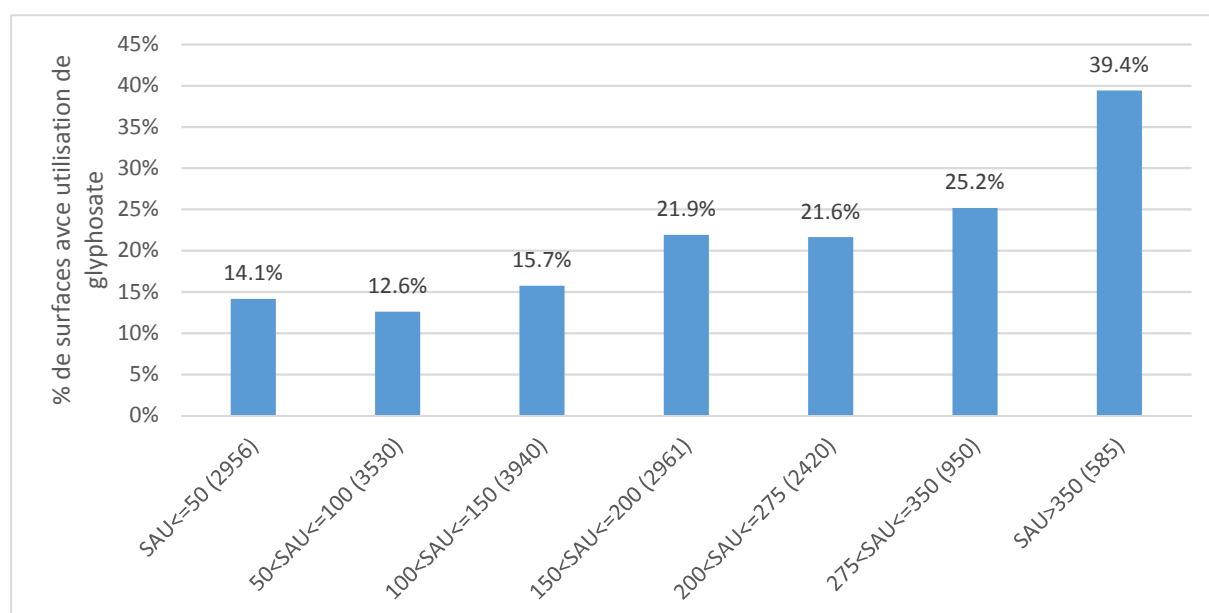


Figure 9 Utilisation de glyphosate selon la SAU de l'exploitation.

Note : le nombre de parcelles est précisé entre parenthèses. L'échantillon concerne 17 342 parcelles.

c. Caractéristiques pédologiques

Les caractéristiques pédologiques de la parcelle expliquent également l'usage du glyphosate (Figure 10) Les parcelles à sols hydromorphes sont plus souvent traitées au glyphosate (24.6%) que les celles aux sols non hydromorphes (17.4%), probablement en raison d'un ressuyage plus lent et/ou insuffisant gênant les interventions de travail du sol.

24 % des surfaces à sols superficiels reçoivent du glyphosate, contre seulement 18% des surfaces à sols profonds ou semi-profonds. Le travail du sol peut amplifier les problèmes d'érosion et appauvrir, par évaporation, la réserve hydrique déjà limitée des sols superficiels. En outre les sols superficiels sont souvent très caillouteux, et donc difficiles à travailler.

Une pierrosité élevée s’accompagne d’un usage plus élevé de glyphosate, mais selon un effet relativement limité.

La texture des sols semble avoir peu d’effets sur l’utilisation de glyphosate, en dehors d’un effet négatif pour les sols limono-sableux (qui ne représentent que 4.2% des surfaces de grandes cultures).

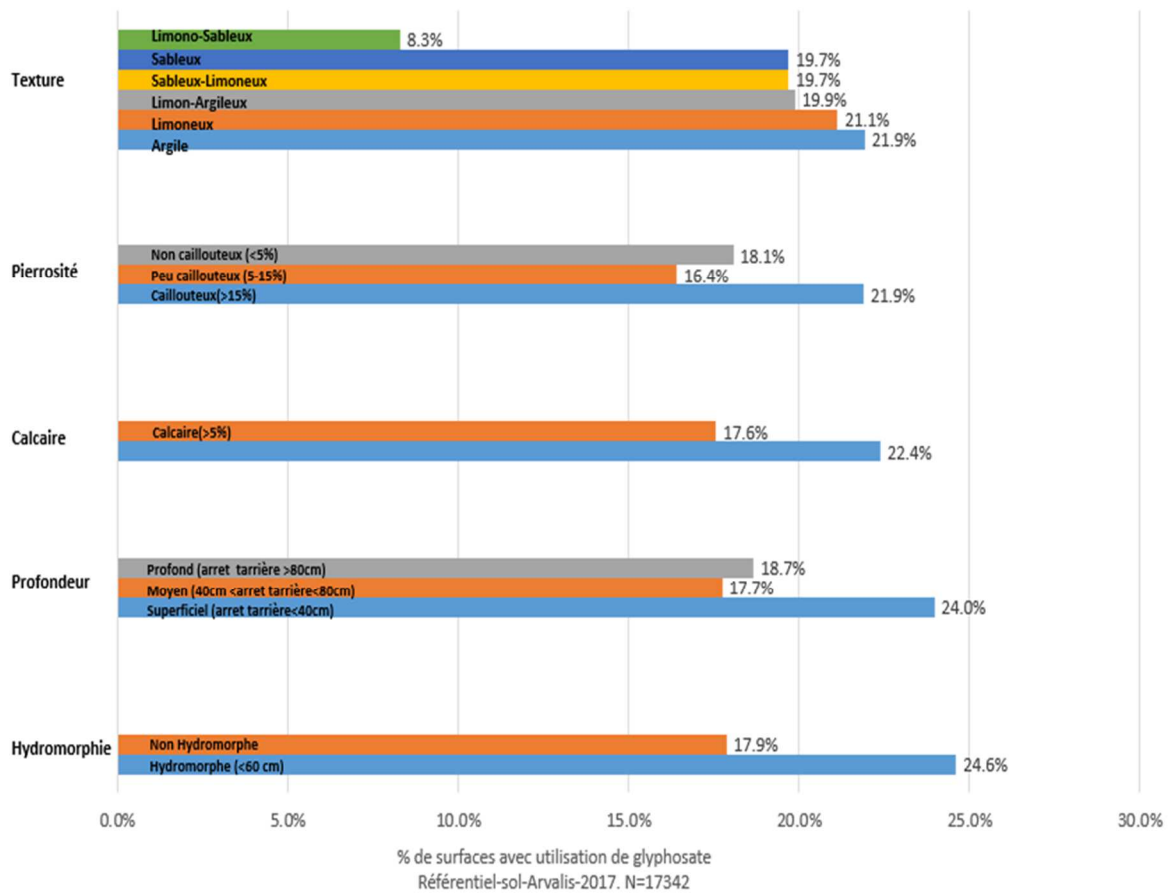


Figure 10 Utilisations de glyphosate selon des paramètres de sol.
Note : les catégories de travail des sols sont identifiées par le référentiel sols Arvalis.

d. Précédent cultural

Le glyphosate permet de gérer les adventices d’automne et les repousses. Il est plus souvent utilisé après les cultures de soja, colza et blé du (Figure 11). Il est également utilisé sur 30% de surfaces après jachères.

23.1 % des surfaces avec un précédent susceptible de générer des repousses⁸ reçoivent du glyphosate contre 12.8 % des surfaces avec un précédent ne faisant pas de repousses. Ces surfaces avec précédents à repousses représentent plus de 60 % de la surface en grandes cultures annuelles en 2016-2017. Les espèces à repousses sont généralement des espèces récoltées plus tôt que les autres espèces (Figure 12).

⁸ Sont ici classées à repousses : les céréales (hors maïs), le mélanges contenant des céréales (hors maïs), le colza, la pomme de terre, les jachères et les prairies.

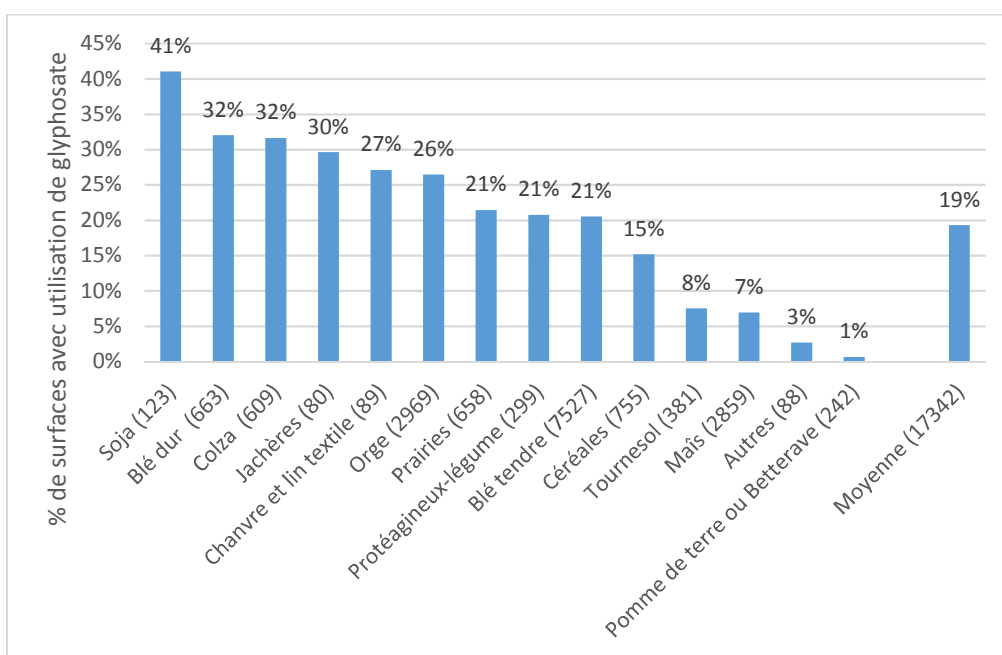


Figure 11 Utilisation de glyphosate selon le précédent cultural.

Note : le nombre de parcelles est précisé entre parenthèses.

La catégorie « céréales » comprend les cultures suivantes : avoine, riz, seigle, sorgo-grain, triticale, autres céréales (sarrasin).

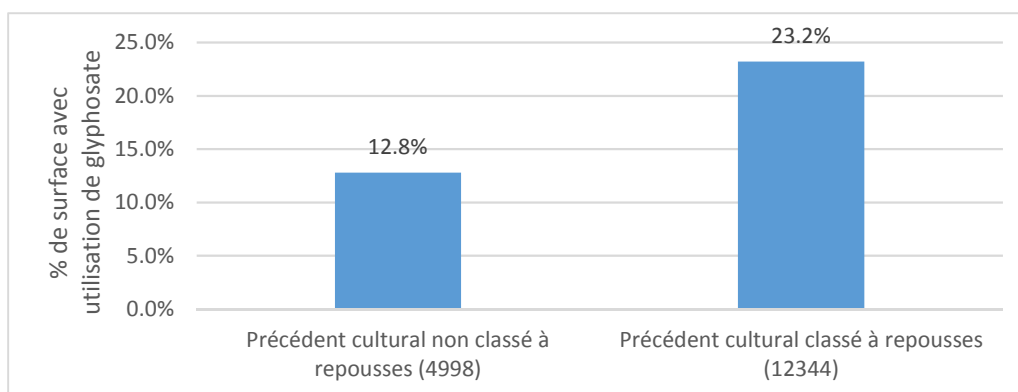


Figure 12 Utilisation de glyphosate selon la classification du précédent cultural à repousses ou non.

Note : le nombre de parcelles est précisé entre parenthèses. L'échantillon concerne 17 342 parcelles.

e. Durée de l'inter-culture

Plus que la longueur des inter-cultures en jours, qui peuvent accueillir un semis de couvert végétal pour les plus longues, c'est la présence d'un précédent à repousses (souvent à récolte précoce) qui semble expliquer un usage plus élevé du glyphosate en inter-culture courte et en inter-culture très longue (Figure 13).

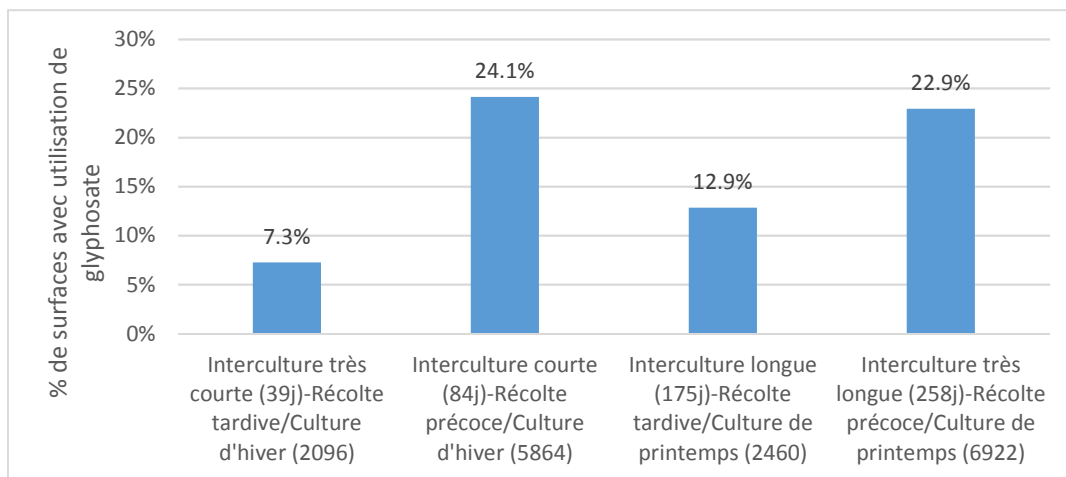


Figure 13 Utilisations de glyphosate selon la durée de l'inter-culture

Note : le nombre de parcelles est précisé entre parenthèses. L'échantillon concerne 17 342 parcelles.

f. Pression des adventices

Plus le niveau de la pression adventice (en culture) est perçue comme élevé par l'agriculteur enquêté, plus le pourcentage de surface avec utilisation de glyphosate est élevé. 31.2% des surfaces à forte pression adventice perçue (qui représentent 13 % des surfaces de grandes cultures) sont traitées au glyphosate, contre moins de 19% pour celles sur lesquelles la pression est perçue comme étant moyenne ou faible (Figure 14).¹⁰

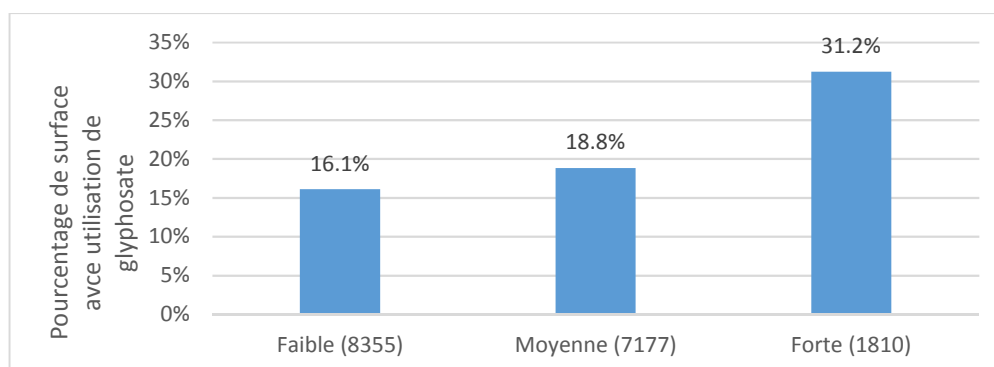


Figure 14: Utilisation de glyphosate selon la note de pression en culture en adventices de la parcelle

Note : le nombre de parcelles est précisé entre parenthèses. L'échantillon concerne 17 342 parcelles.

g. IFT herbicides avec utilisation et sans utilisation de glyphosate

L'IFT glyphosate moyen des parcelles avec utilisation de glyphosate varie très peu (IFT glyphosate moyen de 0.36 à 0.4) quelle que soit la stratégie de travail du sol (Figure 15) et quelle que soit la pression adventice perçue (Figure 16).

¹⁰ La mesure de perception porte sur l'état de la parcelle en culture. Le fait que les parcelles traitées au glyphosate soit plus souvent perçue comme « à forte pression adventice » ne doit pas être interprétée comme une preuve d'inefficacité du glyphosate mais comme une conséquence de ce qu'il est difficile de se débarrasser d'une flore adventice développée.

Les IFT herbicides moyens (hors glyphosate) des parcelles avec glyphosate sont légèrement plus élevées que celles des parcelles sans glyphosate. Il n’y a donc pas de substitution entre le glyphosate et les autres herbicides. Les autres herbicides sont principalement des herbicides spécifiques utilisés en pré-levée ou en culture. Il convient cependant de préciser ici que les IFT des herbicides (hors glyphosate) sont très variables, en particulier d’une espèce cultivée à l’autre. Les écart-types des IFT des herbicides hors glyphosate est de l’ordre de 0.90, celui des IFT du glyphosate de l’ordre de 0.20.

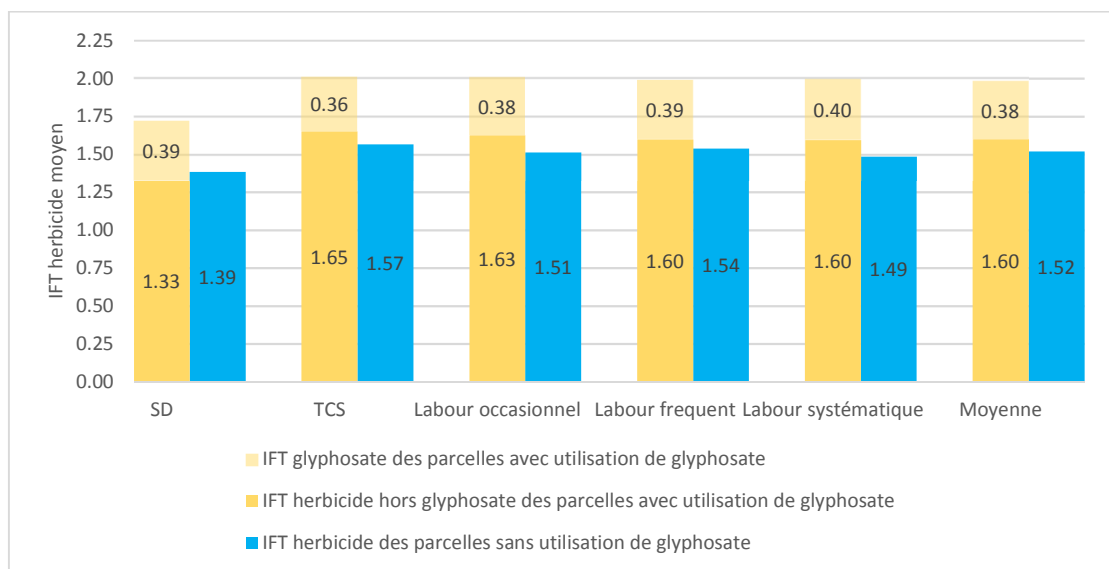


Figure 15 IFT moyens par parcelle selon la stratégie de travail du sol

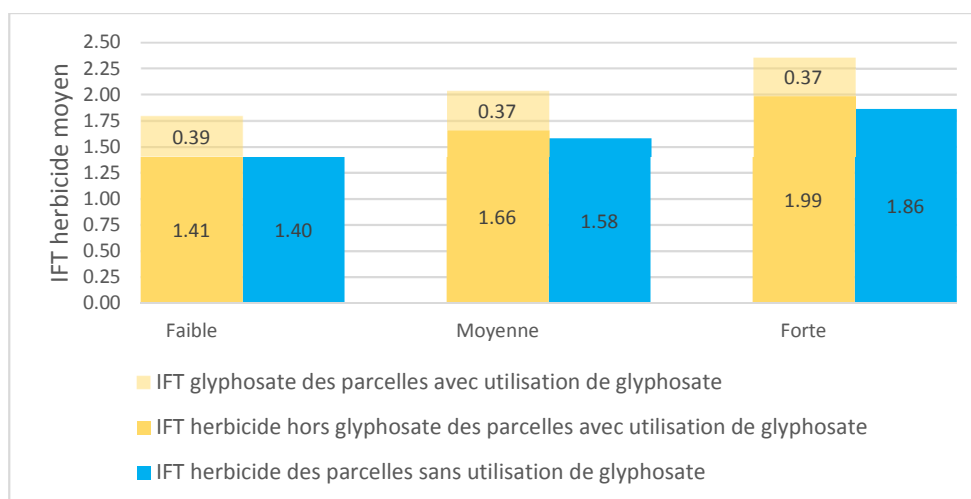


Figure 16 : IFT moyen par parcelle selon la pression adventice perçue de la parcelle

h. Taille des exploitations, stratégie de travail du sol et usage du glyphosate

Le fait que les exploitations de grandes tailles aient tendance à réduire le travail de leurs sols explique en partie le recours accru au glyphosate des exploitations de grande taille, mais pas seulement. Le Tableau 4 montre en effet que, à stratégie de travail du sol donnée, la taille de l’exploitation a un effet

propre très marqué sur l'utilisation de glyphosate. En effet, quelle que soit la stratégie de travail du sol, la part de surface traitée au glyphosate croît avec la taille de l'exploitation, par exemple de 4.8% (SAU =< 100 ha) à 19.3% (SAU > 350 ha) pour les exploitations en labour systématique ou de 62.8% SAU =< 100 ha) à 100.0% (SAU > 350 ha) pour les exploitations en semis direct.

Tableau 4: Part de surface traitée au glyphosate (%) selon la taille de l'exploitation et la stratégie de travail du sol

		Stratégie de travail du sol				
		Semis direct	Techniques culturales simplifiées	Labour occasionnel	Labour fréquent	Labour systématique
Taille des exploitations ; SAU	SAU =< 100 ha	62.7%	32.7%	23.9%	7.5%	4.8%
	100 ha < SAU =< 200 ha	91.0%	36.2%	22.8%	13.1%	8.6%
	200 ha < SAU =< 350 ha	86.3%	42.3%	24.6%	13.0%	9.5%
	350 ha < SAU	100.0%	54.4%	30.4%	25.6%	19.3%

Source : Calcul des auteurs à partir de PK-GCP_2017

Tableau 5: Répartition des surfaces traitées au glyphosate selon la taille de l'exploitation et la stratégie de travail du sol

			Stratégies de travail du sol				
			Sans labour	Labour occasionnel	Labour fréquent	Labour systématique	Toutes stratégies
Taille des exploitations, SAU	SAU =< 100 ha	Part dans la surface totale traitée au glyphosate (Part dans la surface totale)	7.8% (4.3%)	6.5% (5.2%)	3.9% (10.0%)	2.8% (11.1%)	21.0% (30.6%)
	100 ha < SAU =< 200ha	Part dans la surface totale traitée au glyphosate (Part dans la surface totale)	14.5% (7.0%)	8.2% (6.9%)	9.5% (14.0%)	4.8% (10.6%)	37.0% (38.6%)
	200 ha < SAU =< 350 ha	Part dans la surface totale traitée au glyphosate (Part dans la surface totale)	14.9% (6.2%)	6.2% (4.8%)	5.6% (8.2%)	2.6% (5.3%)	29.2% (24.6%)
	350 ha < SAU	Part dans la surface totale traitée au glyphosate (Part dans la surface totale)	7.4% (2.3%)	2.6% (1.6%)	1.9% (1.4%)	0.9% (0.9%)	6.8% (6.2%)
Toutes SAU		Part dans la surface totale traitée au glyphosate (Part dans la surface totale)	44.7% (19.8%)	23.4% (18.6%)	20.9% (33.7%)	11.1% (27.9%)	100% (100%)

Source : Calcul des auteurs à partir de PK-GCP_2017

Ces corrélations positives entre réduction du travail du sol, recours au glyphosate et taille des exploitations expliquent également la répartition des surfaces traitées au glyphosate présentée dans le Tableau 5. Cette répartition est concentrée sur les surfaces sans labour. 44.7% des surfaces traitées au glyphosate sont des surfaces non labourées, ces dernières ne représentant que 19.8% des surfaces

de grandes cultures. 68.1% des surfaces traitées au glyphosate ne sont pas labourées ou seulement occasionnellement.

Les surfaces des exploitations de plus de 350 ha de SAU qui sont labourées au plus occasionnellement ne représentent que 3.9% des surfaces de grandes cultures mais 10% des surfaces de grandes cultures traitées au glyphosate. A contrario, les surfaces des exploitations de moins de 100 ha de SAU qui sont labourées au moins fréquemment représentent 21.1% des surfaces de grandes cultures mais seulement 6.7% des surfaces traitées au glyphosate.

3.2 Situations potentiellement « délicates » en cas de retrait du glyphosate en inter-culture

Cette section vise à passer en revue l'ensemble des situations identifiées dans la littérature comme des « situations d'impasses » en cas de retrait du glyphosate. Il s'agit ici de présenter brièvement ces situations et d'examiner dans quelle mesure ces situations peuvent être identifiées à partir des données dont nous disposons.

Nous discuterons également des questions soulevées par le lien entre utilisation de glyphosate et taille des exploitations. En effet, le fait que les exploitations de grande taille, et plus particulièrement celles de très grande taille, utilisent plus de glyphosate suggère que le retrait du glyphosate serait potentiellement d'autant plus impactant que l'exploitation est grande.

a. Parcelles avec pression adventice élevée

Le glyphosate a un effet reconnu pour la lutte contre les flores adventices développées, en particulier celles contenant des adventices « difficiles ». Les notes de pression adventice données par les agriculteurs enquêtés nous permet de tenir compte de ces situations.

Le fait que ces notes soient plus des mesures des perceptions des agriculteurs que des mesures des pressions réelles importe peu ici. Les agriculteurs décident de leurs interventions de désherbage en fonction de leurs perceptions. Un biais potentiel de ces pressions adventices perçues est lié au fait que certains agriculteurs sont probablement plus tolérants en matière de salissement de leurs parcelles que d'autres. Ces différences d'appréciations peuvent être problématiques pour notre analyse si, par exemple, les agriculteurs en systèmes sans labour sont plus tolérants que ceux labourant leurs sols.

b. Systèmes culturaux simplifiés avec synchronisation des flores adventices spécifiques, glyphosate en outil spécifique

Les exploitations avec des systèmes culturaux peu diversifiés et donc avec des modes d'actions d'herbicides peu variés ont plus de risque de présenter des problèmes d'adventices spécifiques (dont le cycle biologique correspond à celui des espèces cultivées), voire de résistance de certaines adventices. Le glyphosate peut alors venir en appui d'herbicides devenus défaillants.

Par exemple, dans les régions où la part de céréales d'hiver est élevée dans la rotation, un traitement de pré-semis au glyphosate offre une défense efficace contre le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*), l'agrostide des champs, aussi appelé agrostide jouet du vent (*Apera spicaventi*) ou le ray-grass anglais (*Lolium perenne*), ces adventices présentant alors souvent une résistance à d'autres classes courantes de substances actives herbicides (inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS) (Moss, 2017 ; Wiese et al 2018).

Ce type de situation ne peut malheureusement pas être identifié par les données dont nous disposons. L'historique des parcelles (au-delà du précédent cultural) considérées dans l'enquête PK-GCP_2017 est trop mal renseigné pour être exploitable dans notre analyse.

c. Sols superficiels (et caillouteux), en lien avec l'agriculture de conservation des sols

Les sols superficiels sont souvent caillouteux (98% de surfaces des sols superficiels sont caillouteux dans notre échantillon). Ces sols ont trois inconvénients majeurs en termes de production agricole. Ils sont peu productifs, ne permettent de cultiver (avec des résultats technico-économiques satisfaisants) qu'un nombre limité d'espèces et sont coûteux et lents à travailler.

Le fait que ces types de sols soient peu propices au travail du sol se confirme dans nos données (Tableau 6). 16% des surfaces de grandes cultures sont sur des sols superficiels, avec 12% des surfaces labourées systématiquement qui sont sur sols superficiels, contre 24% des surfaces sans labour (dont 43% des surfaces en semis direct. Dans les plus grandes exploitations (plus de 275 ha), ces chiffres sont respectivement de 24% en moyenne, 19% pour les surfaces labourées systématiquement, 39% « sans labour » (dont 78% en semis direct). Ainsi si les grandes exploitations ont plus souvent des sols superficiels, elles ont beaucoup plus souvent recours au semis direct, les caractéristiques des sols n'expliquant que partiellement ce choix.

Tableau 6: Part de surface des sols très caillouteux ou/et superficiels par classe de taille de SAU des exploitations et/ou stratégie de travail du sol

		Classe de taille de la SAU des exploitations					
		Moins de 100 ha	De 100 à 150 ha	De 150 à 200 ha	De 200 à 275 ha	Plus de 275 ha	Toutes tailles de SAU
		Part de surface avec des sols très caillouteux					
Stratégie de travail du sol	Sans labour	34%	40%	44%	42%	56%	43%
	<i>dont semis direct</i>	35%	32%	27%	65%	88%	43%
	Labour occasionnel	35%	37%	44%	41%	48%	40%
	Labour fréquent	29%	39%	36%	33%	37%	34%
	Labour systématique	26%	31%	36%	37%	40%	32%
	Toutes stratégies de travail du sol	29.6%	36.7%	38.8%	38.0%	49.8%	36.4%
		Part de surface avec des sols superficiels					
Stratégie de travail du sol	Sans labour	18%	20%	21%	21%	39%	24%
	<i>dont semis direct</i>	30%	21%	20%	16%	78%	43%
	Labour occasionnel	15%	19%	21%	17%	16%	18%
	Labour fréquent	9%	17%	17%	15%	19%	14%
	Labour systématique	9%	11%	16%	11%	19%	12%
	Toutes stratégies de travail du sol	12%	16%	18%	16%	24%	16%
		Part de surface avec des sols très caillouteux et superficiels					
Stratégie de travail du sol	Sans labour	18%	19%	20%	21%	39%	24%
	<i>dont semis direct</i>	31%	21%	20%	16%	78%	43%
	Labour occasionnel	15%	19%	21%	17%	15%	17%
	Labour fréquent	9%	17%	17%	15%	19%	15%
	Labour systématique	9%	11%	15%	11%	19%	12%
	Toutes stratégies de travail du sol	11%	16%	18%	16%	24%	16%

d. Sols hydromorphes et/ou argileux, en lien avec les problématiques de jours agronomiques disponibles

Le passage d'outils de désherbage mécanique ou de travail du sol requiert que le sol soit ressuyé pour qu'il puisse assurer la portance et ne pas être déstructuré. Cette condition peut ne pas être remplie en cas de précipitations de fin d'automne ou de début de printemps sur des sols hydromorphes ou à texture très argileuse. Par exemple, travailler les sols à forte teneur en argile (dont le taux d'argile dépasse 37%), tels qu'on en trouve dans les marais humides de l'Ouest et en particulier dans certaines zones du marais poitevin (Gaubrie, Clavé et Ratier, 2020), est souvent difficile. Combinées à un climat océanique ces fortes teneurs en argile réduisent le nombre de jours agronomiques disponibles pour le travail du sol ou le désherbage mécanique en fin d'automne ou en début de printemps (Figure 17).



Figure 17 Sols de Marais Poitevin-Sud Vendée : jours disponibles issus de J-Dispo pour gérer mécaniquement le salissement en interculture des parcelles à précédent.

Note : blé dur et culture suivante : maïs. « Le décile 2 (points rouges) représente le nombre de jours disponibles au moins 4 années sur 5 (niveau de fréquence communément retenu en gestion de risque agronomique) calculé sur la séquence climatique 1999-2019. Des périodes sont favorables en septembre mais se réduisent fortement dès le mois d'octobre et le début du printemps n'ouvre quasiment aucune fenêtre de conditions favorables au moins 4 années sur 5 ». Source : Gaubrie, Clavé et Ratier, 2020.

Une stratégie reposant sur l'utilisation du glyphosate permet de contourner ce problème. Elle consiste à effectuer l'essentiel du travail du sol de manière anticipée, dans de bonnes conditions, et à éliminer au glyphosate les éventuelles repousses d'adventices juste avant les semis (CAN DEPHY, 2018 ; Gaubrie, Clavé et Ratier, 2020).

e. Préparation anticipée du lit de semence, pour des raisons économique et organisationnelle

La stratégie de préparation anticipée du lit de semence avec élimination juste avant les semis des adventices levées a également des avantages économiques et organisationnels. En effet, cette stratégie peut également être adoptée pour résoudre des problèmes organisationnels car elle permet de réduire les pics de travail dus, en particulier sur les grandes exploitations, à des assolements très spécialisés. Cette stratégie peut se traduire par des économies substantielles, notamment en matière d'équipement. Etaler les pics de travail permet de réduire les besoins de puissance de traction et

d'outils de grande dimension. Le retrait du glyphosate rendrait évidemment cette stratégie inapplicable.

Les données dont nous disposons ne permettent pas de révéler la mise en œuvre de cette stratégie de travail du sol, quelle que soit la raison pour laquelle elle est mise œuvre. Les problèmes soulevés par ce déficit d'information sont discutés lors de la présentation de notre méthode d'évaluation et de nos résultats.

f. Interactions entre la taille des exploitations, les sols « difficiles » et les stratégies de travail du sol peu intense

Il est possible que la plupart des problèmes liés au retrait du glyphosate discutés dans cette section soient amplifiés par la taille des exploitations. Ce point est discuté ici, en lien avec les questions soulevées par les pratiques sans labour et les « sols difficiles ». En effet, les résultats présentés ci-dessous montrent que les questions soulevées par la taille des exploitations, les « sols difficiles » et la réduction du travail du sol sont liées sans ambiguïté d'un point de vue statistique. Ces questions sont également logiquement liées d'un point de vue micro-économique.

i. Taille des exploitations et stratégie de travail du sol

Les résultats de statistique descriptive que nous avons obtenus à partir de l'enquête PK-GCP_2017 montrent que les deux principaux facteurs explicatifs de l'utilisation de glyphosate en inter-culture sont la stratégie de travail du sol mise en œuvre sur la parcelle considérée et la taille de l'exploitation à laquelle appartient cette parcelle.

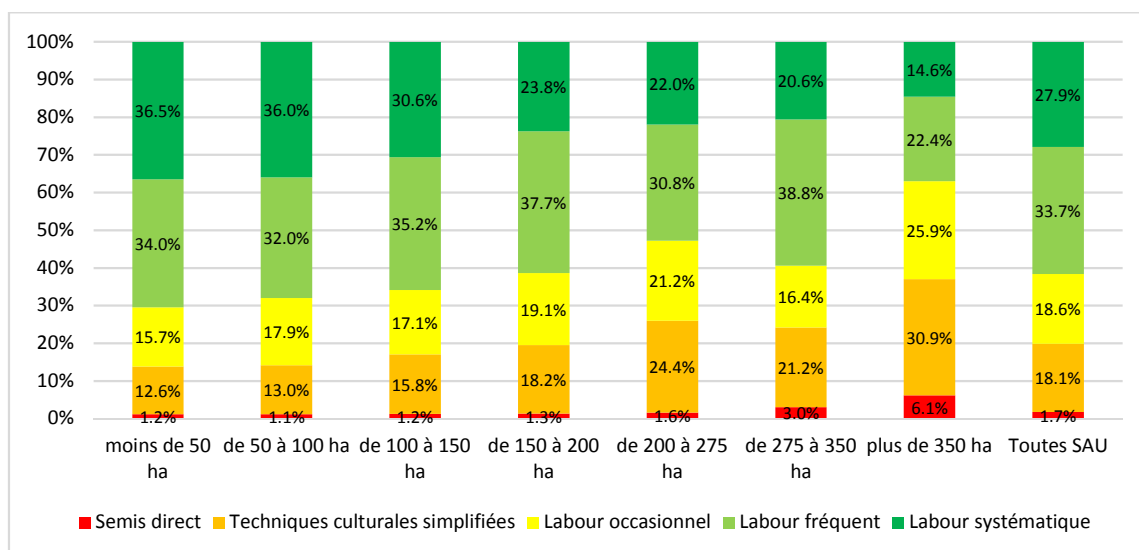


Figure 18 Répartition des stratégies de travail du sol par classe de taille des exploitations (% de surface)

La taille des exploitations et la stratégie de travail du sol sont également très liées d'un point de vue statistique. Les Figure 18 et Figure 19 montrent que les agriculteurs labourent d'autant moins leurs parcelles – *i.e.* pratiquent le semis direct ou le travail sans retournement de leurs sols (techniques culturales simplifiées) – qu'ils exploitent de grandes surfaces. Près de 37% des surfaces des exploitations dont la SAU dépasse 350 ha ne sont pas labourées. Cette part de surfaces non labourées

se situe entre 20 et 25% pour les exploitations dont la SAU est comprise entre 150 et 350 ha. Elle diminue jusqu'à moins de 14% pour les exploitations dont la SAU est inférieure à 50 ha.

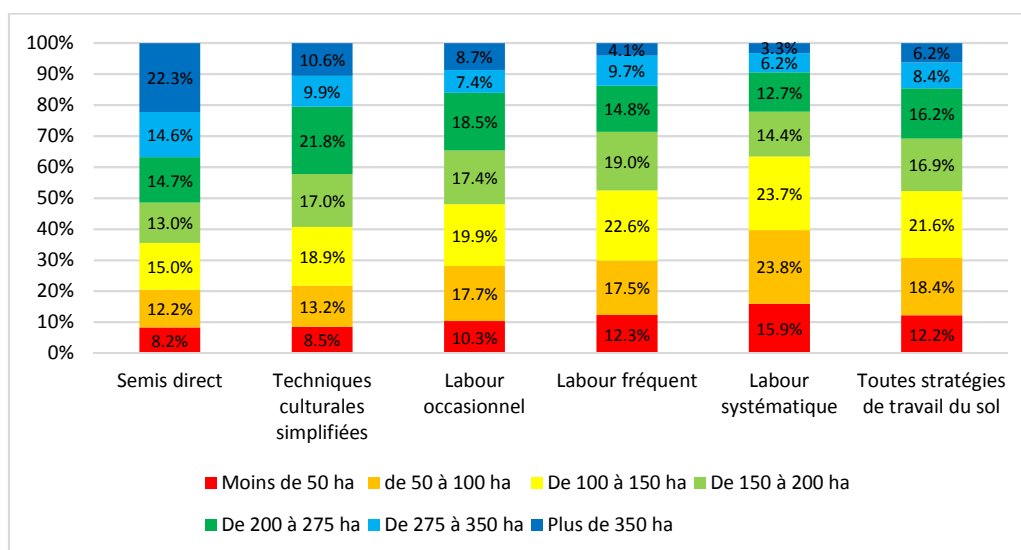


Figure 19 Répartition des tailles d'exploitation par stratégie de travail du sol (% de surface)

Combinée avec un effet de la taille des exploitations, la corrélation entre la taille des exploitations et la réduction du travail du sol implique qu'une large part des surfaces non labourées font partie d'exploitations de grande taille. Près de 47% des surfaces en semis direct font partie d'exploitations dont la SAU dépasse 275 ha, cette part monte à près de 75% en ajoutant les exploitations dont la SAU dépasse 150 ha. De manière similaire, plus 20% des surfaces en système sans labour font partie d'exploitations dont la SAU dépasse 275 ha, cette part montant à plus de 59% en ajoutant les exploitations dont la SAU dépasse 150 ha.

ii. Taille des exploitations, stratégie de travail du sol et sols difficiles

A ces relations entre stratégies de travail du sol et tailles d'exploitation s'ajoutent des relations avec la pierrosité et la profondeur des sols.

La stratégie de travail du sol est liée à la pierrosité du sol, ces deux variables étant elles-mêmes liées à la taille des exploitations. La fréquence de labour est négativement corrélée à la pierrosité du sol, cette dernière étant mesurée par la part de surface des sols « très caillouteux » dans la terminologie de la typologie des sols d'Arvalis. Par exemple, un peu moins de 27% des surfaces labourées systématiquement sont très caillouteuses sur les exploitations de moins de 100 ha. Un peu plus d'un tiers des surfaces non labourées ou labourées occasionnellement sur ces exploitations sont très caillouteuses. La part des surfaces de sols très caillouteux est plus élevée dans les exploitations de grande taille. Un peu moins de 30% des surfaces des exploitations de moins de 100 ha ont des sols très caillouteux. La part des sols très caillouteux se situe entre 37 et 39% pour les exploitations de 100 à 275 ha de SAU, elle est pratiquement de 50% pour les exploitations de plus 275 ha.

Les relations entre profondeur des sols d'une part, et stratégies de travail du sol et taille d'exploitation d'autre part sont encore plus marquées et ce d'autant plus que plus de 99% des sols superficiels (dans

la terminologie de la typologie des sols d'Arvalis) sont très caillouteux (contre seulement 20% des sols profonds ou semi-profonds).

La part des surfaces avec sols superficiels est corrélée négativement avec la fréquence de labour. Elle double lorsqu'on passe des parcelles systématiquement labourées à des parcelles en système sans labour pour toutes les classes de taille de SAU, de 9% à 18 % pour les exploitations de moins de 100 ha et de 19% à 39% pour les exploitations de plus de 275 ha. De manière générale, la part des surfaces de sols superficiels est d'autant plus grande que la SAU de l'exploitation est importante. Elle est de 11% pour les exploitations de moins de 100 ha et de 24% pour les exploitations de plus de 275 ha.

Tous ces éléments sont associés à une forte structuration spatiale des régions où se concentrent les exploitations de grande taille.

iii. Taille des exploitations, stratégie de travail du sol et sols difficiles : aspects économiques et organisationnels

Comme indiqué précédemment, même si elle a tendance à augmenter les dépenses d'herbicides, et de glyphosate en particulier, la réduction du travail du sol permet de diminuer la consommation de carburants et les charges de mécanisation et de main d'œuvre. En effet, remplacer des travaux du sol, des labours en particulier, chronophages et coûteux en équipement par des traitements au glyphosate, qui est très bon marché, peut être profitable, ce que l'étude s'attache à quantifier. La réduction du travail du sol réduit les besoins de main et aplanit les pics de travail des préparations de semis.

Les interventions de travail du sol doivent être mises en œuvre dans des conditions de sol favorables, plus exigeantes que celles requises pour des pulvérisations d'herbicides chimiques. Les fenêtres d'intervention sont donc généralement plus courtes pour les interventions de travail du sol que pour les pulvérisations. Combinées à l'aspect chronophage des interventions de travail du sol, les problèmes soulevés par l'étroitesse de certaines fenêtres d'intervention tendent à accroître les coûts des interventions de travail du sol, les débits de chantier pouvant être accélérés par l'acquisition et/ou la location de tracteurs plus puissants et/ou d'outils de grande dimension.

Les exigences associées aux interventions de travail du sol peuvent également être à l'origine de problèmes organisationnels pour les grandes exploitations. S'il est toujours possible, en théorie, d'acquérir/louer les agroéquipements et de recruter/louer la main d'œuvre nécessaire à la réalisation d'un certain nombre d'interventions sur une période de temps donnée, la mise en œuvre concrète de ces solutions « théoriques » peut s'avérer financièrement très coûteuse, et ce même en tenant compte de ce que les plus grandes exploitations peuvent bénéficier d'économies d'échelle (notamment pour l'équipement).

Enfin, le fait qu'une large part des surfaces à sols superficiels, et donc caillouteux, soit exploitée au sein de grandes exploitations en travail du sol réduit s'explique également dans une large mesure pour des raisons économiques. Les sols superficiels et caillouteux tendent à ralentir les travaux du sol et à augmenter le coût d'entretien et de remplacement des outils. Mais ils sont surtout peu productifs et ne permettent de cultiver avec succès qu'un nombre limité d'espèces. En tirer un revenu suffisant suppose de limiter au maximum les coûts de production, de main d'œuvre en particulier, et de disposer de surfaces suffisamment grandes. Il est possible que, combinée à la réduction du travail du sol, l'utilisation de glyphosate ait permis d'agrandir la taille des exploitations dans les régions à faible potentiel. Le tableau 6 montre que près de 88% des surfaces des exploitations de plus 250 ha de SAU en semis directs sont très caillouteux. Près de 78% des surfaces de ces exploitations sont à la fois

caillouteux et superficiels.¹¹ Les marges dégagées sur ces terres à faibles potentiels pourraient être significativement réduites par les coûts de travail du sol.

¹¹ Il convient cependant de noter que les chiffres concernant le semis direct reposent sur de petits effectifs, ce qui peut être source d'imprécision. Dans l'échantillon seules 37 parcelles en semis direct de l'échantillon appartiennent à des exploitations de plus de 275 ha de SAU. Ce chiffre varie entre 51 et 80 pour les autres classes de taille de SAU.

4. Coûts de transition, contraintes d'ajustement, et surcoûts non évalués

Rappelons tout d'abord ici qu'un changement de pratique réussi comporte, schématiquement, deux phases : une phase de transition, plus ou moins longue, et une phase d'utilisation maîtrisée de la nouvelle pratique. Durant la phase de transition, les agriculteurs expérimentent la nouvelle pratique et adaptent les modalités de sa mise en œuvre aux conditions prévalant sur leur exploitation. En cas de succès, cette phase de transition est suivie d'une phase d'utilisation maîtrisée de la nouvelle pratique. Cette phase débute dès que l'agriculteur maîtrise techniquement la nouvelle pratique et a réalisé les ajustements nécessaires (*e.g.*, équipement, système de production).

Conformément au cahier des charges de la demande à laquelle nous répondons (et compte-tenu des données dont nous disposons), les surcoûts que nous mesurons ne concernent que la phase d'utilisation maîtrisée des nouvelles pratiques. Nous rappelons également ici que (a) tous nos calculs sont annualisés et reportés à l'hectare et (b) **nos calculs incluent les surcoûts liés aux augmentations des charges de carburant, de main d'œuvre et de mécanisation (*i.e.*, charges d'investissement,¹² renouvellement, entretien et dépréciation des équipements)** potentiellement liés aux effets du retrait du glyphosate sur les pratiques de travail du sol et de désherbage des agriculteurs.

Les surcoûts subis chaque année durant la phase d'utilisation maîtrisée de la nouvelle pratique sont dus aux différences des coûts de mise en œuvre des nouvelles et ancienne pratiques. Ils sont également subis durant la phase de transition par les agriculteurs. Mais d'autres coûts s'ajoutent à ces surcoûts durant la phase de transition. Ces coûts sont, par nature, transitoires. Ils peuvent être importants mais sont difficilement mesurables et, encore plus, évaluables. Ces coûts sont présentés dans la première section de cette partie.

La seconde section de cette partie revient sur certains coûts de la phase d'utilisation maîtrisée de la nouvelle pratique, ceux que nous identifions évaluons mal, voire pas du tout.

4.1. Coûts de transition

Les coûts spécifiques de la phase de transition sont principalement de deux types. Il s'agit de coûts d'apprentissage et de coûts de transaction. A ces coûts s'ajoutent ensuite des problèmes spécifiques, généralement liés à certaines contraintes d'accès à certains « marchés ».

a. Coûts d'apprentissage

Tout d'abord, les changements de pratiques importants supposent des investissements immatériels (*e.g.*, des formations, des recherches et acquisition de conseil) et du temps de travail (*e.g.*, observations, mise en place d'essais) dédiés à l'adaptation de la pratique à adopter aux conditions de l'exploitation. Les changements importants peuvent nécessiter l'acquisition de connaissances agronomiques et la re-conception de certains éléments des systèmes de production et/ou de l'organisation du travail sur l'exploitation.

Les changements visant l'adoption de pratiques techniquement complexes et différent significativement des anciennes pratiques s'accompagnent souvent d'erreurs liées à un manque d'expérience avec la nouvelle pratique. Ces erreurs peuvent, par exemple, générer des pertes de

¹² Des prix indicatifs des équipements considérés sont reportés en Annexe.

rendement et/ou des surcoûts liés à la mise en œuvre de solutions de rattrapage. Les deux types de coûts évoqués ci-dessus sont spécifiques de phases d'apprentissage.

Dans le cas considéré, la nouvelle pratique, qui est composée d'un ensemble d'interventions de travail du sol et de pulvérisations d'autres herbicides que le glyphosate, est significativement plus compliquée à mettre en œuvre que l'ancienne, qui s'articule autour d'une ou plusieurs pulvérisations de glyphosate. En particulier, il existe de nombreux types d'interventions de travail du sol. Chacune requiert des outils spécifiques, ne peut être mise en œuvre que dans des conditions spécifiques et a des propriétés spécifiques sur chaque espèce d'adventices et sur les propriétés du sol. Déterminer la séquence d'interventions à réaliser en fonction de l'état du sol et de la flore adventice de la parcelle d'une part, et de la complémentarité de ces interventions d'autre part, nécessite de solides connaissances et de la réactivité.

b. Coûts de transaction

Aux coûts d'apprentissage s'ajoutent d'autres coûts – dits de « transaction », selon la terminologie de la micro-économie – liés au « démarrage » de la mise en œuvre des nouvelles pratiques. L'acquisition de nouveaux matériels s'accompagne inévitablement de démarches coûteuses, par exemple auprès des distributeurs de ces matériels et/ou des banques en cas d'emprunt. Des changements d'assolements peuvent supposer la recherche de nouveaux débouchés ou d'intrants. De la même manière, les ajustements des besoins en matière de main d'œuvre et de location de matériels ou de services sont coûteux à la fois en temps de travail et en argent.

En outre, plusieurs types de problèmes s'ajoutent aux coûts mentionnés précédemment. Ces problèmes sont liés à certaines contraintes d'ajustement

4.2 Contraintes d'ajustement

Tout d'abord, équiper l'exploitation en outils de travail du sol et en puissance de traction peut supposer un gros investissement initial. Cet investissement peut être difficile à réaliser pour des exploitations en situation financière délicate.

Ensuite, recruter de la main d'œuvre est également coûteux et parfois difficile. Nous n'avons pas les moyens de chiffrer les impacts de ces problèmes, en particulier parce que ne nous connaissons ni la quantité de main d'œuvre disponible ni le parc matériel des exploitations interrogées dans lors de l'enquête PK-GCP_2017.

Enfin, l'accès à certains services de travaux agricoles – qu'ils soient fournis par des CUMA ou des entrepreneurs – peut être limité localement. En effet, le recrutement de la main d'œuvre, voire la location de matériel et/ou de services de travaux par tiers, pose des problèmes spécifiques. La plupart des interventions de travail du sol sont saisonnières. Elles sont concentrées sur les périodes précédant les semis d'automne et de printemps et les travaux du sol nécessitent des compétences de tractoriste. Enfin, comme le montrent les Figure 20 et Figure 21, la tendance actuelle est clairement à la réduction du travail du sol, et plus particulièrement du labour, dans le secteur des grandes cultures, avec une nette accélération depuis la seconde moitié des années 2000. Le retrait du glyphosate pourrait amener de nombreux agriculteurs (ce que suggère l'enquête inter-ITAs de 2019), voire certaines CUMA et entreprises de travaux agricoles, à se rééquiper et à recruter de la main d'œuvre.

Le fait que 90% des surfaces de grandes cultures étaient labourées jusqu’au milieu des années 2000 tend à prouver que la mise en œuvre de stratégies de travail du sol relativement intenses est concrètement réalisable.¹³ Cette observation suggère également que nombre d’agriculteurs n’ont que récemment réduit l’intensité de leur stratégie de travail du sol. Naturellement, l’expérience du travail du sol de ces agriculteurs diminue sensiblement l’importance des questions problèmes d’apprentissage en cas de ré-intensification de la stratégie de travail du sol.

Enfin, étant donnée la tendance actuelle vers la réduction du travail du sol, il est probable qu’un nombre significatif d’agriculteurs soient dans une phase de transition. Par exemple, il est possible que ceux identifiés comme pratiquant une stratégie de travail du sol avec labour occasionnel soit en transition vers les techniques culturales simplifiées. Les observations correspondantes sont des sources d’erreur potentielle pour la mesure des effets que nous mettons en œuvre. D’une part, ces observations sont potentiellement mal classées dans la typologie de stratégie de travail du sol que nous utilisons. D’autre part, l’hypothèse selon laquelle nos calculs sont basés sur la comparaison de pratiques d’agriculteurs en phase « d’utilisation maîtrisée » de ces pratiques n’est pas nécessairement valide pour ces observations. Nous considérons néanmoins que ces sources d’erreur ont un impact limité sur nos calculs. Les stratégies de travail du sol avec labour occasionnel et avec labour fréquent couvrent chacune des fréquences de labour relativement étendues – 1 ou 2 labours sur 6 ans pour le labour occasionnel, 3 à 5 labours sur 6 ans pour le labour fréquent – limitant ainsi les risques d’erreur d’imputation. De plus, les agriculteurs en phase de transition volontaire vers des stratégies de travail du sol à intensité réduite ont eu le temps de préparer leur changement de pratique, ce qui limite certainement les problèmes liés au défaut de maîtrise de la pratique en cours d’adoption.

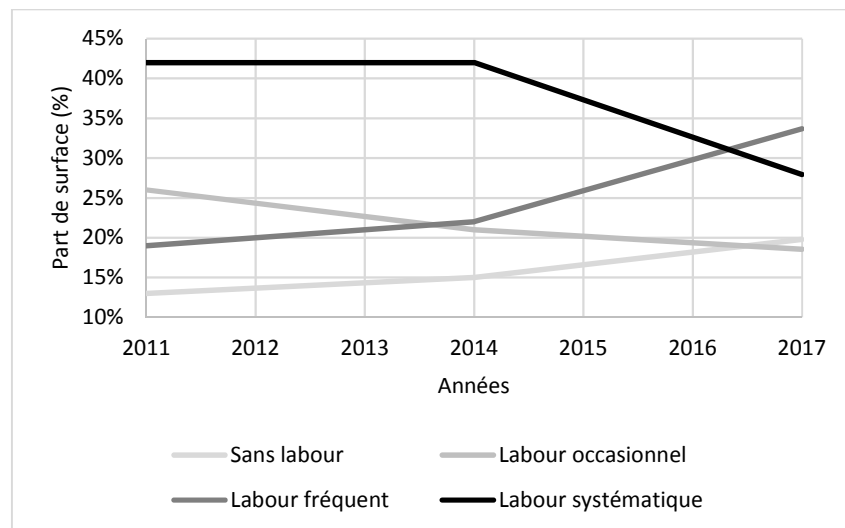


Figure 20 Parts de surface de grandes cultures par stratégie de travail du sol selon les enquêtes PK-GC de 2011, 2014 et 2017

Note : les chiffres antérieurs à 2017 nous ont été transmis par Remy Ballot.

¹³ Et ce, même si la taille des exploitations de grandes cultures a augmenté sur la période.

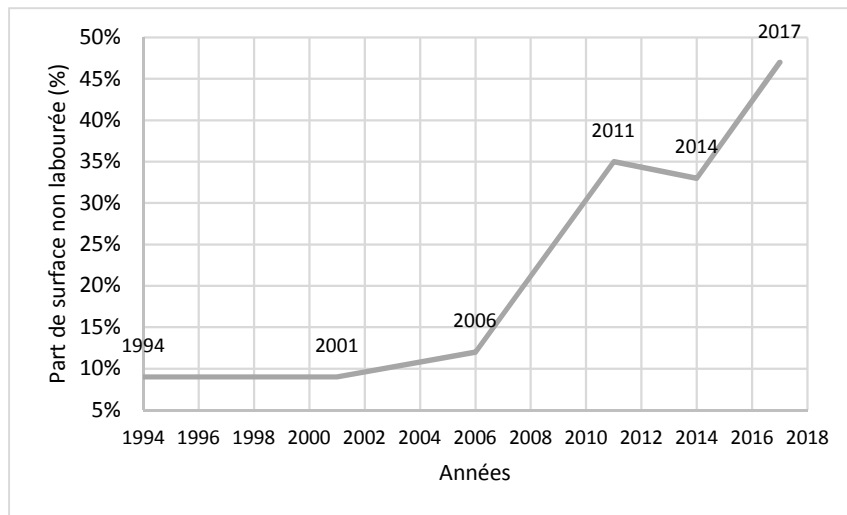


Figure 21 Parts de surface de grandes cultures non labourées avant les semis selon les enquêtes PK-GC de 1994, 2001, 2006, 2011, 2014 et 2017

Note : les chiffres antérieurs à 2017 nous ont été transmis par Remy Ballot.

4.3 Les surcoûts de la phase de d'utilisation maîtrisée liés aux changements d'assolement

Le retrait du glyphosate pourrait amener certains agriculteurs à modifier leurs assolements pour trois raisons principales. (i) Le retrait du glyphosate induirait probablement une intensification de la stratégie de travail du sol de nombre d'agriculteurs. Diversifier l'assolement permet, tout au moins dans une certaine mesure, d'écarter les pics de travail du sol en répartissant les besoins de main d'œuvre et d'équipement sur des périodes d'intervention plus étalées. (ii) La mise en œuvre sur longue période de systèmes de production très spécialisés peut induire des situations difficiles en matière de flore adventice. Dans ces situations, l'utilisation de glyphosate peut venir en appui des herbicides en culture et du travail du sol. Une stratégie possible dans ce cas est de diversifier la rotation. Alternier des cultures à cycles biologiques variés (e.g., cultures d'hiver et de printemps) empêche la sélection de la flore adventice sur des espèces dont les cycles sont synchronisés avec ceux des cultures de la rotation. En diminuant la pression adventice de manière prophylactique, les systèmes diversifiés réduisent les besoins en matière de contrôle des adventices. La diversification des rotations pourrait également être une option pour les agriculteurs préférant éviter de travailler leurs sols, quelle qu'en soit la raison. Dans ces deux premières situations, le retrait du glyphosate va être favorable à la transition agroécologique. (iii) Le dernier cas possible où le retrait du glyphosate pourrait impacter les choix d'assolement des agriculteurs est de nature différente. Il s'agit des cas où une culture ne pourrait plus être produite faute d'option de désherbage suffisamment efficace.

Nous n'avons pas l'information nécessaire pour examiner en détail ces questions. Néanmoins, il est très probable que le retrait du glyphosate aurait un impact d'ampleur limité sur les choix d'assolement de la plupart des agriculteurs, en tous cas pour ce qui concerne les cultures majeures. En effet, le travail du sol est une alternative efficace à l'utilisation de glyphosate pour le contrôle des adventices. C'est d'ailleurs la principale hypothèse sur laquelle reposent les calculs présentés ici. De fait, le contrôle des adventices peut être assuré – et l'est en réalité d'après nos données – par du travail du sol et avec peu ou pas de glyphosate dans tout type de système de production. Il est donc peu probable que la substitution du glyphosate par du travail du sol induise des changements d'assolement d'ampleur

significative, que ce soit pour mobiliser le levier de diversification des assolements et des rotations ou parce que la production de certaines cultures deviendrait problématique sans glyphosate. En particulier, nos résultats montrent que l'utilisation de glyphosate est bien plus liée à la stratégie de travail du sol qu'aux espèces cultivées (ou aux précédents culturaux).

5. Évaluation des effets du retrait du glyphosate

Nos calculs des effets de l'interdiction du glyphosate s'appuient (*a*) sur l'information, d'une très grande richesse, des données de l'enquête PK-GCP_2017 et (*b*) sur une approche originale combinant la conception de scénarios et la mise en œuvre de méthodes d'évaluation statistiques des effets de ces scénarios.

L'objectif de l'étude est contrefactuel. Il s'agit d'estimer les surcoûts qui seraient ou pourraient être subis par les agriculteurs utilisateurs de glyphosate en cas de retrait de cet herbicide. Notre approche est essentiellement basée sur la comparaison statistique, selon une logique « toutes choses égales par ailleurs » des choix en matière de contrôle des adventices et de gestion de l'état du sol des agriculteurs utilisateurs de glyphosate d'une part, et des agriculteurs non utilisateurs de glyphosate d'autre part.

D'un point de vue conceptuel, notre approche combine (*i*) la définition de scénarios décrivant des réactions possibles des choix des agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de gestion de l'état du sol en cas de retrait du glyphosate et (*ii*) des calculs statistiques permettant l'évaluation technico-économique des changements de pratique décrites par les scénarios, à partir de méthodes à l'efficacité éprouvée dans de nombreux domaines de la statistique appliquée (voir, *e.g.*, Imbens et Rubin, 2015 ; Li, Morgan et Zaslavsky, 2018)

Nous présentons brièvement ici les avantages et inconvénients de notre approche en la comparant à celles qui ont déjà été employées pour la mesure des effets d'un retrait du glyphosate.

Les effets de l'interdiction des herbicides, et du glyphosate en particulier, ont été estimés à partir d'approches combinant programmation mathématique et modélisation bio-économique (*e.g.*, Böcker et Finger, 2018a, 2018b ; Böcker, Britz et Finger, 2018a, 2018b). Ces approches consistent (*i*) à considérer l'ensemble des alternatives au glyphosate pour la préparation des semis d'une culture donnée, à évaluer leur coût et leurs impacts potentiels sur la flore adventice et le rendement de la culture considérée (modélisation bio-économique) puis (*ii*) à déterminer l'option – c'est-à-dire une alternative ou une combinaison d'alternatives – la plus rentable (programmation mathématique).

Ces approches sont difficiles à mettre en œuvre dans notre cas d'étude. Tout d'abord, elles reposent sur un corpus de connaissances et de données fines quant à la mise en œuvre pratique des alternatives à l'utilisation de glyphosate. Ensuite, les modèles bio-économiques permettant d'évaluer les effets de la mise en œuvre de alternatives considérées ne sont pas disponibles pour toutes les situations rencontrées. Les modèles bio-économiques sont en outre délicats à calibrer, tout comme les paramètres du problème de programmation mathématique dans lequel ces modèles s'insèrent. Enfin, ces approches mobilisent essentiellement des « connaissances expertes » et livrent des résultats uniquement fondés sur cette information. Bien qu'ils aient les défauts de résultats « de nature statistique », les résultats obtenus à partir de l'approche choisie reposent sur l'observation de choix réels d'agriculteurs. Ils sont donc ancrés sur des alternatives crédibles à l'utilisation de glyphosate. De fait, les approches statistiques et de programmation mathématique peuvent apporter des éclairages complémentaires sur la question considérée.

Les motivations de l'usage de glyphosate en inter-culture ont récemment été analysées par des méthodes de questionnement direct d'agriculteurs, *via* une analyse conjointe réalisée en Allemagne en l'occurrence, par Danne, Musshoff et Schulte (2019). Les conclusions de cette étude sont cohérentes avec celles de la nôtre : l'usage de glyphosate est un élément important de la stratégie de contrôle des adventices des exploitations à stratégie de travail du sol réduit, et plus particulièrement

pour les grandes exploitations. De la même manière, les résultats obtenus *via* les approches combinant programmation mathématique et modèles bio-économiques sont cohérents avec les nôtres. Les surcoûts liés au retrait du glyphosate sont principalement liés à une intensification du travail du sol, avec des effets limités sur l'utilisation d'autres herbicides que le glyphosate et sur les rendements.

La suite de cette partie est organisée comme suit. Dans un premier temps, nous présentons la nature des coûts que nous mesurons, en précisant ce qu'ils incluent ou non. Nous décrivons ensuite les scénarios que nous considérons et les méthodes statistiques que nous employons. Enfin, nous présentons nos résultats d'estimation.

5.1 Démarche générale de la mesure des effets du retrait du glyphosate

Le choix de l'architecture générale de notre approche pour l'évaluation des surcoûts que pourraient subir les agriculteurs en cas de retrait du glyphosate repose sur plusieurs constats qui sont décrits ci-dessous, en même temps que leurs conséquences pour notre analyse.

a. Constat 1. L'utilisation de glyphosate en inter-culture n'est qu'un des moyens de contrôle des adventices dont disposent les agriculteurs

Les agriculteurs disposent d'autres herbicides chimiques, utilisables en inter-culture ou en culture selon les produits et les cultures, et de techniques de désherbage mécanique, là encore mobilisables en inter-culture ou en culture, selon les techniques et les cultures (Figure 22). De fait, la principale alternative à l'utilisation du glyphosate en inter-culture est le travail du sol durant l'inter-culture, ce qu'illustrent clairement nos résultats sur les relations entre stratégie de travail du sol et utilisation de glyphosate.

Examiner ce que feraient ou pourraient faire les agriculteurs utilisant du glyphosate en cas de retrait de ce produit suppose de tenir compte, simultanément, de leurs choix en matière de travail du sol et de désherbage.

b. Constat 2. L'utilisation de glyphosate en inter-culture répond à plusieurs types de besoin, souvent simultanément

L'utilisation de glyphosate en inter-culture permet de contrôler les adventices, les repousses de cultures, les couverts d'inter-culture. Elle peut également viser à détruire ou à affaiblir des prairies. Elle peut venir en appui des autres techniques de désherbage dans les situations de flores adventices devenues difficiles (*e.g.*, composées de vivaces, résistantes aux autres herbicides). L'utilisation de glyphosate peut également être une conséquence indirecte de choix stratégiques portant non pas sur le contrôle des adventices mais sur la gestion des sols, comme la réduction du travail du sol en général et de la fréquence des labours en particulier.

Chercher à déterminer les motivations des utilisations de glyphosate reportées dans nos données, et par conséquent les alternatives potentielles à cette utilisation, est concrètement impossible.

La seule option envisageable pour estimer ce que feraient ou pourraient faire les agriculteurs utilisant du glyphosate en cas de retrait de ce produit consiste à examiner ce que font les agriculteurs n'utilisant pas ou utilisant peu de glyphosate « dans des conditions équivalentes ».

Nous définirons précisément par la suite ce que nous entendons par « conditions équivalentes ».

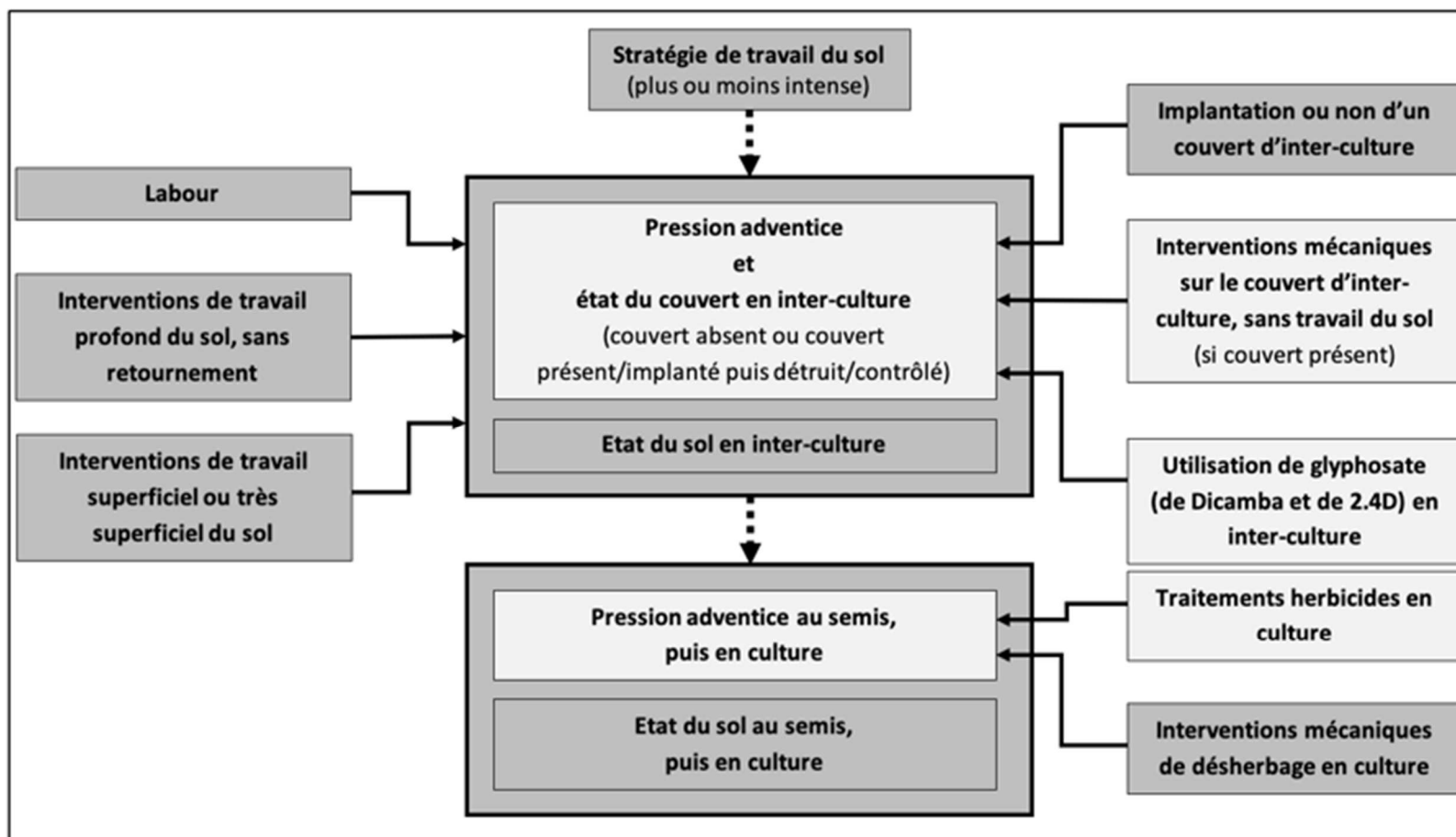


Figure 22 Rôle des interventions mécaniques et des traitements herbicides chimiques sur le contrôle des adventices et gestion de l'état du sol

c. Constat 3. Les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol sont nombreux et imbriqués

Comme indiqué précédemment les agriculteurs disposent de nombreuses options – chimiques, mécaniques ou agronomiques¹⁴ – pour contrôler les adventices et gérer l'état des sols de leurs parcelles. Il est donc concrètement impossible de prédire les réactions des agriculteurs. Il est donc impossible de prédire, tout au moins entièrement, ce que feraient les agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de gestion de l'état des sols en cas de retrait du glyphosate (et ce même sans tenir compte, pour l'instant, de ce que les choix potentiels des agriculteurs dépendent de nombreux facteurs). En revanche, il est possible d'estimer ce que pourraient faire les agriculteurs dans le cadre de scénarios prédéfinis.

Notre meilleure option pour estimer les surcoûts subis par les agriculteurs en cas de retrait du glyphosate passe par des scénarios définissant les stratégies de travail du sol que pourraient adopter les agriculteurs sans accès au glyphosate. Evidemment, les stratégies de travail du sol considérées dans les scénarios sont celles employées dans l'analyse de statistique descriptive présentée dans la partie précédente : semis direct, techniques culturales simplifiées, labour occasionnel, labour fréquent ou labour systématique.

L'idée sous-jacente à la conception de nos scénarios est que nous (a) « forçons » les agriculteurs à adopter une stratégie de travail du sol donnée sans glyphosate et (b) estimons l'impact de ce changement forcé sur leurs choix d'interventions de travail du sol et de désherbage, dans les limites définies par la stratégie de travail du sol sans glyphosate qu'il est contraint d'adopter.

Un scénario est défini par un couple composé d'une « situation de départ » et d'une situation d'arrivée ». La situation de départ est caractérisée par la stratégie de travail du sol actuelle de l'agriculteur considéré dans le scénario. La situation d'arrivée est caractérisée par la stratégie de travail du sol que le scénario contraint l'agriculteur considéré à adopter dans l'éventualité du retrait du glyphosate. La situation de départ peut être « avec ou sans utilisation de glyphosate » mais la situation d'arrivée est, évidemment, « sans utilisation de glyphosate ».

d. Constat 4. Les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol relèvent d'une logique pluriannuelle

La dynamique des populations d'adventices est relativement lente et persistante. Certaines adventices sont vivaces, les stocks de graines sont difficiles à détruire et ces dernières peuvent être viables sur de très longue période. De fait, la flore adventice peut se développer relativement rapidement mais s'avère difficile à éliminer.¹⁵ De manière similaire, les propriétés – physico-chimiques ou biologiques - des sols peuvent se dégrader rapidement mais ne se restaurent que lentement. La plupart des décisions de travail du sol et de désherbage sont donc prises dans une logique pluriannuelle.¹⁶

¹⁴ Des options électriques ou thermiques, voire manuelles, existent également. Ces dernières sont très peu employées et n'ont pas été considérées ici.

¹⁵ Deux propos d'agriculteurs rapportés par C. Lamine dans son analyse sociologique d'agriculteurs dans une démarche de réduction de l'utilisation de pesticides (Lamine, 2011) illustrent cet état de fait : « Le désherbage quand on loupe une année, on a pour quelques années après à s'en rappeler » et « [les mauvaises herbes,] une fois que c'est parti, c'est parti ». Le fait que les herbicides soient utilisés pour contrôler la flore adventice pour la campagne en cours et les campagnes est un aspect qui distingue nettement l'utilisation d'herbicides de celle des autres pesticides.

¹⁶ Ceux mis en œuvre en inter-culture en particulier.

En particulier, les effets de l'utilisation de glyphosate permettent de contrôler les adventices lors de la campagne en cours et, pour cette même raison, pour les campagnes à venir. De ce point de vue, lorsqu'on constate que 24% des surfaces labourées occasionnellement sont traitées au glyphosate, il est certainement plus judicieux de considérer que les agriculteurs pratiquant le labour occasionnel traitent leurs parcelles au glyphosate une année sur quatre (selon l'état de la flore adventice et des configurations d'inter-culture induites par leurs rotations) plutôt que de considérer qu'un agriculteur pratiquant le labour occasionnel sur quatre a recours au glyphosate. Il y a vraisemblablement peu d'agriculteurs « non utilisateurs », sans qu'on soit en mesure en l'état de le quantifier sur la base des données de l'enquête PK. Ceux qui y recourent le plus sont ceux qui travaillent moins le sol et qui, par leurs rotations, ont des configurations d'inter-cultures pour lesquelles l'utilisation de glyphosate est appropriée (e.g., après colza) et qui reviennent souvent.

Néanmoins, il est vraisemblable que l'utilisation de glyphosate soit d'autant plus régulière que les agriculteurs ont réduit l'intensité du travail de leur sol, avec des traitements dépendant des configurations des inter-cultures de la rotation culturale. A l'inverse, l'utilisation de glyphosate dans les systèmes avec labour plutôt fréquent est plus probablement le fait d'un nombre plus réduit d'agriculteurs, certains n'utilisant du glyphosate que pour gérer une situation accidentelle (e.g., pour rattraper un désherbage raté), d'autre l'utilisant de manière plus régulière (e.g., pour anticiper le travail du sol en raison de fenêtres d'intervention trop réduites au moment des semis ou pour tenter de contenir une flore adventice devenue très « difficile »).

Le caractère pluriannuel des décisions de désherbage et de travail a des conséquences à la fois sur le choix de nos scénarios et sur la manière dont nous évaluons leurs effets.

i. Crédibilité des choix des scénarios et intensité du travail du sol

Notre principale hypothèse de travail est que le travail du sol peut se substituer efficacement au glyphosate pour le contrôle des adventices, tout au moins pour la plupart des exploitations de grandes cultures. Aussi, les types de stratégie de travail de sol qui caractérisent les situations d'arrivée de nos scénarios doivent être caractérisés par un travail du sol suffisant pour assurer un contrôle satisfaisant des adventices sans glyphosate.

Évidemment, la crédibilité des scénarios telle qu'elle est définie ici repose sur l'état actuel des connaissances et des pratiques en matière de désherbage et de travail du sol. De ce point de vue, des scénarios dans lesquels les agriculteurs resteraient sur des stratégies de travail du sol sans labour sont peu crédibles en cas de retrait du glyphosate. Notre « scénario général de référence », caractérisé par des situations d'arrivée avec labour au moins fréquent pour toutes les exploitations, a été choisi en suivant cette logique, pour des raisons détaillées plus bas.

Les scénarios crédibles décrivant les choix potentiels des agriculteurs en cas de retrait du glyphosate sont ceux dont la « situation d'arrivée » est caractérisée par des stratégies de travail du sol dans le cadre desquelles l'utilisation de glyphosate est peu fréquente.

ii. Evaluation des scénarios à partir des choix observés sur les parcelles traitées ou non au glyphosate

Le caractère pluriannuel des décisions de désherbage et de travail du sol a également des conséquences sur la manière d'évaluer les effets de nos scénarios. En effet, il ne suffit pas de comparer

les choix de désherbage et de travail du sol sur les parcelles traitées au glyphosate à ceux de parcelles non traitées au glyphosate pour évaluer les effets de nos scénarios.

Par exemple, en ne considérant ici que des parcelles non traitées au glyphosate avec des sols et des configurations d'inter-cultures proches, nos calculs montrent que les interventions de travail du sol sont plus nombreuses et plus profondes sur les parcelles conduites selon une stratégie à travail du sol intense (e.g., avec labour fréquent) que sur les parcelles et conduites selon une stratégie à travail du sol réduit (e.g., avec labour occasionnel ou en techniques culturales simplifiées).

Interdire l'utilisation de glyphosate et amener les agriculteurs à intensifier leur stratégie de travail du sol les « forcera » à intensifier leur travail du sol sur toutes les parcelles pour une année donnée

Même les stratégies de travail du sol avec labour occasionnel bénéficient certainement des effets retardés de traitements au glyphosate qui, selon nos données, reviennent en moyenne tous les quatre ans. Il est donc vraisemblable que les interventions de travail du sol, en particulier les plus profondes, seraient plus fréquents dans le cadre des stratégies de travail du sol avec labour occasionnel sans glyphosate qu'ils ne le sont dans le cadre des stratégies de travail du sol avec labour occasionnel actuelles, c'est-à-dire avec glyphosate. Dit autrement, les choix actuels des agriculteurs en matière de contrôle des adventices sur les parcelles labourées occasionnellement ne décrivent pas les choix, sur ces mêmes parcelles, d'agriculteurs qui n'auraient pas accès au glyphosate.

e. Constat 5. Les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol sont impactés par de nombreux facteurs

De nombreux facteurs impactent les décisions de désherbage et de travail du sol des agriculteurs. A l'échelle d'une parcelle, ces facteurs sont relatifs aux caractéristiques des sols, au climat, à l'état de la pression adventice, aux caractéristiques de l'inter-culture observée et aux caractéristiques de l'exploitation à laquelle appartient cette parcelle.

Nombre de ces facteurs sont renseignés dans les données des enquêtes « Pratiques culturales ». Pour l'enquête PK-GCP_2017, nous disposons des informations suivantes :

- Caractéristiques pédologiques : profondeur du sol, pierrosité, hydromorphie, texture),
- Localisation géographique que nous avons retenu à l'échelle de la région climatique définie par le SSP/Agreste,
- SAU et orientation technico-économique agrégée (spécialisation en grandes cultures, spécialisation en élevage, autres spécialisations) de l'exploitation dont fait partie la parcelle enquêtée,
- Etat de salissement en culture tel que perçu par l'agriculteur,
- Caractéristiques de l'inter-culture considérée : espèce implantée, présence d'un couvert implanté, précédent cultural, dates d'implantation de la culture et de récolte du précédent, historique de labour sur 6 ans incluant l'année d'enquête.

Puisque l'évaluation des effets de nos scénarios repose exclusivement sur la comparaison de choix de désherbage et de travail du sol concernant des parcelles différentes de notre échantillon, il convient de tenir compte des effets des facteurs impactant ces choix, de sorte à « ne comparer que ce qui est comparable ».

Ce constat a influencé de manière décisive notre choix de méthode pour la mesure statistique des effets de nos scénarios.

5.2. Choix des scénarios généraux pour l'évaluation du retrait du glyphosate, et démarche générale de leur évaluation

Cette section définit les scénarios que nous définissons pour l'évaluation des effets possibles du retrait du glyphosate et les principales étapes du calcul des effets de ces scénarios.

a. « Scénarios » et « scénarios généraux »

Un scénario est défini par une situation initiale et une situation finale. La stratégie de travail du sol (*e.g.*, semis direct, avec labour occasionnel) et l'utilisation ou non de glyphosate définit la situation initiale du scénario considéré. La situation finale d'un scénario est toujours sans utilisation de glyphosate et définit la stratégie de travail du sol que nous « forçons » l'agriculteur à adopter. La stratégie de la situation d'arrivée est toujours caractérisée par une intensité de travail du sol au minimum équivalente à celle de la situation de départ (*e.g.*, avec labour fréquent). Dit autrement, nos scénarios « forcent » les agriculteurs soit à maintenir leur stratégie de travail du sol, soit l'intensifier.

Notre évaluation des effets du retrait du glyphosate s'articule ensuite autour de « scénarios généraux ». Un scénario général est un ensemble de scénarios qui couvre l'ensemble de la population des producteurs de grandes cultures. Il définit les stratégies de travail du sol que nous « forçons » les agriculteurs à adopter pour chaque catégorie d'agriculteurs.

Notre évaluation s'articule autour d'un « scénario général de référence » et nous définissons deux scénarios généraux alternatifs de sorte à analyser des résultats que nous obtenons pour notre scénario général de référence.

b. Scénario général de référence du retrait du glyphosate : stratégies de travail du sol avec, au minimum, labour fréquent

Notre scénario général de référence, sur lequel nous fondons l'essentiel de nos calculs des surcoûts liés au retrait du glyphosate, « force » l'adoption d'une stratégie de travail du sol avec labour au minimum fréquent en cas de retrait du glyphosate. Ce scénario général de référence suppose donc que les parcelles en semis direct, techniques culturales simplifiées ou labour occasionnel passent en labour fréquent en cas de retrait du glyphosate. Dans ce scénario général, les parcelles en labour fréquent restent en labour fréquent et celles en labour systématique restent en labour systématique (Tableau 7).

Nous avons choisi ce scénario de référence en raison des spécificités des parcelles labourées fréquemment dans notre échantillon. La principale raison de ce choix tient au fait que la plupart des parcelles de notre échantillon qui ne sont pas déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate (*e.g.*, en semis direct avec glyphosate ou en labour occasionnel sans glyphosate) ont des caractéristiques proches de parcelles qui sont déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate.

Notre scénario général de référence est crédible dans le sens où la plupart des parcelles de notre échantillon pourraient vraisemblablement être travaillées en labour fréquent sans glyphosate, et ce quelle que soit l'exploitation à laquelle ces parcelles appartiennent. L'idée sous-jacente ici est la suivante. Le fait que des parcelles soient actuellement conduites en labour fréquent sans glyphosate suggère que cette stratégie permet de contrôler les adventices de manière satisfaisante. Aussi, toute parcelle qui a des caractéristiques proches de parcelles actuellement conduites en labour fréquent

sans glyphosate pourrait être conduite selon la même stratégie et avec un contrôle également satisfaisant des adventices.

Tableau 7 : Scénario général de référence

		Situation de départ (avec ou sans glyphosate)						
		SD	TCS	Labour occasionnel	Labour fréquent	Labour systématique		
Nb total de parc. dont <i>avec glyphosate</i> <i>sans glyphosate</i>		300	2663	3080	5769	5530		
		244	1040	714	759	419		
		58	1623	2366	5010	5111		
Part de surface		1.7%	18.1%	18.6%	33.7%	27.9%		
Part de surf. traitée au glyphosate		85.8%	39.3%	24.2%	11.9%	7.6%	Nb parc.	Part de surf.
Situation d'arrivée (sans glyphosate)	Labour occa.						2366	14.1%
	Labour fréq.	$N_1=300$ vs $N_0=5010$	$N_1=2663$ vs $N_0=5010$	$N_1=3080$ vs $N_0=5010$	$N_1=5769$ vs $N_0=5010$		5010	29.7%
	Labour syst.					$N_1=5530$ vs $N_0=5111$	5111	25.8%

Note : N_0 et N_1 indiquent respectivement les tailles des échantillons dans la situation d'arrivée (N_0) et la situation de départ (N_1), ces termes sont définis dans la suite.

Indication de lecture : Pour le scénario général de référence, la première colonne illustre la situation où les agricultures actuellement en SD ($N_0=300$) seraient forcés d'adopter une stratégie de travail du sol avec labour Fréquent ($N_1=5010$)

(i) La stratégie de travail du sol en labour fréquent est la stratégie de travail du sol la plus fréquemment mise en œuvre, avec 33.7% des surfaces. Elle implique un labour de 50% des surfaces qui ne sont pas en labour systématique (27.1% des surfaces).

(ii) Seules 11.9% des surfaces en labour fréquent sont traitées au glyphosate en inter-culture. Il n'y a que les surfaces en labour systématique qui le soient moins (7.6%). Les parts de surface en labour occasionnel traitées au glyphosate sont de 24.2%, soit plus du double des surfaces traitées en labour occasionnel.

(iii) Le profil des interventions de désherbage et de travail du sol de la stratégie de travail du sol en labour fréquent est quasiment identique à celui des surfaces en Agriculture Biologique, avec simplement une intervention de travail du sol très superficiel en moins. En outre, nos données ne montrent pas vraiment de différences notables dans les assolements et les couples culture/précédent en Agriculture Biologique *versus* en conventionnel. Il y a cependant un peu plus d'éleveurs en Agriculture Biologique (12% des surfaces en conventionnel *versus* 22% en Agriculture Biologique) et il y a très peu de très grandes exploitations en AB. Etant employée (à une intervention près) en

Agriculture Biologique, la stratégie de travail du sol en labour fréquent est donc tout-à-fait crédible en tant que stratégie de travail du sol permettant de contrôler les adventices sans glyphosate.¹⁷

Tableau 8 : Profils moyens des interventions de désherbage et de travail du sol par stratégie de travail du sol

	Parcelles en agriculture conventionnelle et biologique						Bio
	SD	TCS	Labour occa.	Labour fréq.	Labour syst.	Toutes strat. de travail du sol	
IFT Glyphosate	0.32 <i>0.28</i>	0.14 <i>0.21</i>	0.09 <i>0.20</i>	0.04 <i>0.14</i>	0.03 <i>0.11</i>	0.07 <i>0.17</i>	0.00 <i>0.03</i>
IFT Herbicides hors glyphosate	1.76 <i>0.85</i>	1.83 <i>0.90</i>	1.82 <i>0.93</i>	1.75 <i>0.87</i>	1.58 <i>0.74</i>	1.73 <i>0.86</i>	0.06 <i>0.28</i>
IFT Herbicides	2.08 <i>0.91</i>	1.97 <i>0.95</i>	1.92 <i>0.95</i>	1.79 <i>0.90</i>	1.61 <i>0.75</i>	1.80 <i>0.89</i>	0.06 <i>0.29</i>
Nb int. mécaniques sur couvert	0.60 <i>0.66</i>	0.66 <i>0.77</i>	0.59 <i>0.76</i>	0.65 <i>0.84</i>	0.59 <i>0.72</i>	0.62 <i>0.78</i>	0.57 <i>0.72</i>
Nb int. travail du sol très superficiel		1.80 <i>1.23</i>	1.65 <i>1.18</i>	1.73 <i>1.18</i>	1.68 <i>1.17</i>	1.68 <i>1.20</i>	2.72 <i>1.83</i>
Nb int. travail du sol superficiel		0.78 <i>0.97</i>	0.76 <i>0.90</i>	0.69 <i>0.89</i>	0.45 <i>0.77</i>	0.64 <i>0.88</i>	0.66 <i>0.96</i>
Nb int. travail du sol profond, hors lab.		0.38 <i>0.62</i>	0.30 <i>0.57</i>	0.20 <i>0.47</i>	0.09 <i>0.36</i>	0.22 <i>0.50</i>	0.22 <i>0.61</i>
Nb labours			0.28 <i>0.45</i>	0.58 <i>0.50</i>	1.01 <i>0.09</i>	0.53 <i>0.51</i>	0.60 <i>0.49</i>
Nb int. travail du sol		2.95 <i>1.33</i>	2.99 <i>1.26</i>	3.20 <i>1.35</i>	3.23 <i>1.29</i>	3.07 <i>1.37</i>	4.20 <i>2.04</i>
Nb desherbage thermique	0.01 <i>0.09</i>	0.00 <i>0.05</i>	0.00 <i>0.05</i>	0.00 <i>0.03</i>	0.00 <i>0.03</i>	0.00 <i>0.04</i>	0.00 <i>0.03</i>
Nb desherbage manuel	0.00 <i>0.03</i>	0.03 <i>0.18</i>	0.03 <i>0.16</i>	0.04 <i>0.20</i>	0.03 <i>0.18</i>	0.03 <i>0.18</i>	0.09 <i>0.28</i>
Couvert d'IC semé	0.18 <i>0.39</i>	0.15 <i>0.36</i>	0.13 <i>0.34</i>	0.23 <i>0.42</i>	0.24 <i>0.42</i>	0.20 <i>0.40</i>	0.12 <i>0.33</i>
Fréquence de labour, histo. parc.			0.26	0.66	1.00	0.55	0.50
% Surface traitée avec glyphosate	85.8%	39.3%	24.2%	11.9%	7.6%	19.2%	
% Surface dans total grandes cultures	1.7%	18.1%	18.6%	33.7%	27.9%	100.0%	2.0%
Nombre de parcelles	300	2663	3080	5769	5530	17342	1519

Note les écarts-types figurent en italique en dessous des moyennes.

(iv) Les calculs que nous avons menés avec les scénarios considérant une intensification de la stratégie de travail moindre que celle de stratégie en labour fréquent tendent à montrer que ces scénarios sont moins crédibles. Par exemple, dans un scénario où les surfaces en labour occasionnel resteraient en labour occasionnel, la part des surfaces labourées induites par le retrait du glyphosate est de l'ordre 20% des surfaces en labour occasionnel. Ces surfaces labourées viennent en sus de celles déjà labourées en labour occasionnel, dont la part est de 28%. Ceci conduit à un total de 48% de surfaces labourées, soit une part de surface labourée qui correspond à une stratégie de travail du sol avec labour fréquent.

Il convient de noter ici le scénario général avec adoption de stratégies de travail du sol avec labour fréquent a tendance à surestimer l'augmentation du travail du sol qui serait induite par le retrait du

¹⁷ Même si la tolérance en matière d'impuretés dans les récoltes est certainement plus importante en Agriculture Biologique.

glyphosate, surtout pour les surfaces travaillées actuellement en semis direct ou techniques culturales simplifiées. En effet, le labour est une des interventions de travail du sol les plus coûteuses et les plus perturbantes pour les sols. Le retrait du glyphosate inciterait certains agriculteurs en système sans labour à labourer leurs sols mais il est probable qu'ils le feraient plutôt occasionnellement que fréquemment. Les surcoûts de travail du sol mesurés dans le cadre de notre scénario général de référence sont des bornes supérieures des surcoûts liés à l'intensification du travail du sol à attendre de l'interdiction du glyphosate.

Le fait que la plupart des parcelles de notre échantillon qui ne sont pas déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate aient des caractéristiques proches de parcelles qui sont déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate est d'une grande importance pour l'évaluation des effets de notre scénario général de référence. En effet, traduit en « termes statistiques », ce constat indique que pratiquement toutes les parcelles de notre échantillon qui ne sont pas déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate ont des « jumelles statistiques »¹⁹ dans le sous-échantillon des parcelles qui sont déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate. Ceci implique donc qu'il est possible de comparer les choix observés sur des parcelles qui ne sont pas déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate avec des parcelles qui sont déjà travaillées en labour fréquent sans glyphosate selon une logique « toutes choses égales par ailleurs ».

Notre méthode d'évaluation statistique des effets de notre scénario général de référence du retrait du glyphosate est essentiellement basée sur ces comparaisons, ainsi que sur quelques hypothèses de calcul présentées dans la suite.

c. Scénario général de référence « extrême » du retrait du glyphosate : stratégies de travail du sol avec labour systématique

Nous avons également défini un général de référence « extrême » dans lequel toutes les parcelles seraient systématiquement labourées (Tableau 9).

Tableau 9 : Scénario général de référence « extrême »

		Situation de départ (avec ou sans glyphosate)						
		SD	TCS	Labour occasionnel	Labour fréquent	Labour systématique		
Nb total de parc. dont avec glyphosate		300	2663	3080	5769	5530		
sans glyphosate		244	1040	714	759	419		
		58	1623	2366	5010	5111		
Part de surface		1.7%	18.1%	18.6%	33.7%	27.9%		
Part de surf. traitée au glyphosate		85.8%	39.3%	24.2%	11.9%	7.6%	Nb parc.	Part de surf.
Situation d'arrivée (sans glyphosate)	Labour occa.						2366	14.1%
	Labour fréq.						5010	29.7%
	Labour syst.	$N_1=300$ vs $N_0=5111$	$N_1=2663$ vs $N_0=5111$	$N_1=3080$ vs $N_0=5111$	$N_1=5769$ vs $N_0=5111$	$N_1=5530$ vs $N_0=5111$	5111	25.8%

¹⁹ Ce terme sera défini plus formellement plus bas.

Il s'agit ici de calculer les surcoûts liés au travail du sol dans le scénario le plus poussé en matière d'intensification du travail du sol. En effet, si un scénario avec adoption généralisée de stratégies à labour fréquent est plutôt improbable, un scénario avec un retour généralisé au labour systématique de toutes les parcelles est lui très peu probable. Nos données indiquent que presque deux tiers des surfaces de grandes cultures (62.9%) ne sont pas labourées tous les ans. En outre, comme indiqué précédemment, les agriculteurs français tendent à réduire significativement leur fréquence de labour depuis le milieu des années 2000.

d. Scénario spécifique pour les parcelles non labourées, en semis direct ou en techniques culturales simplifiées.

Enfin, nous avons défini un scénario spécifique pour les parcelles non labourées, en semis direct ou en techniques culturales simplifiées. Il s'agit ici de tenir compte de ce que les agriculteurs ayant abandonné le labour seront probablement très réticents à « retourner leurs sols » même en cas de retrait du glyphosate (Tableau 10). La stratégie de travail du sol avec labour occasionnel est ici considérée comme une stratégie de travail du sol permettant de définir des scénarios à mi-chemin entre les scénarios d'adoption de stratégies de travail du sol à labour fréquent et les scénarios de maintien des stratégies sans labour.

Tableau 10 : Scénario spécifique pour les parcelles non labourées

		Situation de départ (avec ou sans glyphosate)						
		SD	TCS	Labour occasionnel	Labour fréquent	Labour systématique		
Nb total de parc. dont		300	2663	3080	5769	5530		
avec glyphosate		244	1040	714	759	419		
sans glyphosate		58	1623	2366	5010	5111		
Part de surface		1.7%	18.1%	18.6%	33.7%	27.9%		
Part de surf. traitée au glyphosate		85.8%	39.3%	24.2%	11.9%	7.6%	Nb parc.	Part de surf.
Situation d'arrivée (sans glyphosate)	Labour occa.	$N_1=300$ vs $N_0=2366$	$N_1=2663$ vs $N_0=2366$				2366	14.1%
	Labour fréq.						5010	29.7%
	Labour syst.						5111	25.8%

5.3. Principales étapes des calculs des effets et des surcoûts des scénarios considérés

Nos estimations des effets du retrait du glyphosate, sur les choix d'interventions désherbage et de travail du sol des agriculteurs d'une part et sur les surcoûts associés d'autre part, sont calculés en trois étapes pour tous nos scénarios. Nous présentons ici ces étapes de calculs en prenant l'exemple de notre scénario général de référence.

Notre scénario général de référence suppose que le retrait du glyphosate amènerait les agriculteurs à intensifier leur stratégie de travail sol au minimum jusqu'à des labours fréquents. Plus précisément, il suppose que :

Scénario général de référence

- (a) Les parcelles actuellement en semis direct, en techniques culturales simplifiées et en labour occasionnel, avec ou sans traitement au glyphosate, passent en labour fréquent sans utilisation de glyphosate.
- (b) Les parcelles actuellement en labour fréquent, avec ou sans traitement au glyphosate, passent ou restent en labour fréquent sans utilisation de glyphosate.
- (c) Les parcelles actuellement en labour systématique, avec ou sans traitement au glyphosate, restent en labour systématique sans utilisation de glyphosate.

Les effets du retrait du glyphosate sur les choix de désherbage et de d'interventions de travail du sol des agriculteurs dans ce scénario sont calculés à partir des trois étapes suivantes :

- Etape 1. Estimation des effets du retrait du glyphosate sur les choix pour les parcelles avec utilisation de glyphosate
- Etape 2. Estimations des effets du retrait du glyphosate sur les choix pour les parcelles sans utilisation de glyphosate
- Etape 3. Combinaison des estimations des effets du retrait du glyphosate sur les choix pour les parcelles avec et sans utilisation de glyphosate, c'est-à-dire effets estimés du retrait du glyphosate sur les choix techniques de désherbage et de travail du sol (par type de stratégie de travail du sol)

L'ensemble des indicateurs suivants Nous considérons l'évolution d'un large ensemble de choix techniques

- IFT des herbicides avec et sans glyphosate,
- Nombre d'interventions mécaniques sur les couverts d'inter-culture,
- Nombre de binages,
- Nombre d'interventions de travail du sol très superficiels, superficiels et profonds sans retournement
- Nombre de labours

ainsi que les coûts des évolutions des interventions considérées :

- Coûts de main d'œuvre, en h/ha et €/ha,
- Coûts de carburant, en l/ha et €/ha
- Coûts de mécanisation, avec une décomposition entre outils et tracteurs, en €/ha.

Les coûts de mécanisation incluent les charges d'investissement (et renouvellement), d'entretien et d'amortissement des équipements, par hectare et par an. Ils sont calculés à partir des éléments contenus dans les Barèmes d'entraide à la SAU des exploitations (APCA, 2028 ; FR CUMA AuRA, 2018). Les coûts d'entretien des outils de travail du sol sont, dans la mesure du possible, ajustés à la pierrosité des sols des parcelles. Les détails des calculs de ces indicateurs et coûts sont fournis en annexe.

a. Etape 1. Estimation des effets du retrait du glyphosate pour les parcelles avec utilisation de glyphosate

Nous calculons les effets du retrait du glyphosate sur les parcelles avec utilisation de glyphosate en comparant les choix techniques des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol (IFT des herbicides et nombres d'interventions de travail mécanique) sur des parcelles avec *versus* sans glyphosate pour les paires de stratégies de travail du sol définies par le scénario général (Tableau 7).

Par exemple, et schématiquement, nous estimons ce que feraient, en moyenne, les agriculteurs sur les parcelles qu'ils travaillent actuellement en techniques culturales simplifiées avec utilisation de glyphosate s'ils étaient « forcés » d'adopter une stratégie de travail du sol avec labour fréquent à partir de ce que font les agriculteurs qui labourent fréquemment leurs parcelles et n'utilisent pas de glyphosate.

L'effet moyen d'un scénario est calculé comme la différence entre notre estimation de ce feraient les agriculteurs dans le cadre de la stratégie de travail du sol qui leur est assignée par le scénario considéré et ce qu'ils font actuellement, en moyenne pour l'ensemble des agriculteurs concernés par le scénario considéré.

Par exemple, pour le scénario concernant les agriculteurs en techniques culturales simplifiées sur les parcelles où ils utilisent du glyphosate et forçant ces agriculteurs à adopter une stratégie de travail du sol avec labour fréquent sans glyphosate, nous estimons d'abord ce que feraient, en moyenne, ces agriculteurs sur les parcelles qu'ils traitent au glyphosate actuellement à partir de ce que font les agriculteurs qui labourent fréquemment leurs parcelles et n'utilisent pas de glyphosate. Puis nous retranchons les choix actuels moyens de ces agriculteurs des choix moyens que nous venons d'estimer.

Bien entendu, la méthode d'estimation que nous avons choisie tient compte de ce que les choix de stratégie de travail du sol et des interventions de désherbage (y compris d'utiliser ou non du glyphosate) et de travail du sol dépendent de nombreux facteurs communs. Cette méthode est présentée dans la suite. Nous indiquons simplement ici que cette méthode assure que nos estimations des choix que les agriculteurs feraient, en moyenne, s'ils étaient « forcés » d'adopter la stratégie de travail du sol qui leur est assigné par le scénario considéré sont en priorité construites à partir des choix observés des agriculteurs qui suivent cette stratégie de travail du sol dans des conditions équivalentes (telles qu'elles sont définies par les caractéristiques pédo-climatiques, des inter-cultures et des exploitations des parcelles considérées). Nos estimations des effets moyens de nos scénarios sont donc calculées en comparant des choix d'agriculteurs différents mais dans des situations comparables.

b. Etape 2. Estimation des effets du retrait du glyphosate pour les parcelles sans utilisation de glyphosate, et hypothèses associées

Nous calculons ensuite les effets du retrait du glyphosate sur les parcelles sans utilisation de glyphosate en comparant les choix des agriculteurs en matière de désherbage et de travail du sol sur des parcelles

sans glyphosate pour les paires de stratégies de travail du sol définies par le scénario général (Tableau 7).

Par exemple, nous estimons ce que feraient, en moyenne, les agriculteurs sur les parcelles qu'ils travaillent actuellement en techniques culturales simplifiées sans utilisation de glyphosate s'ils étaient « forcés » d'adopter une stratégie de travail du sol avec labour fréquent à partir de ce que font les agriculteurs qui labourent fréquemment leurs parcelles et n'utilisent pas de glyphosate. Puis nous retranchons les choix moyens observés des choix moyens estimés pour obtenir l'effet moyen de ce scénario.

Il nous est cependant nécessaire de faire des hypothèses sur ce que feraient, en cas de retrait du glyphosate, les agriculteurs qu'on suppose maintenir leur stratégie de travail du sol sur les parcelles où ils n'utilisent pas de glyphosate. En effet, nous ne disposons pas de base de comparaison pour ces cas. Dans le cadre de notre scénario général de référence ce problème se pose pour les agriculteurs pratiquant le labour fréquent ou le labour systématique. Il est probable que ces agriculteurs réaliseraient ponctuellement des interventions de travail du sol supplémentaires pour compenser la perte des effets retardés de leurs utilisations de glyphosate.

Dans le cas des parcelles en labour fréquent ou systématique ce surcroît d'interventions de travail du sol et/ou de désherbage serait vraisemblablement très limité puisque seulement 11.9% des surfaces en labour fréquent sont traitées au glyphosate en inter-culture, cette part n'étant que de 7.6% pour les surfaces en labour occasionnel. Les effets retardés à attendre de ces traitements au glyphosate sont vraisemblablement limités.

Deux options d'hypothèse sont possibles pour pallier à ce problème : soit supposer que le retrait du glyphosate ne modifierait pas les choix de désherbage et de travail du sol des agriculteurs qui pratiquent actuellement un labour fréquent ou systématique sur les parcelles où ils n'utilisent pas de glyphosate, soit supposer ces agriculteurs modifieraient leurs choix techniques sur les parcelles où ils n'utilisent pas de glyphosate de la même manière qu'ils le font sur les parcelles où ils utilisent du glyphosate. Bien que la première option d'hypothèse soit certainement plus proche de la réalité, nous choisissons la seconde.

De manière générale, lorsque nous avons un choix d'hypothèse à faire, nous choisissons systématiquement celui évite de sous-estimer les surcoûts liés au retrait du glyphosate.

Il convient de noter ici que nos calculs montrent que les agriculteurs labourant fréquemment ou systématiquement leurs sols augmenteraient relativement peu leurs interventions de travail du sol. Aussi, la surestimation potentielle des effets du retrait du glyphosate pour les parcelles en labour fréquent ou occasionnelle est de faible ampleur lorsqu'elle est calculée par unité de surface. En revanche, les effets agrégés de cette surestimation potentielle, à l'échelle des surfaces françaises de grandes cultures, est potentiellement substantielle. En effet, 61.6% des surfaces de grandes cultures françaises sont labourées fréquemment ou systématiquement.

De fait, l'absence de base de comparaison pour les parcelles sans utilisation de glyphosate en cas de maintien de travail du sol est plus problématique pour le calcul des effets du retrait du glyphosate sur les traitements herbicides qu'elle ne l'est pour les interventions de travail du sol. En effet, tous nos calculs montrent que le retrait du glyphosate devrait s'accompagner de diminutions de traitements herbicide chimiques en culture, que ce soit avec maintien ou avec intensification de la stratégie de

travail du sol.²⁰ Le choix de notre hypothèse quant aux effets du retrait du glyphosate sur les parcelles en labour fréquent ou systématique non traitées au glyphosate devrait nous conduire non seulement à imputer des augmentations d'interventions de travail du sol mais également à imputer des diminutions de traitements herbicides en culture.

Pour des raisons qui sont exposées ci-après, nous avons décidé de ne pas tenir compte, dans nos estimations de surcoût, de nos estimations des effets du retrait du glyphosate sur les indicateurs relatifs aux herbicides sans glyphosate.

c. Etape 3. Combinaison des estimations des effets du retrait du glyphosate pour l'ensemble des parcelles, avec sans utilisation de glyphosate, par type de stratégie de travail du sol

Les effets du retrait calculés sur les parcelles avec et sans utilisation de glyphosate sont ensuite combinés par type de stratégie de travail du sol de la situation initiale. L'effet obtenu est la somme des effets calculés sur les parcelles avec et sans utilisation de glyphosate pondérée par les parts de surface avec et sans utilisation de glyphosate dans la stratégie de travail du sol de la situation initiale.

Par exemple, dans le cas des parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées les estimations des effets pour les parcelles avec utilisation de glyphosate sont pondérées par 0.393 (part de surface des parcelles en techniques culturales simplifiées traitées au glyphosate en inter-culture) et celles des effets pour les parcelles sans utilisation de glyphosate sont pondérées par 0.607.

d. Questions soulevées par les effets du retrait du glyphosate sur les utilisations des autres herbicides

Avant d'analyser les résultats de nos estimations, il est nécessaire d'aborder les questions soulevées par les effets du retrait du glyphosate sur les utilisations des autres herbicides, et d'expliquer nos choix à ce sujet.

La mesure des effets du retrait du glyphosate sur les utilisations des autres herbicides est délicate, à plusieurs titres. Tout d'abord, le glyphosate étant d'un rapport coût efficacité remarquable en plus d'avoir un spectre de cibles sans équivalent, ses concurrents les plus directs – le Dicamba et le 2.4D – tous deux ciblant les dicotylédones, sont actuellement peu utilisés en inter-culture. Ces herbicides sont moins polyvalents en inter-culture et ne sont pas meilleur marché que le glyphosate. De ce fait, nous ne pouvons estimer l'augmentation de l'utilisation de ces herbicides qui serait induite par le retrait du glyphosate, de par la nature de notre approche fondée sur l'observation des choix actuels des agriculteurs.

L'intuition première suggère que l'absence de glyphosate serait essentiellement comblée par l'utilisation d'autres herbicides chimiques. C'est probablement vrai pour certains usages du glyphosate, comme l'élimination des repousses de colza par des traitements au Dicamba. Mais, le fait que les principales alternatives aux autres usages du glyphosate en inter-culture soient des interventions de travail du sol tend à compliquer singulièrement l'analyse des effets du retrait du glyphosate sur les choix de désherbage des agriculteurs.

²⁰ Ce point est discuté plus en détail par la suite.

Nous avons décidé d'éliminer de nos estimations des effets du retrait du glyphosate les indicateurs relatifs aux herbicides autres que le glyphosate, pour trois raisons principales.

Tout d'abord, bien que nous ayons pleinement confiance dans les effets que nous avons estimés sur les indicateurs de traitements herbicides en culture, ces résultats sont surprenants, tout au moins *a priori*, et sont jugés comme surprenants par les experts des ITA. Des explications de ces résultats peuvent être avancées. Néanmoins, il nous paraît inapproprié de mobiliser des résultats sujets à discussion qui n'ont pas encore été validés scientifiquement.²¹

Ensuite, les diminutions d'utilisation d'herbicides sans glyphosate sont très variables d'une culture à l'autre. En effet, le prix et la disponibilité d'herbicides en culture varient sensiblement entre espèces cultivées.

Enfin, notre approche d'estimation tend à sous-estimer les effets qui seraient induits par le retrait du glyphosate sur l'utilisation des herbicides autorisés en inter-culture. En particulier, les parcelles en labour fréquent ou systématique sont plus fréquemment traitées au glyphosate après une culture de colza. Par exemple, 12.6% des surfaces en labour systématique sont traitées au glyphosate lorsqu'elles ont un précédent colza, contre seulement 7.3% lorsqu'elles ont un autre précédent. Les parts correspondantes sont de 24.3% contre 10.5% pour les parcelles en labour fréquent.²² Le Dicamba et le 2.4D étant efficaces contre les repousses de colza, il est possible que leur utilisation en inter-culture augmente sensiblement pour cet usage en cas de retrait du glyphosate. De fait, nos estimations des effets du retrait du glyphosate sur les traitements avec d'autres herbicides sont incomplètes et pourraient être mal interprétées par qui n'entrerait pas suffisamment dans le détail de nos calculs.

Il est cependant important de noter que nous considérons que nos estimations des surcoûts liés au retrait du glyphosate sont des bornes supérieures des surcoûts « réels ». Nos calculs de surcoûts surestiment les surcoûts des interventions mécaniques et négligent les économies que nos calculs tendent à prouver en matière de traitements herbicides en culture.

Pour conclure sur les questions soulevées par les effets du glyphosate sur l'utilisation d'autres herbicides chimiques, il convient de rappeler que nos estimations de surcoûts ne concernent que les surcoûts supportés par les agriculteurs dans la phase « d'utilisation maîtrisée » des pratiques qu'ils auront décidé d'adopter pour répondre au retrait du glyphosate. Il est vraisemblable que l'utilisation d'autres herbicides augmente juste après le retrait du glyphosate, c'est-à-dire pendant la phase de transition des « anciennes » pratiques de désherbage et de travail du sol vers les « nouvelles » pratiques choisies par les agriculteurs. L'accroissement temporaire des utilisations d'herbicides sans glyphosate peut répondre à des besoins de « sécurisation » de la maîtrise des adventices (*ex ante*) et peut aider à rattraper certaines erreurs (*ex post*) durant la phase de transition des changements de pratique.

e. Questions soulevées par l'hétérogénéité des besoins couverts par l'utilisation de glyphosate

Nous complétons ici la présentation de l'Etape 2 de notre approche d'estimation des surcoûts par des remarques générales quant à la place du glyphosate dans la stratégie de contrôle des adventices des

²¹ C'est-à-dire par des publications scientifiques validées par nos pairs.

²² Elles sont de 30.4% contre 22.8% en labour occasionnel, de 47.4% contre 38.7% en techniques culturales simplifiées et de 97.1% contre 83.9% en semis direct.

agriculteurs, laquelle est évidemment liée aux effets pluriannuels des traitements au glyphosate. En effet, les questions soulevées par ce que les agriculteurs feraient sur les parcelles où ils n'utilisent pas de glyphosate en cas de retrait de ce produit dépendent du rôle, plus ou moins important, du glyphosate dans la stratégie de contrôle des adventices des agriculteurs. Les discuter permet également de mettre en évidence certaines limites de nos calculs de surcoûts.

En adoptant une logique de traitement ponctuel dans une rotation de cultures, les 11.9% de surface en labour fréquent traitée au glyphosate correspondent, en moyenne, à l'application de 1 traitement tous les 8 ans sur chaque parcelle. Selon la même logique, les 7.6% de surface actuellement traitée au glyphosate en labour systématique correspondent, en moyenne, à l'application de 1 traitement tous les 13 ans sur chaque parcelle. Les chiffres correspondants sont d'un peu moins de 1 traitement au glyphosate tous les ans en semis direct, tous les 2 ans en techniques culturales simplifiées et tous les 4 ans en labour occasionnel.

Ces chiffres suggèrent que si l'utilisation de glyphosate est un élément majeur de la stratégie de contrôle des adventices dans les stratégies de travail du sol sans labour ou avec labour occasionnel, ce n'est pas le cas pour les stratégies de travail du sol reposant essentiellement sur le labour. Dans une certaine mesure, décider de réduire significativement l'intensité du travail du sol implique d'accepter de s'en remettre largement au glyphosate pour le contrôle des adventices. Nos résultats de statistique descriptive (ainsi que ceux de Reboud *et al*, 2017) confirment largement cette observation. L'intensité de la stratégie de travail du sol est, et de loin, le facteur le plus explicatif de l'utilisation de glyphosate.

Les surcoûts liés à l'intensification du travail du sol pour compenser les effets du retrait du glyphosate sont bien captés par nos estimations. De fait, notre approche d'estimation a été conçue pour capter au mieux ces surcoûts.

Les traitements au glyphosate observés sur les parcelles en labour fréquent ou en labour systématique répondent vraisemblablement à des besoins différents de ceux observés sur les parcelles en sans labour ou en labour occasionnel. Les traitements au glyphosate réalisés sur les parcelles en labour fréquent ou en labour systématique sont *a priori* trop peu nombreux pour être considérés comme des éléments majeurs de la stratégie de contrôle des adventices dans le cadre de stratégies de travail « intense » du sol. De fait, ces traitements peuvent répondre à trois types de besoins.

Tout d'abord, ils peuvent répondre à des besoins ponctuels, survenant de manière plus ou moins aléatoire. Ces traitements peuvent être mis en œuvre soit pour contrôler une flore adventice qui s'est accidentellement développée suite à un désherbage raté, soit pour compenser la perte des effets d'intervention de travail du sol qui n'ont pu être réalisées en raison de conditions météorologiques défavorables. Ces besoins peuvent concerner l'ensemble des agriculteurs, même si c'est à des degrés divers.

Ils sont couverts par nos calculs de surcoût, en moyenne pour l'ensemble de la sous-population concernée et pour les conditions de la campagne 2016/2017.

Ensuite, certains des traitements au glyphosate observés sur les parcelles en labour fréquent ou en labour systématique peuvent également répondre à des besoins organisationnels et, à ce titre, être des traitements plus routiniers que ponctuels pour un nombre limité d'exploitations. Il s'agit en particulier des exploitations fréquemment contraintes par un nombre limité de jours disponibles pour le travail du sol juste avant les semis, par exemple de grandes exploitations avec des sols hydromorphes ou argileux. Dans ces cas, une stratégie possible consiste à anticiper une grande partie

du travail de préparation du sol pour les semis afin de travailler le sol dans de bonnes conditions, quitte à éliminer au glyphosate les pousses d'adventices levées au moment des semis. Le retrait du glyphosate pourrait engendrer une augmentation des coûts de mécanisation et de main d'œuvre pour ces exploitations, ces dernières devenant contraintes de travailler rapidement leurs sols juste avant les semis, voire des coûts de certains traitements herbicides si la stratégie d'anticipation de travail du sol devait être maintenue.

Les surcoûts associés à l'abandon de cette « stratégie d'anticipation du travail du sol » ne sont pas couverts par nos calculs de surcoûts. Il nous est très difficile de repérer la mise en œuvre de cette stratégie dans nos données, notamment parce que sa mise en œuvre peut en partie se confondre avec celle de faux semis. Il est à noter que les questions abordées ici sont analogues à celles soulevées par la destruction des couverts d'inter-culture dont l'implantation est localement obligatoire.

Enfin, certains des traitements au glyphosate observés sur les parcelles en labour fréquent ou en labour systématique peuvent venir en appui du travail du sol et des autres herbicides chimiques dans le cas de flores adventices très difficiles. Il s'agit en particulier des flores adventices qui se sont développées suite à la mise en œuvre sur longue période de systèmes de culture spécialisés et qui sont en partie devenues résistantes aux herbicides en culture, ces derniers étant plus spécifiques que le glyphosate. Faute d'information fiable sur les historiques culturaux des parcelles de notre échantillon, nous ne pouvons identifier ces situations. Nos calculs de surcoûts ne peuvent donc capter ceux liés au retrait du glyphosate dans ce cas. Il convient néanmoins de remarquer que l'utilisation de glyphosate n'est qu'une solution partielle et temporaire aux problèmes soulevés par les flores adventices résistantes qui se sont développées par synchronisation de leurs cycles biologiques avec ceux des cultures de systèmes culturaux spécialisés. L'impasse agronomique révélée par ce type de problèmes appelle des solutions, et donc des surcoûts, qui dépassent largement ceux du retrait du glyphosate. Ce retrait ne ferait que précipiter des changements, par exemple une diversification accrue des assolements et des rotations, qui auraient été nécessaires à plus ou moins brève échéance.

5.4 Estimation statistique des effets moyens des scénarios : approche de pondération par les scores de propension

Nos estimations des surcoûts supportés par les agriculteurs en cas de retrait du glyphosate sont fondées sur approche composée de deux éléments. Le premier élément consiste en un ensemble de scénarios décrivant les réactions potentielles des agriculteurs en cas de retrait du glyphosate. Outre le retrait du glyphosate, ces scénarios définissent la stratégie de travail du sol qui pourrait être adoptée par les agriculteurs exploitant les parcelles de notre échantillon, en fonction de leur stratégie actuelle de travail du sol.

Dans l'exemple dans notre scénario général de référence, tous les agriculteurs sont censés adopter ou continuer à suivre une stratégie de travail du sol à labour fréquent sans utilisation de glyphosate, sauf ceux qui labourent systématiquement leurs parcelles. Ces derniers sont, logiquement, censés continuer à suivre une stratégie de travail du sol avec labour systématique mais sans possibilité d'utiliser du glyphosate.

a. Présentation générale du problème de l'estimation des effets moyens des scénarios

Si les scénarios définissent les stratégies de travail du sol que pourraient adopter les agriculteurs, il reste à estimer les choix techniques, et les coûts qui leur sont associés, que feraient les agriculteurs

dans le cadre des stratégies de travail du sol que nos scénarios les « forcent » à adopter. Dans la suite, ces choix techniques induits par les hypothèses de nos scénarios, *i.e.* une stratégie de travail du sol sans traitement au glyphosate, sont désignés sous le terme de choix techniques « contrefactuels ».

Dans un scénario donné, le surcoût supporté par un agriculteur est défini comme la différence du coût de ses choix techniques contrefactuels dans le scénario considéré et du coût de ses choix techniques actuels.

Le second élément fondant notre approche de calcul des surcoûts liés au retrait du glyphosate est la méthode d'évaluation statistique que nous employons pour construire les estimations des choix techniques contrefactuels, c'est-à-dire les choix que feraient les agriculteurs dans les limites définies par nos scénarios. Nous employons une approche statistique visant à calculer des estimations des moyennes des choix contrefactuels pour chacun des sous-échantillons de parcelles définis par les types de stratégies de travail du sol que nous considérons. Par exemple, nous cherchons à estimer les IFT herbicides et le nombre d'interventions mécaniques que choisiraient, en moyenne, les agriculteurs utilisant du glyphosate et labourant occasionnellement leurs sols s'ils étaient « forcés » d'abandonner les traitements au glyphosate et de labourer fréquemment leurs parcelles.

Nous concentrons nos efforts d'estimation sur les moyennes des choix techniques contrefactuels. En effet, il est possible, tout au moins en théorie, d'estimer les choix techniques contrefactuels pour chacune des parcelles de notre échantillon. Mais ces « estimations à la parcelle » seraient très imprécises. En outre, elles seraient d'un intérêt limité puisque, conformément aux pratiques usuelles, elles seraient essentiellement présentées sous forme de moyennes.²³

Nos estimations des choix techniques moyens que pourraient faire les agriculteurs s'ils se conformaient à nos scénarios reposent sur l'information statistique apportée par les choix techniques des agriculteurs qui n'emploient pas de glyphosate et qui utilisent actuellement les stratégies de travail du sol que nos scénarios « forcent » les autres agriculteurs à adopter.

Dans l'exemple de notre scénario général de référence, nos estimations des choix techniques des agriculteurs en cas de retrait du glyphosate reposent sur deux sous-échantillons de parcelles. Les choix techniques observés sur les 5010 parcelles travaillées actuellement en labour fréquent sans glyphosate sont utilisés pour estimer ceux des agriculteurs supposés adopter ou continuer à suivre une stratégie de travail du sol à labour fréquent mais sans possibilité d'utiliser du glyphosate. De la même manière, les choix techniques observés sur les 5111 parcelles qui sont labourées systématiquement et ne sont pas traitées au glyphosate sont utilisés pour estimer ceux des agriculteurs sensés continuer à labourer systématiquement leurs sols mais sans pouvoir utiliser de glyphosate.

i. Le problème du contrôle des effets des facteurs impactant à la fois les choix de stratégie de travail du sol, et ceux des interventions de désherbage et de travail du sol

Parmi les problèmes d'estimation auxquels nous sommes confrontés, le plus important est lié au fait que les parcelles que nous employons pour estimer les choix techniques « contrefactuels » n'ont pas nécessairement la même distribution de caractéristiques que les parcelles sur lesquelles les choix contrefactuels sont censés être faits. Par exemple, les parcelles actuellement en semis direct et traitées

²³ Il est possible et utile d'estimer d'autres caractéristiques de la distribution des choix « contrefactuels », ainsi que des coûts associés, telles que des moyennes par tranche de SAU, des quantiles ou la variance des choix « contrefactuels ». De tels calculs nécessitent des travaux relativement chronophages. Ils n'étaient pas envisageables dans le temps imparti pour cette étude.

au glyphosate ont souvent des sols superficiels (et donc caillouteux) et font souvent partie de grandes, voire de très grandes, exploitations alors que les parcelles qui sont labourées fréquemment et ne sont pas traitées au glyphosate font partie de tout type d'exploitation et ont plutôt de bons sols. De la même manière, le glyphosate est plus souvent employé après un précédent à repousses ou après une prairie qu'après un précédent cultural qui ne pose pas de problème de salissement. Ceci provient simplement de ce que les agriculteurs adaptent leurs stratégies de contrôle des adventices et de travail du sol aux caractéristiques des sols de leurs parcelles, aux configurations d'inter-culture induites par leurs systèmes de culture et aux caractéristiques de leur exploitation.

La manière la plus simple de gérer ce problème aurait consisté à construire des typologies de parcelles en croisant les variables disponibles – caractéristiques des sols, localisation géographique, caractéristiques des inter-cultures, caractéristiques des exploitations, *etc* – de sorte à contrôler les effets de ces variables en calculant les moyennes des choix contrefactuels pour chaque type de parcelles considéré. Cette approche a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et à exposer. Malheureusement elle est inenvisageable dans notre cas. Comme l'a montré la partie précédente, les facteurs impactant les choix des agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de gestion de l'état des sols sont très nombreux. Les croiser plus ou moins systématiquement aurait conduit à une « explosion combinatoire » de la typologie de parcelles à considérer. Nous disposons de 16 variables discrètes – qualitatives ou quantitatives par intervalles – expliquant potentiellement les choix des agriculteurs (pour un total de 75 modalités).

ii. Méthodes statistiques de mesure des « effets de traitement »

Le problème auquel nous sommes confrontés ici est récurrent pour tout exercice de comparaison de moyennes d'échantillons tel que celui considéré ici. Il a abondamment été étudié, initialement en statistique médicale, pour la mesure d'effets de traitements médicaux (*e.g.*, Imbens et Rubin, 2015 ; Li, Morgan et Zaslavsky, 2018). En amélioration constante, ces méthodes ont prouvé leur intérêt et leur robustesse dans de nombreux domaines d'application, incluant l'évaluation de traitements médicaux, l'évaluation de politiques publiques (relatives à l'emploi, l'éducation, la criminalité, *etc*) ou encore l'analyse de phénomènes sociologiques (*e.g.*, Angrist et Pischke, 2009 ; Imbens et Rubin, 2015 ; Imbens et Wooldridge, 2010 ; Wooldridge, 2010). La méthode d'estimation que nous employons – l'approche dite de pondération par les scores de propension – est issue de cette littérature.

Il est intéressant de noter que la mise en œuvre de la méthode d'estimation que nous employons nécessite de détecter les individus qui s'avèrent être « trop particuliers » pour entrer dans le calcul d'un effet moyen. Des techniques statistiques ont été spécifiquement développées pour repérer ces individus « trop particuliers » afin de les exclure des estimations des effets moyens visés. Nous employons évidemment ces techniques. Mais nous ne faisons pas qu'exclure de nos calculs les parcelles repérées car ces parcelles ont un intérêt dans le cadre de notre étude. En effet, ces parcelles sont celles des exploitations qui seraient en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate. Examiner leurs caractéristiques permet de répondre à un des points de la commande.

Dans la suite de cette partie, nous présentons brièvement la méthode statistique que nous avons choisie et les modalités de sa mise en œuvre pour cette étude. Les sections qui suivent visent surtout à expliquer comment et pourquoi nous avons mis en œuvre les méthodes d'estimation choisies pour évaluer les effets des scénarios que nous avons définis.

Cette partie du rapport est assez technique bien que nous nous soyons efforcés de présenter les intuitions sous-tendant nos calculs et leurs limites. Sa lecture n'est pas nécessaire pour comprendre les estimations chiffrées finales.

iii. Problème d'estimation considéré : variables utilisées

Tous les scénarios que nous considérons consistent à « forcer » des agriculteurs à abandonner l'utilisation de glyphosate et/ou à intensifier leur stratégie de travail du sol. Un scénario est défini pour la sous-population d'agriculteurs pratiquant un type donné de stratégie de contrôle des adventices et de travail du sol (SCATS), un type de SCATS étant défini une stratégie de travail du sol d'intensité donnée et l'utilisation ou non de glyphosate en inter-culture. Un scénario assigne aux agriculteurs pratiquant le type de SCATS considéré une SCATS d'intensité donnée et l'interdiction d'utiliser du glyphosate en inter-culture.

Trois grandes catégories de scénarios sont considérées pour notre évaluation des effets du retrait du glyphosate, des catégories de scénarios selon lesquels :

- des agriculteurs utilisateurs de glyphosate abandonnent l'utilisation de glyphosate sans changer de stratégie de travail du sol (2 scénarios),
- des agriculteurs utilisateurs de glyphosate abandonnent l'utilisation de glyphosate et intensifient leur stratégie de travail du sol (10 scénarios),
- des agriculteurs non utilisateurs de glyphosate intensifient leur stratégie de leur travail du sol (7 scénarios).

Évaluer les effets d'un scénario suppose d'estimer les choix techniques (ainsi les coûts associés à ces choix contrefactuels) des agriculteurs concernés par ce scénario dans le cadre du type de SCATS qui leur est assigné par ce scénario.

D'un point de vue statistique, évaluer les effets d'un scénario consiste à comparer deux ensembles de choix de désherbage et de travail du sol (ainsi les coûts associés à ces choix), ceux des agriculteurs sur les parcelles sur lesquelles est pratiqué le type de SCATS concerné par le scénario d'une part, et ceux des agriculteurs sur les parcelles sur lesquelles est pratiqué le type de SCATS assigné par le scénario d'autre part.

La variable y_c désigne ici, de manière générique, la valeur de l'indicateur c pour lequel nous souhaitons estimer les effets moyens du retrait du glyphosate. Notre étude considère 45 indicateurs, dont 7 décrivent des choix techniques et 38 sont des mesures d'éléments de coût relatifs à ces choix techniques. Aussi, on a $c \in C = \{1, \dots, 38\}$. La valeur de l'indicateur y_c pour la parcelle i est désignée par le terme $y_{c,i}$.

Nous considérons ici un ensemble de 5 types de SCATS, désigné par l'ensemble $S = \{1, \dots, 5\}$. Les éléments de S sont ordonnés selon l'intensité de la stratégie de travail du sol de du type de SCATS considérée, avec 1 pour le semis direct, 2 pour les techniques culturales simplifiées, 3 pour le labour occasionnel, 4 pour le labour fréquent et 5 pour le labour systématique.

Dans la suite, nous considérons l'évaluation des effets sur l'indicateur y_c d'un scénario s où les agriculteurs pratiquant une SCATS d'intensité k avec utilisation de glyphosate sont « forcés » de pratiquer une SCATS d'intensité $\ell \geq k$ sans utilisation de glyphosate. Nous ne considérons ici que le cas de scénarios concernant des agriculteurs utilisateurs de glyphosate afin de simplifier les notations.

L'évaluation du scénario s repose sur deux sous-échantillon de parcelles, celui des parcelles sur lesquelles est pratiqué une SCATS de d'intensité k avec utilisation de glyphosate d'une part, et celui des parcelles sur lesquelles est pratiqué une SCATS d'intensité ℓ sans utilisation de glyphosate d'autre part. Le premier sous-échantillon est désigné par l'ensemble $\mathcal{E}_{k(1)}$ et le second par l'ensemble $\mathcal{E}_{\ell(0)}$. L'ensemble \mathcal{E}_s désigne l'union de $\mathcal{E}_{k(1)}$ et $\mathcal{E}_{\ell(0)}$. La taille du sous-échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$ est notée $N_{k(1)}$, et celles de $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ et \mathcal{E}_s sont notées $N_{\ell(0)}$ et N_s .²⁴

La variable dichotomique $s_{\ell k, i} \in \{0,1\}$ indique le statut de la parcelle $i \in \mathcal{E}_s$ dans l'évaluation du scénario s . La condition $s_{\ell k, i} = 1$ indique que la parcelle i est traitée au glyphosate et est travaillée selon une SCATS d'intensité type k (ou, de manière équivalente, que $i \in \mathcal{E}_{k(1)}$) alors que la condition $s_{\ell k, i} = 0$ indique que la parcelle i n'est pas traitée au glyphosate et est travaillée selon une SCATS d'intensité ℓ ($i \in \mathcal{E}_{\ell(0)}$).

La condition $s_{\ell k, i} = 1$ peut également être interprétée comme traduisant le fait que l'agriculteur i (celui qui exploite par la parcelle i) a choisi une SCATS d'intensité k et d'utiliser du glyphosate (pendant l'inter-culture 2016–2017) plutôt que d'utiliser une SCATS d'intensité $\ell \geq k$ et de ne pas utiliser de glyphosate (pendant l'inter-culture 2016–2017). Selon cette interprétation la variable $s_{\ell k, i}$ décrit des choix essentiels de l'agriculteur exploitant la parcelle i en matière de désherbage et de stratégie de travail du sol.

Les choix décrits par les variables $y_{c, i}$ et $s_{\ell k, i}$ sont tous deux impactés par les caractéristiques des parcelles et les caractéristiques de leur inter-culture entre les campagnes 2016 et 2017. Les variables « explicatives », qui sont toutes discrètes, que nous employons dans cette étude sont collectées dans le vecteur \mathbf{x}_i . Ce vecteur contient, pour chaque parcelle i , les variables suivantes (dont le nombre de modalités est indiqué entre parenthèses) :

- *Caractéristiques du sol* : profondeur (3), hydromorphie (2), pierrosité (3), texture (6), teneur en calcaires (2)
- *Région climatique du SSP* (6)²⁵
- *Caractéristiques de l'inter-culture* : longueur (4), implantation ou non d'un couvert (2),²⁶ culture (16), précédent cultural (14), précédent à récolte précoce ou non (2), précédent à repousses ou non (2), pression adventice perçue (3)²⁷
- *Caractéristiques de l'exploitation* : taille de la SAU (7), orientation technico-économique (3)

Cet ensemble de variables explicatives est très riche pour analyser les choix des agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de travail du sol. Il permet de contrôler une grande partie des effets gênant la comparaison des choix des agriculteurs sur les parcelles caractérisées par $s_{\ell k, i} = 1$ versus sur

²⁴ Les données relatives autres parcelles de notre échantillon ne sont pas utilisées pour l'évaluation des effets du scénario s .

²⁵ Nous n'avons pas employé la localisation en fonction des (anciennes) régions administratives afin de pouvoir analyser les effets des variables de sol et de climat, le croisement des variables de sol et le zonage climatique donnant des classes de conditions pédoclimatiques homogènes.

²⁶ L'implantation de couverts d'inter-culture n'est pas considérée comme un choix de gestion de l'état du sol ou du contrôle des adventices dans notre analyse. En effet, l'implantation d'un couvert peut être obligatoire dans certains départements mais n'être que volontaire dans d'autres. En outre, la destruction chimique, essentiellement au glyphosate, des couverts d'inter-culture peut être interdite dans certains départements et pas dans d'autres (Voir ANNEXE). L'implantation ou non d'un couvert est simplement considérée comme une caractéristique de l'inter-culture des parcelles dans nos calculs.

²⁷ Le fait que certaines de ces variables soient redondantes est pris en compte lorsque nécessaire, c'est-à-dire lors de l'estimation des scores de propension.

celles caractérisées par $s_{\ell k, j} = 0$, cette comparaison étant à la base de nos estimations des effets moyens du retrait du glyphosate.²⁸

b. Problème d'estimation considéré : structure formelle

Le cadre d'analyse, dite contrefactuelle ou causale, proposé par Rubin (1974) permet de définir formellement, et clairement, l'effet d'un scénario s de retrait du glyphosate sur un indicateur de choix ou de coût $y_{c, j}$ (e.g., Imbens et Wooldridge, 2010 ; Imbens et Rubin, 2015 ; Li, Morgan et Zaslavsky, 2018). Ce cadre d'analyse requiert l'introduction d'un outil de modélisation sous la forme d'un couple de variable latentes. Ces variables sont latentes dans le sens où elles ne sont que partiellement observées.

La variable latente $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$ définit le choix de y_c de l'agriculteur exploitant la parcelle i s'il travaillait cette parcelle en SCATS d'intensité ℓ sans traitement au glyphosate. La variable $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$ est observée si $s_{\ell k, j} = 0$ car dans ce cas on sait que la parcelle i est travaillée en SCATS d'intensité ℓ sans traitement au glyphosate. On a alors simplement $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)} = y_{c, j}$. En revanche, la variable $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$ n'est pas observée si $s_{\ell k, j} = 1$ car cette condition indique que la parcelle i est travaillée en SCATS d'intensité k avec traitement au glyphosate. Dans ce cas, la valeur de $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$ décrit le choix contrefactuel de l'agriculteur i relatif à l'indicateur c dans le scénario s , c'est-à-dire son choix de y_c s'il était « forcé » de travailler la parcelle i selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate conformément à la description de ce scénario.

L'objectif de notre problème d'estimation consiste en fait à estimer $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$ pour les parcelles caractérisées par $s_{\ell k, j} = 1$ (moyenne sur le sous échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$) à partir des choix observés, $y_{c, j} = \tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$, sur les parcelles caractérisées par $s_{\ell k, j} = 0$.

De manière symétrique, la variable latente $\tilde{y}_{c, j}^{k(1)}$ définit le choix de y_c de l'agriculteur exploitant la parcelle i s'il travaillait cette parcelle en SCATS d'intensité k avec traitement au glyphosate. La variable $\tilde{y}_{c, j}^{k(1)}$ est observée si $s_{\ell k, j} = 1$ car dans ce cas on sait que la parcelle i est travaillée en SCATS d'intensité k avec traitement au glyphosate. On a alors $\tilde{y}_{c, j}^{k(1)} = y_{c, j}$. Évidemment, la variable $\tilde{y}_{c, j}^{k(1)}$ n'est pas observée si $s_{\ell k, j} = 0$ mais cette absence d'observation n'est pas gênante outre mesure pour l'évaluation des effets du scénario s . Il s'agit ici d'estimer les effets du retrait du glyphosate pour les utilisateurs de glyphosate.

L'effet du retrait du glyphosate, dans le scénario s sur le choix de y_c peut être défini à partir de couple de variable latentes $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$. Il s'agit simplement de la différence notée, $\tilde{\tau}_{s, c, j}$, qui est donnée par :

$$\tilde{\tau}_{s, c, j} = \tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)} - \tilde{y}_{c, j}^{k(1)}.$$

Il s'agit de la différence entre, d'une part ce que font les agriculteurs, en matière de contrôle des adventices et de travail du sol, sur les parcelles travaillées selon une SCATS d'intensité k avec traitement au glyphosate et, d'autre part ce que feraient ces mêmes agriculteurs s'ils étaient contraints de travailler leurs parcelles selon une SCATS d'intensité $\ell \geq k$ et sans glyphosate.

Puisque le scénario s ne s'intéresse qu'aux parcelles travaillées selon une SCATS d'intensité k avec traitement au glyphosate ($s_{\ell k, j} = 1$), on ne s'intéresse qu'à la mesure des effets décrits par :

²⁸ L'ensemble de variables explicatives \mathbf{x}_i aurait pu être utilement complété, par exemple, par l'historique culturel de la parcelle (mal renseigné) ou d'autres caractéristiques de l'exploitation (non demandées, telles que l'assolement ou la main d'œuvre disponible).

$$\tilde{\tau}_{s,c,i} = \tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)} - y_{c,i} \text{ pour } i \text{ tel que } s_{\ell|k,i} = 1 \text{ (} i \in \mathcal{E}_{k(1)} \text{)}$$

Evidemment, le terme ne peut être calculé directement puisque le choix contrefactuel $\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)}$ n'est jamais observable lorsque $i \in \mathcal{E}_{k(1)}$. En revanche, il est possible d'estimer certaines caractéristiques de la distribution de probabilité des $\tilde{\tau}_{s,c,i}$, tout au moins sous certaines conditions discutées dans la suite.

Nous nous intéressons ici à la moyenne des $\tilde{\tau}_{s,c,i}$ dans la sous-population des agriculteurs (ou parcelles) représentées par le sous-échantillon $i \in \mathcal{E}_{k(1)}$, qui est ici notée $\tau_{s,c}$. Cette moyenne est définie par :

$$\tau_{s,c} = E[\tilde{\tau}_{s,c,i} | s_{\ell|k,i} = 1]$$

et peut également être écrite sous la forme d'une différence de moyennes conditionnelles :

$$\tau_{s,c} = E[\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)} | s_{\ell|k,i} = 1] - E[y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 1].$$

Le terme $\tau_{s,c}$ mesure l'effet moyen du retrait du glyphosate sur le choix de y_c dans le scénario s . Concrètement, il s'agit de l'augmentation moyenne (qui peut être négative) sur la valeur de y_c qui serait induite sur les parcelles actuellement travaillées selon une SCATS d'intensité k avec traitement au glyphosate si ces parcelles devaient être travaillées selon une SCATS d'intensité $\ell \geq k$ et sans traitement au glyphosate.

Le terme $\tau_{s,c}$ correspond à (l'opposé de) ce qu'on nomme l'« effet moyen du traitement pour les traités » dans la littérature statistique, en référence à l'estimation de l'effet de traitements médicaux.²⁹ Cette dénomination n'est pas employée ici car elle est source de confusion.

c. Méthodes d'estimation des effets moyens des scénarios de retrait du glyphosate : les limites des estimateurs dits « naïfs »

Comme indiqué précédemment, le terme $\tau_{s,c}$ est la différence de deux moyennes conditionnelles, $E[\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)} | s_{\ell|k,i} = 1]$ et $E[y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 1]$. La moyenne $E[y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 1]$ peut être simplement estimée, sans biais, par sa contrepartie empirique dans l'échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$, avec l'estimateur $\hat{E}_N[y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 1]$ donné par :

$$\hat{E}_N[y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 1] = \frac{1}{N_{k(1)}} \sum_{i \in \mathcal{E}_{k(1)}} y_{c,i} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} s_{\ell|k,i} y_{c,i}}{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} s_{\ell|k,i}}.$$

La moyenne empirique $\hat{E}_N[y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 1]$ est simplement la moyenne des $y_{c,i}$ sur le sous-échantillon des parcelles actuellement en SCATS d'intensité k avec glyphosate (*i.e.*, les parcelles i telles que $s_{\ell|k,i} = 1$ ou, de manière équivalente, telles que $i \in \mathcal{E}_{k(1)}$).

La moyenne conditionnelle $E[\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)} | s_{\ell|k,i} = 1]$ ne peut être estimée directement puisque les choix contrefactuels $\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)}$ ne sont pas observés.

Le fait que $\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)} = y_{c,i}$ lorsque $s_{\ell|k,i} = 0$ suggère d'utiliser les parcelles du sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$, celles actuellement travaillées selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate, pour estimer de ce feraient en moyenne les agriculteurs s'ils étaient contraints de mettre en œuvre ce type de SCATS également sans glyphosate. L'estimateur de $E[\tilde{y}_{c,i}^{\ell(0)} | s_{\ell|k,i} = 1]$ correspondant est défini par

²⁹ Le terme $-\tau$ correspond à l'« effet moyen du traitement (médical) pour les (patients) traités » dans la littérature médicale. Dans cas des traitements médicaux la variable s_i indique si le patient i est traité ($s_i = 1$, $\mathcal{E}_{(1)}$ étant le groupe « traité ») ou non ($s_i = 0$, $\mathcal{E}_{(0)}$ étant le groupe « placebo ») et la variable $y_{c,i}$ est une mesure son état de santé.

$$\hat{E}_N[y_{c,j} | s_{\ell k,j} = 0] = \frac{1}{N_{\ell(0)}} \sum_{i \in \mathcal{E}_{\ell(0)}} y_{c,j} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} (1 - s_{\ell k,i}) y_{c,j}}{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} (1 - s_{\ell k,i})}.$$

Cet estimateur est désigné sous le nom d'estimateur « naïf » de $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1]$, de même que l'estimateur de τ_s correspondant :

$$\hat{\tau}_{s,c,N}^{\text{Naïf}} = \hat{E}_N[y_{c,j} | s_{\ell k,j} = 0] - \hat{E}_N[y_{c,j} | s_{\ell k,j} = 1]$$

est nommé estimateur « naïf » de τ_s . Cette dénomination provient de ce que, ces estimateurs sont souvent des estimateurs biaisés de leurs « cibles », ce qui est le cas ici.

d. Contrôle des effets des facteurs impactant à la fois les choix de stratégie de travail du sol, et ceux des interventions de désherbage et de travail du sol

La moyenne des choix de y_c sur les parcelles actuellement travaillées selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate, $\hat{E}_N[y_{c,j} | s_{\ell k,j} = 0]$, est un estimateur sans biais de $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 0]$. Or nous avons ici besoin d'un estimateur de $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1]$, c'est-à-dire un estimateur de ce que feraient en moyenne les agriculteurs suivant actuellement une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate. Une condition suffisante pour que les moyennes de $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$ conditionnelles en $s_{\ell k,j} = 1$ et en $s_{\ell k,j} = 0$ soient égales est que les variables $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$ et $s_{\ell k,i}$ soient statistiquement indépendantes. Cette hypothèse d'indépendance n'est clairement pas valide ici, ce qui implique que l'estimateur « naïf » de τ_s est vraisemblablement significativement biaisé.

L'intuition sous-jacente est ici que les agriculteurs adaptent leurs choix de contrôle des adventices et de travail du sol aux caractéristiques de leurs sols, inter-cultures et exploitations, et que ces caractéristiques varient significativement d'une exploitation à l'autre.

Les agriculteurs ne feraient pas les mêmes interventions de désherbage ou de travail du sol sur les parcelles qu'ils choisiraient de travailler selon une SCATS d'intensité k avec glyphosate et sur les parcelles qu'ils choisiraient de travailler selon une SCATS d'intensité $\ell \geq k$ sans glyphosate. Le simple fait qu'ils auraient choisi l'une ou l'autre stratégie de travail du sol et d'utiliser ou non du glyphosate indique que les parcelles considérées ont des caractéristiques (e.g., de sol, d'inter-culture) suffisamment différentes pour expliquer des choix différents en termes d'interventions de désherbage ou de travail du sol.

Dit autrement, il n'est pas possible de comparer en moyenne ce qui est fait sur des parcelles travaillées selon des SCATS différentes sans tenir compte de ce pourquoi elles sont travaillées selon des SCATS différentes. Tenir compte de pourquoi les parcelles sont travaillées selon des SCATS différentes est le rôle de ce que les statisticiens nomment le « contrôle des effets confondants » par les variables explicatives des choix considérés, par les \mathbf{x}_i ici.

Les choix de désherbage et de travail du sol des agriculteurs décrits par les $(\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c,j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k,i}$ sont impactés par de nombreux facteurs communs, par les éléments de \mathbf{x}_i en particulier. Les effets simultanés de \mathbf{x}_i sur $(\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c,j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k,i}$, lorsqu'ils ne sont pas pris en compte correctement, peuvent gêner l'analyse des relations entre $s_{\ell k,i}$ sur $(\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c,j}^{k(1)})$. Par exemple, les choix décrits par les variables

$s_{\ell k, i}$ et $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$ peuvent n'apparaître statistiquement liés que parce qu'ils sont l'un et l'autre impactés par \mathbf{x}_i .

Ces effets « confondants » de \mathbf{x}_i impliquent également que les distributions de \mathbf{x}_i sont généralement différentes dans les sous-échantillons $\mathcal{E}_{k(1)}$ et $\mathcal{E}_{\ell(0)}$. En effet, ces deux ensembles de parcelles ont des caractéristiques (e.g., de sol, d'inter-culture ou d'exploitation) qui diffèrent significativement dans la plupart des scénarios que nous considérons. Par exemple, les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées appartiennent en moyenne à de plus grandes exploitations que les parcelles en labour fréquent. De même les sols des parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées sont souvent plus « difficiles » que les sols des parcelles en labour fréquent. Ces différences de caractéristiques des parcelles d'un sous-échantillon à l'autre ne sont pas nécessairement « massives ». Mais elles sont suffisantes pour que $\hat{E}_N[y_{c, j} | s_{\ell k, i} = 0]$, la moyenne empirique des choix observés sur les parcelles actuellement conduites selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate, soit un estimateur significativement biaisé de $E[\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)} | s_{\ell k, i} = 1]$, la moyenne des choix – contrefactuels – qui seraient observés sur d'autres parcelles si elles devaient être conduites de la même manière durant l'inter-culture. Ceci reflète simplement le fait que les agriculteurs adaptent leurs choix de contrôle des adventices et de travail du sol aux caractéristiques de leurs sols, inter-cultures et exploitations, et que ces caractéristiques varient significativement d'une exploitation à l'autre.

i. Hypothèse d'indépendance conditionnelle

Le fait que les éléments de \mathbf{x}_i « expliquent » à la fois $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k, i}$ peut cependant être très utile, mais à la condition que \mathbf{x}_i expliquent « suffisamment » $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k, i}$. De fait, les principales méthodes proposées par les statisticiens pour estimer des moyennes conditionnelles telles que $E[\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)} | s_{\ell k, i} = 1]$ supposent que les variables explicatives telles que celles contenues dans \mathbf{x}_i expliquent « suffisamment » à la fois $\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}$ et $s_{\ell k, i}$.

Dans notre cas d'étude, le vecteur \mathbf{x}_i constitue un ensemble de variables au contenu très informatif quant aux choix des agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de travail du sol, et quant aux choix décrits par les variables $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k, i}$ en particulier. Nous supposons ici, cette hypothèse étant discutée plus en détails plus bas, que le contenu informatif de \mathbf{x}_i est suffisant pour supposer que l'hypothèse suivante est valide :

(HIC) Les variables $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k, i}$ sont indépendantes conditionnellement en \mathbf{x}_i .³⁰

Cette hypothèse³¹ est vérifiée si le vecteur de variables explicatives \mathbf{x}_i « capte » tout ce qui lie – d'un point de vue statistique – les variables $(\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c, j}^{k(1)})$ et $s_{\ell k, i}$.

Dès lors que l'hypothèse (HIC) est valide, trois approches statistiques peuvent être employées (et éventuellement combinées) pour construire un estimateur, sans biais asymptotique,³² de $E[\tilde{y}_{c, j}^{\ell(0)} | s_{\ell k, i} = 1]$, et donc de $\tau_{s, c}$ (e.g., Imbens et Rubin, 2015 ; Imbens et Wooldridge, 2010 ; Wooldridge, 2010).

³⁰ L'hypothèse (HIC) n'est que suffisante pour appliquer les approches d'estimation présentées dans la suite. Mais elle est plus simple à présenter que les hypothèses nécessaires et suffisantes pour justifier l'utilisation de ces approches.

³¹ Dite d'indépendance conditionnelle de l'assignement dans le traitement, en référence aux expériences médicales.

³² C'est-à-dire à partir de grands échantillons.

ii. *Techniques d'appariement, et « jumelles statistiques » d'une parcelle*

L'approche par les techniques d'appariement consiste à repérer les « jumelles statistiques » des parcelles du sous-échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$ dans le sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ (e.g., Imbens et Rubin, 2015 ; Imbens et Wooldridge, 2010). Une « jumelle statistique » de la parcelle i caractérisée par \mathbf{x}_i est une parcelle j donc les caractéristiques \mathbf{x}_j sont très proches ou « équivalentes » à \mathbf{x}_i . L'estimateur de $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1]$ est alors construit à partir des choix observés sur les « jumelles statistiques » trouvées dans $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ de chacune des parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$. Il s'agit de s'assurer, quasiment directement dans le cas des méthodes d'appariement, de ne comparer les choix des agriculteurs que sur des parcelles qui sont suffisamment comparables.

Cette approche n'est pas retenue ici car elle est délicate à mettre en œuvre dans les cas où les échantillons utilisés ne résultent pas de tirage parfaitement aléatoire comme c'est le cas de l'enquête PK-GCP_2017.³³ Cependant, nous nous référerons dans la suite à la notion de « jumelle statistique » d'une parcelle donnée, notamment pour repérer les parcelles, et les exploitations correspondantes, « en situation » délicate en cas de retrait du glyphosate.

iii. *Techniques de régression, et espérances conditionnelles*

L'approche par les techniques de régression consiste à modéliser les effets de \mathbf{x}_i sur la variable $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$, à partir des observations du sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$, afin de pouvoir les « manipuler » à volonté. Décrire brièvement cette approche est utile pour introduire certains concepts utiles dans la suite.

L'hypothèse (HIC) donne la série d'égalités suivantes :

$$E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | \mathbf{x}_i, s_{\ell k,j}] = E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | \mathbf{x}_i] = E[y_{c,j} | \mathbf{x}_i, s_{\ell k,j} = 0].$$

La seconde indique qu'il est possible d'estimer la fonction d'espérance conditionnelle de $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$ conditionnelle en \mathbf{x}_i , $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | \mathbf{x}_i]$, par des techniques de régression. En effet, on a $E[y_{c,j} | \mathbf{x}_i, s_{\ell k,j} = 0] = E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | \mathbf{x}_i]$ par l'hypothèse (HIC). De plus, l'espérance conditionnelle $E[y_{c,j} | \mathbf{x}_i, s_{\ell k,j} = 0]$ peut être estimée, en tant que fonction de \mathbf{x}_i définie par :

$$\mu_c^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i) = E[y_{c,j} | \mathbf{x}_i, s_{\ell k,j} = 0],$$

à partir de techniques de régression de $y_{c,j}$ sur \mathbf{x}_i appliquées sur le sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$. La fonction d'espérance conditionnelle ainsi estimée est notée $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\cdot)$.

Combinée à la loi des conditionnements successifs, l'hypothèse (HIC) implique également que :

$$E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1] = E[\mu_c^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i) | s_{\ell k,j} = 1].$$

Cette égalité montre que la moyenne des choix contrefactuels sur les parcelles actuellement travaillées selon une SCATS d'intensité k avec glyphosate, $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1]$, peut être estimée, sans biais asymptotique, par la moyenne des espérances conditionnelles $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)$ sur la distribution des \mathbf{x}_i dans le sous-échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$:

$$\hat{E}_N[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1] = \frac{1}{N_{k(1)}} \sum_{i \in \mathcal{E}_{k(1)}} \hat{\mu}_{c,N}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} s_{\ell k,j} \hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)}{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} s_{\ell k,j}}.$$

³³ L'échantillon de parcelles de cette enquête est issu d'un tirage stratifié. Il nous est nécessaire de tenir compte des poids d'échantillonnage des parcelles pour tenir compte de ce que ces parcelles représentent des surfaces potentiellement très variables. L'implication de cette spécificité des données que nous utilisons est discutée par la suite.

De fait, estimer la fonction $\mu_c^{\ell(0)}(\cdot)$, par la fonction $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\cdot)$, permet d'estimer le choix – contrefactuel – de $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$ pour chaque parcelle de $\mathcal{E}_{k(1)}$. Les termes $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)$ sont des estimateurs très précis des espérances conditionnelles $\mu_c^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)$ dès que l'échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ est suffisamment grand. Les termes $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)$ peuvent également être considérés comme des estimateurs des choix contrefactuels $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$ pour les parcelles caractérisées par \mathbf{x}_i . Mais les $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)$ sont généralement des estimateurs très peu précis des $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$. En revanche, la moyenne des $\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i)$ sur le sous-échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$, c'est-à-dire $\hat{E}_N[\hat{\mu}_{c,N_s}^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i) | s_{\ell k,j} = 1]$, est un estimateur très précis de $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1]$ dès lors que $\mathcal{E}_{k(1)}$ est suffisamment grand.

L'approche par la régression n'est pas envisageable dans notre cas d'étude. En effet, elle suppose de construire et d'estimer un modèle de la fonction d'espérance conditionnelle, $\mu_c^{\ell(0)}(\cdot)$, pour chacun des choix et des éléments de coût que nous considérons. Nous considérons ici l'évaluation de 45 indicateurs dans le cadre de 19 scénarios, ce nous amènerait à construire et estimer 855 modèles. En outre certains des indicateurs considérés, les nombres d'intervention en l'occurrence, sont des variables de comptage délicates à modéliser.

e. Pondération par les scores de propension

L'approche d'estimation que nous employons repose sur des techniques dites de pondération par les (les inverses des) scores de propension.

Les fondements de cette approche sont donnés par la propriété suivante :

$$E[\mu_c^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i) | s_{\ell k,j} = 1] = E[\omega_s(\mathbf{x}_i) y_{c,j} | s_{\ell k,j} = 0]$$

où :

$$\omega_s(\mathbf{x}_i) = \kappa_s \frac{p_s(\mathbf{x}_i)}{1 - p_s(\mathbf{x}_i)} \text{ avec } \kappa_s = \frac{1 - E[p_s(\mathbf{x}_i)]}{E[p_s(\mathbf{x}_i)]}$$

et :

$$p_s(\mathbf{x}_i) = P[s_{\ell k,j} = 1 | \mathbf{x}_i].$$

Cette propriété est valide sous des hypothèses très générales (e.g., Li, Morgan et Zaslavsky, 2018). L'hypothèse (HIC) garantissant que $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1] = E[\mu_c^{\ell(0)}(\mathbf{x}_i) | s_{\ell k,j} = 1]$, la propriété rappelée ci-dessus donne l'égalité :

$$E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1] = E[\omega_s(\mathbf{x}_i) y_{c,j} | s_{\ell k,j} = 0].$$

Cette égalité montre qu'il est possible d'estimer simplement $E[\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)} | s_{\ell k,j} = 1]$, la moyenne des choix contrefactuels $\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}$ dans la sous-population d'agriculteurs représentée par $\mathcal{E}_{k(1)}$. Il suffit de calculer la moyenne des $y_{c,j}$ dans le sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ en prenant soin de pondérer les $y_{c,j}$ par les poids définis par la fonction de pondération $\omega_s(\mathbf{x}_i)$. Le rôle de la fonction de pondération $\omega_s(\mathbf{x}_i)$ est ici de « redresser » la distribution de probabilité des \mathbf{x}_i dans le sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ pour la faire tendre vers celle des \mathbf{x}_i dans le sous-échantillon $\mathcal{E}_{k(1)}$ lors du calcul de la moyenne des $y_{c,j}$ dans le sous-échantillon $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ (qui dépend naturellement de la distribution des \mathbf{x}_i dans $\mathcal{E}_{\ell(0)}$).

Dit autrement, il est possible d'estimer ce que feraient en moyenne les agriculteurs qui emploient actuellement une SCATS d'intensité k avec glyphosate sur leurs parcelles s'ils étaient contraints d'employer une SCATS d'intensité $\ell \geq k$ sans glyphosate. Il suffit de calculer la moyenne pondérée des choix des agriculteurs qui emploient actuellement une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate en utilisant

la fonction de poids $\omega_s(\mathbf{x}_i)$. Cette pondération permet de « mimer » la distribution de probabilité des \mathbf{x}_i dans la sous-population des parcelles travaillées actuellement selon une SCATS d'intensité k avec glyphosate (*i.e.*, d'éliminer les effets confondants des \mathbf{x}_i) dans un calcul de moyenne réalisé sur un échantillon de parcelles travaillées actuellement selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate.

i. Score de propension

La fonction de pondération $\omega_s(\mathbf{x}_i)$ est une fonction de $p_s(\mathbf{x}_i)$. Le terme $p_s(\mathbf{x}_i)$ est nommé le score de propension de l'observation par \mathbf{x}_i . Cette fonction de probabilité, qui est donc comprise entre 0 et 1, mesure la « propension » des agriculteurs à travailler leurs parcelles selon une SCATS d'intensité k avec glyphosate plutôt que selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate, en fonction des caractéristiques des sols, des inter-cultures et de leurs exploitations (*i.e.*, conditionnellement en ce qui est mesuré par \mathbf{x}_i). C'est ce que formalise l'équation $p_s(\mathbf{x}_i) = P[s_{\ell k,i} = 1 | \mathbf{x}_i]$.

Les scores de propension sont aisément estimés. L'estimateur de la moyenne pondérée $E[\omega_s(\mathbf{x}_i)y_{c,i} | s_{\ell k,i} = 0]$ est construit à partir de la moyenne empirique correspondante en remplaçant les fonctions de poids $\omega_s(\mathbf{x}_i)$ par des estimateurs de ces fonctions calculés à partir des estimateurs des scores de propension $p_s(\mathbf{x}_i)$. Ce calcul est détaillé dans la suite de cette section.

Les propriétés des scores de propension pour l'estimation des moyennes $E[\omega_s(\mathbf{x}_i)y_{c,i} | s_{\ell k,i} = 0]$ et des effets moyens $\tau_{s,c}$ provient essentiellement de ce que les parcelles qui ont des scores de propension proches ont des caractéristiques « statistiquement équivalentes » pour ce qui concerne les changements de SCATS et le retrait du glyphosate dans le scénario considéré. De fait, les scores de propension sont souvent employés dans les approches d'estimation fondées sur les techniques d'appariement. Par exemple, la parcelle j de $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ peut être définie comme une « jumelle statistique » de la parcelle i de $\mathcal{E}_{k(i)}$ si les scores de propension de ces parcelles sont identiques, ou tout au moins très proches.

Evidemment, les parcelles i et j sont des « jumelles statistiques » si elles ont des caractéristiques, \mathbf{x}_i et \mathbf{x}_j , très proches. Mais ces parcelles peuvent également être « jumelles statistiques » sans avoir des caractéristiques très proches, pourvu que leurs scores de propension, $p_s(\mathbf{x}_i)$ et $p_s(\mathbf{x}_j)$, soient très proches. Par exemple, deux ensembles de caractéristiques peuvent être sensiblement différents selon une comparaison caractéristique par caractéristique tout en ayant des impacts quasiment identiques sur les choix des agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de travail du sol. Les caractéristiques des parcelles correspondantes ne sont pas identiques au sens usuel du terme mais elles sont quand-même « équivalentes » pour ce qui concerne l'analyse des choix des agriculteurs en matière de contrôle des adventices et de travail du sol.³⁴

ii. Condition de recouvrement des scores de propension

La fonction de pondération $\omega_s(\mathbf{x}_i)$ est nulle si $p_s(\mathbf{x}_i) = 0$ et est croissante en $p_s(\mathbf{x}_i)$. Elle donne donc d'autant plus de poids, dans le calcul de $E[\omega_s(\mathbf{x}_i)y_{c,i} | s_{\ell k,i} = 0]$, à la parcelle i de $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ que $p_s(\mathbf{x}_i)$ est élevé. L'intuition sous-jacente à ce principe de pondération par les scores de propension est

³⁴ C'est d'ailleurs cette notion « d'équivalence », mesurée ici par la proximité des scores de propension, qui permet d'éviter la comparaison systématique (et problématique pour des raisons d'explosion combinatoire) de sous-échantillons de parcelles aux caractéristiques identiques (en dehors des SCATS et de l'utilisation de glyphosate).

relativement simple. Le terme $\rho_s(\mathbf{x}_i)$ est d'autant plus petit (proche de 0) que \mathbf{x}_i décrit un ensemble de caractéristiques de la parcelle i qui incitent les agriculteurs à travailler la parcelle i selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate ; Elle a donc peu de « jumelles statistiques » dans l'échantillon des parcelles travaillées selon une SCATS d'intensité ℓ sans glyphosate, ce qui explique son faible poids dans le calcul de $E[\omega_s(\mathbf{x}_i)y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 0]$.

L'expression de la fonction de pondération $\omega_s(\mathbf{x}_i)$ montre que cette fonction n'est pas définie lorsque $\rho_s(\mathbf{x}_i) = 1$. D'un point de vue « statistique », ceci implique que le calcul de $E[\omega_s(\mathbf{x}_i)y_{c,i} | s_{\ell|k,i} = 0]$, et donc de $E[\tilde{y}_{c,j}^{(0)} | s_{\ell|k,j} = 1]$ et $\tau_{s,c}$, n'est pertinent que pour les parcelles dont le score de propension est strictement inférieur à 1. Cette condition définit ce qu'on nomme la « condition de recouvrement des supports des scores de propension » :

$$\rho_s(\mathbf{x}_i) < 1.$$

En pratique, on retire deux types des parcelles des estimations de $E[\tilde{y}_{c,j}^{(0)} | s_{\ell|k,j} = 1]$ et $\tau_{s,c}$ pour garantir le respect de la condition de recouvrement des supports.

- (a) Les parcelles de l'échantillon dont le score de propension est trop proche de 1. La fonction de pondération $\omega_s(\mathbf{x}_i)$ tendant à l'infini lorsque le score de propension $\rho_s(\mathbf{x}_i) = 1$ s'approche de 1, les estimateurs de $E[\tilde{y}_{c,j}^{(0)} | s_{\ell|k,j} = 1]$ et $\tau_{s,c}$ deviennent instables car très dépendants de quelques observations à score de propension très élevé.
- (b) Les parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$ dont le score de propension est supérieur à la borne maximale du support (ou de la partie suffisamment « dense » de ce support) des scores de propension des parcelles de $\mathcal{E}_{\ell(0)}$. Ces parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$ n'ont pas (ou trop peu) de « jumelles statistiques » dans $\mathcal{E}_{\ell(0)}$.

D'un point de vue statistique, les parcelles satisfaisant les conditions d'exclusion (a) et/ou (b) sont « trop particulières » pour entrer dans un calcul d'effet moyen.

iii. Condition de recouvrement des scores de propension et exploitations en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate

Les parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$ qui sont exclues des estimations des effets moyens de nos scénarios parce qu'elles n'ont pas de « jumelles statistiques » dans $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ présentent un intérêt particulier dans le cadre de notre étude. En effet, dans les scénarios concernant des parcelles actuellement traitées au glyphosate, les parcelles satisfaisant la condition (b) ont des caractéristiques telles qu'aucun agriculteur, ou très peu d'entre eux, ont choisi de les travailler sans glyphosate.

Les caractéristiques de ces parcelles sont systématiquement examinées dans notre étude car elles permettent de révéler les caractéristiques des exploitations qui seraient potentiellement les plus en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate.

De manière plus générale, les parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$ satisfaisant les conditions (a) et/ou (b) dans les scénarios concernant des parcelles actuellement traitées au glyphosate seraient en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate. En effet, les parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$ satisfaisant les conditions (a) et (b) cumulent une grande partie des caractéristiques contenues dans les \mathbf{x} qui incitent les agriculteurs à utiliser du glyphosate en inter-culture et à réduire l'intensité de leur SCATS.

Le fait qu'elles n'aient pas, ou trop peu, de « jumelles statistiques » dans le sous-échantillon des parcelles de $\mathcal{E}_{\ell(0)}$ montre que très peu d'agriculteurs souhaitent travailler ces parcelles selon une

SCATS intense sans glyphosate. Ceci suggère que les caractéristiques de ces parcelles rendent ces parcelles très coûteuses à travailler selon une SCATS intense sans glyphosate.

Par exemple, les exploitations identifiées par nos calculs comme en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate sont souvent des grandes ou très grandes exploitations, avec des sols difficiles (e.g., sols superficiels et caillouteux, sols argileux). La taille de l'exploitation semble ici jouer un rôle amplificateur des difficultés de travail du sol, ce qui s'explique en grande partie par des questions d'organisation du travail au moment de la préparation des semis.

Les effets de la taille des exploitations révélés par nos calculs appellent quelques commentaires relatifs à la définition de nos scénarios. En effet, nous aurions pu définir d'autres scénarios, selon le statut donné à la taille des exploitations dans nos calculs. Les choix que nous avons faits dans ce domaine ont un impact sur la définition de ce qu'on a désigné ci-dessus comme les « situations délicates » en cas de retrait du glyphosate. Nous avons le choix entre deux types de scénarios, qu'on pourrait qualifier de scénarios « à structures d'exploitation constantes » pour l'un et de scénarios « avec ajustement des structures d'exploitation » pour l'autre. Les comparer permet de préciser l'interprétation des « situations délicates » en cas de retrait du glyphosate.

Dans le cas « à structures d'exploitation constantes », celui retenu, on examine les effets potentiels du retrait du glyphosate en intégrant les variables de taille des exploitations dans le vecteur des variables de contrôle, \mathbf{x}_i . De ce fait, on ne s'autorise qu'à comparer les pratiques de désherbage et de travail du sol que d'exploitations de tailles proches. C'est d'autant plus vrai que la taille de l'exploitation est un déterminant important des choix de stratégie de travail du sol et de recourt au glyphosate. Dans ce cas, les « situations délicates » identifiées sont fréquemment de très grandes exploitations « à sols difficiles » parce qu'il n'existe pas ou trop peu d'exploitations de taille équivalente avec des caractéristiques pédoclimatiques équivalentes qui n'utilisent pas de glyphosate. L'idée sous-jacente à la définition de ces scénarios est donc que ce qui n'est pas observé n'est vraisemblablement pas « possible » ou « trop coûteux pour être mis en œuvre » dans l'état actuel de ce dont disposent les agriculteurs.

Dans le cas « avec ajustement des structures d'exploitation », on examine les effets potentiels du retrait du glyphosate sans tenir compte de la taille des exploitations. On exclut alors les variables de taille de SAU dans le vecteur des variables de contrôle \mathbf{x}_i et on s'autorise à comparer les pratiques de désherbage et de travail du sol d'exploitations de tailles potentiellement très éloignées. L'idée sous-tendant la définition de ce type de scénarios, certainement discutable, est que toute pratique peut être mise œuvre dans toute exploitation, quelle que soit sa taille. En particulier, il « suffit » aux agriculteurs d'ajuster leurs équipements et leur main d'œuvre, voire de recourir à des travaux par tiers ou à la location d'équipement (ou, en dernier ressort, « d'ajuster la taille » de leur exploitation).

Si nous avons employé ce second type de scénarios, la taille de l'exploitation n'aurait pas fait partie de l'ensemble des critères employés pour caractériser des « situations potentiellement délicates » en cas de retrait du glyphosate. Etant donné l'impact de la taille des exploitations sur l'usage du glyphosate que révèle nos calculs, ce choix de scénarios aurait drastiquement réduit la taille de la sous-population des exploitations « en situation délicate ». En effet, ces scénarios supposent, par construction, que toute adaptation au retrait du glyphosate est « potentiellement possible » même si elle n'a jamais été observée. Ce choix de scénarios aurait vraisemblablement eu un impact important

sur la fréquence des « situations délicates » en cas de retrait du glyphosate mais aurait eu un impact bien plus limité sur nos estimations des surcoûts du retrait du glyphosate.

f. Propension des agriculteurs à réduire le travail du sol

L'hypothèse (HIC) suppose que le vecteur de variables explicatives \mathbf{x}_i capte les effets de tout ce qui lie les choix de $(\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c,j}^{k(1)})$ et $s_{\ell|k,i}$. Accepter cette hypothèse revient à supposer que les effets de la propension des agriculteurs à réduire le travail du sol, qui est *a priori* très hétérogène dans la population des producteurs de grandes cultures, sont négligeables sur les choix représentés par $(\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c,j}^{k(1)})$ et $s_{\ell|k,i}$.

Cette dernière hypothèse est évidemment discutable ici. En effet, si \mathbf{x}_i mesure les facteurs « objectifs » déterminant les choix de stratégie de travail du sol des agriculteurs, ces choix dépendent également de facteurs « subjectifs » liés aux motivations des agriculteurs dans ce domaine. Par exemple, le simple fait qu'un agriculteur travaille actuellement ses sols selon une SCATS d'intensité k plutôt que d'intensité $\ell \geq k$ ($s_{\ell|k,i} = 1$) tend à indiquer que cet agriculteur a une propension « intrinsèque », quelle qu'en soit la raison, à la réduction du travail du sol, en tout cas une propension plus marquée que celles des agriculteurs ayant choisi la SCATS d'intensité $\ell \geq k$ ($s_{\ell|k,i} = 0$) dans des conditions équivalentes. De même, à SCATS d'intensité donnée et sur des parcelles identiques, les agriculteurs préférant réduire le travail de leurs sols peuvent choisir de réduire la fréquence et la profondeur de leurs interventions de travail du sol, quitte à accroître leur niveau de protection herbicide chimique, ce qui peut influencer le choix de $y_{c,j}$ à la hausse ou à la baisse, selon la nature de l'indicateur considéré.

Etant donné qu'il n'existe pas de mesure de la propension « intrinsèque » des agriculteurs à réduire l'intensité du travail du sol, il est seulement possible de tenir compte de ses effets potentiels sur nos estimations lors de l'interprétation des résultats obtenus.

Le fait que nos scénarios soient définis à partir de types de SCATS relativement précis suggère que l'impact de la propension à réduire le travail a un impact limité sur nos calculs de surcoûts liés au retrait du glyphosate. En effet, la définition des SCATS tend à limiter l'amplitude des choix que nos scénarios « imposent » aux agriculteurs, notamment pour ce qui concerne les interventions de travail du sol. Ceci revient à supposer que la propension à réduire le travail du sol impacte $s_{\ell|k,i}$ (*i.e.*, l'intensité de la SCATS et l'utilisation ou non de glyphosate) mais n'impacte que très peu les choix $(\tilde{y}_{c,j}^{\ell(0)}, \tilde{y}_{c,j}^{k(1)})$ dès lors que les effets de $s_{\ell|k,i}$ et \mathbf{x}_i sont contrôlés. Sous cette hypothèse, les interprétations des calculs que nous avons proposées jusqu'à présent demeurent valides. En effet, l'hypothèse (HIC) demeure valide.

Cette discussion des effets potentiels de la propension des agriculteurs à réduire le travail du sol souligne par ailleurs le caractère très coercitif de nos scénarios.

g. Mise en œuvre des estimations

Les effets de chacun des 19 scénarios considérés ont été évalués sur chacun des 54 choix techniques ou éléments de coût considérés selon la même démarche. Nous présentons ici brièvement cette démarche.

Nous présentons également certaines spécificités des calculs que nous avons menés et qui sont liés au mode de tirage de l'échantillon de parcelles de l'enquête PK-GCP_2017. De fait, toutes les estimations

et tous les calculs présentés ci-dessous reposent sur des versions pondérées, par les poids d'échantillonnage des parcelles, des estimations et calculs usuels.³⁵ Ceci nous permet d'obtenir des résultats d'estimation présentés en parts de surface et prenant en compte la composition et la répartition géographique actuelles de la production des grandes cultures majeures en France.

Tous nos calculs ont été réalisés avec le logiciel SAS®.

i. Etape 1. Première estimation des scores de propension

Conformément à la pratique usuelle, nous utilisons une approche paramétrique fondée sur un modèle Logit de $s_{\ell|k,i}$ conditionnel en \mathbf{x}_i (le modèle de $s_{\ell|k,i}$ sous-tendant la régression logistique de $s_{\ell|k,i}$ sur \mathbf{x}_i) pour modéliser les scores de propension $p_s(\mathbf{x}_i)$ (e.g., Imbens et Rubin, 2015 ; Imbens, 2015 ; Li, Morgan et Zaslavsky, 2018). Concrètement, nous supposons que :

$$p_s(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\alpha}) = \exp(1 + \exp[-\boldsymbol{\alpha}'_L \mathbf{x}_i - \boldsymbol{\alpha}'_C \mathbf{c}(\mathbf{x}_i)])^{-1}.$$

Nous estimons le vecteur de paramètres $\boldsymbol{\alpha}_0 = (\boldsymbol{\alpha}_L, \boldsymbol{\alpha}_C)$ par le Maximum de Vraisemblance Pondérée sur le sous-échantillon \mathcal{E}_s . Nous pondérons les contributions à la vraisemblance de chaque parcelle par son poids d'échantillonnage, w_i , de sorte à tenir compte de la stratification du tirage de l'enquête PK-GCP_2017.

Toutes nos estimations et calculs reposent sur des versions pondérées par les w_i des estimations et calculs usuels.

La fonction $\mathbf{c}(\mathbf{x}_i)$ définit des croisements des éléments de \mathbf{x}_i . Son introduction dans le modèle de score propension donne de la flexibilité aux scores de propension estimés. Cette flexibilité est nécessaire car les estimateurs de la moyenne pondérée $E[\omega_s(\mathbf{x}_i) y_{c,i} | i \in \mathcal{E}_{\ell(0)}]$, et donc de $\tau_{s,c}$, ne sont sans biais asymptotique que si la fonction de probabilité $p_s(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\alpha})$ est correctement spécifiée (tout au moins pas trop éloignée de la « véritable » fonction de probabilité $p_s(\mathbf{x}_i)$). Comme suggéré par Imbens (2015), nous avons sélectionné les éléments de \mathbf{x}_i et $\mathbf{c}(\mathbf{x}_i)$ conservés dans le modèle $p_s(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\alpha})$ en employant une procédure de sélection de type *forward* avec forçage (option de la Proc Logistic de SAS®), en forçant l'introduction des éléments de \mathbf{x}_i , hors indicatrices d'espèces et de précédents cultureux.

ii. Etape 2. Premier repérage des parcelles « trop particulières » pour le calcul des effets moyens

Pour repérer les parcelles « trop particulières » pour entrer dans le calcul des effets moyens, nous employons le critère proposé par Crump *et al* (2009) mais en ne considérant comme « hors recouvrement des supports » que les scores de propensions les plus élevés, les scores de propension les plus petits ne posant pas de problème pour l'estimation des $\tau_{s,c}$.

L'échantillon \mathcal{E}_s amputé de ses parcelles « trop particulières », car ayant un score de propension trop élevé selon le critère de Crump *et al* (2009), est utilisé dans la suite des calculs des effets moyens.

Dans la plupart des scénarios considérés, l'application du critère de Crump *et al* (2009) nous a conduit à éliminer les parcelles avec un score de propension supérieur à un seuil proche de 0.9, seuil qui est

³⁵. Il convient néanmoins de noter que certains points font toujours débat quant à l'estimation des effets de traitements par les techniques de pondération par les scores de propension. Par exemple, selon Ridgeway *et al* (2015), il convient de tenir compte des poids d'échantillonnage pour l'estimation des scores de propension. En revanche, selon DuGoff, Schuler et Stuart (2014) et Zanutto (2006), les poids d'échantillonnage doivent être ignorés.

standard dans ce contexte. Dans la plupart des scénarios, ce critère conduit à éliminer entre 0.4% et 6.4% des parcelles concernées par le scénario considéré, ce pourcentage variant de 7.4% à 17.4% pour les scénarios concernant les parcelles en semis direct.

Nous avons également veillé à éliminer les parcelles de $\mathcal{E}_{k(1)}$ dont le score de propension est supérieur à la borne maximale du support (ou de la partie suffisamment « dense » de ce support) des scores de propension des parcelles de $\mathcal{E}_{l(0)}$. Seules quelques parcelles, sur l'ensemble des scénarios considérés, ont été éliminées sur ce critère, le critère de Crump *et al* (2009) ayant généralement déjà écarté la plupart des parcelles concernées.

Les parcelles considérées « trop particulières » sont conservées pour analyser leurs caractéristiques, ces parcelles étant considérées comme en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate.

iii. Etape 3. Seconde estimation des scores de propension

Comme suggéré par Imbens (2015), nous avons ré-estimé les scores de propension à partir de l'échantillon tronqué obtenu à la fin de l'Etape 2, et selon l'approche d'estimation de l'Etape 1.

Nous avons également cherché à repérer les parcelles « trop particulières » pour entrer dans le calcul des effets moyens, selon l'approche de l'Etape 2. Dans quasiment tous les scénarios considérés, cette étape de repérage ne conduit à éliminer qu'une ou deux parcelles du calcul des effets moyens et, donc, à considérer ces parcelles comme étant « en situation délicate » en cas de retrait du glyphosate.

L'échantillon \mathcal{E}_s à la suite de l'Etape 2 et amputé des parcelles jugées comme « trop particulières » à la suite de cette Etape 3 est celui utilisé dans la suite des calculs des effets moyens.

L'estimateur de α obtenu lors de cette Etape 3 est noté $\hat{\alpha}_{N_s}$ et les estimateurs des scores de propension correspondants sont notés $p_{s,j}(\hat{\alpha}_{N_s})$ et définis par $p_{s,j}(\hat{\alpha}_{N_s}) = p_s(\mathbf{x}_j; \hat{\alpha}_{N_s})$.

iv. Etape 4. Estimation des effets moyens et de leur variance d'estimation

L'estimateur de la méthode de pondération par les scores de propension de l'effet moyen du scénario s sur y_c , $\tau_{s,c}$, est noté $\hat{\tau}_{s,c,N_s}^{PSP}$. Cet estimateur est construit à partir de la formulation de $\tau_{s,c}$ donnée par :

$$\tau_{s,c} = \mu^{\ell(0)} - \mu^{k(1)}$$

où :

$$\mu^{\ell(0)} = E[\omega_{s,j}(\alpha)y_{c,j} | s_{\ell|k,j} = 0],$$

$$\mu^{k(1)} = E[y_{c,j} | s_{\ell|k,j} = 1]$$

et :

$$\omega_{s,j}(\alpha) = \kappa_s \frac{p_s(\mathbf{x}_j; \alpha)}{1 - p_s(\mathbf{x}_j; \alpha)} \text{ avec } \kappa_s = \frac{1 - E[s_{\ell|k,j}]}{E[s_{\ell|k,j}]}.$$

L'estimateur de $\tau_{s,c}$ que nous employons a été suggéré par Ridgeway *et al* (2015). Il est donné par :

$$\hat{\tau}_{s,c,N_s}^{PSP} = \hat{\mu}_{N_s}^{\ell(0)} - \hat{\mu}_{N_s}^{k(1)}$$

où :

$$\hat{\mu}_{N_s}^{\ell(0)} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} w_i (1 - s_{\ell(k,i)}) \omega_{s,j}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{N_s}) y_{c,i}}{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} w_i (1 - s_{\ell(k,i)}) \omega_{s,j}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{N_s})}$$

$$\hat{\mu}_{N_s}^{k(1)} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} w_i s_{\ell(k,i)} y_{c,i}}{\sum_{i \in \mathcal{E}_s} w_i s_{\ell(k,i)}}$$

et :

$$\omega_{s,j}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{N_s}) = \frac{p_{s,j}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{N_s})}{1 - p_{s,j}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{N_s})}.$$

Les propriétés des estimateurs que nous employons ont été établies de longue date pour des échantillons issus de tirages aléatoires, c'est-à-dire dans les cas où $w_i = 1$ pour $i \in \mathcal{E}_s$ (e.g., Lunceford et Davidian, 2004 ; Li, Morgan et Zaslavsky, 2018). Ce n'est malheureusement pas le cas pour les propriétés théoriques des estimateurs avec poids d'échantillonnage, c'est-à-dire conçus pour des échantillons issus de tirages stratifiés, dont $\hat{\tau}_{s,c,N_s}^{PSP}$ est un exemple (voir, e.g., Ridgeway, Kovalchik, Griffin et Kabeto, 2015 ; Li, Morgan et Zaslavsky, 2018).

Dans la plupart des études publiées, les auteurs établissent les propriétés empiriques de ce type estimateurs à partir de techniques de ré-échantillonnage, généralement des techniques de *bootstrap*. Etant donné le nombre d'effets moyens que nous évaluons, cette approche est inenvisageable dans le cadre de notre étude.

Faute de l'avoir trouvée dans la littérature statistique, il nous a été nécessaire de calculer la distribution asymptotique des estimateurs des effets moyens de nos scénarios. Nous présentons ici les résultats de nos travaux de recherche, pour deux raisons. D'une part, nous avons utilisé ces résultats pour évaluer les effets de nos scénarios de retrait du glyphosate. D'autre part, ces résultats n'ont pas été publiés, donc n'ont pas encore été validés, et éventuellement corrigés, par nos pairs. Aussi, les présenter nous apparaît nécessaire pour la transparence de la présentation de notre démarche de calcul.

En adoptant le cadre d'analyse général proposé par Li, Morgan et Zaslavsky (2018), nous avons dérivé les propriétés asymptotiques d'une famille d'estimateurs utilisant des pondérations par les scores de propension que ces auteurs nomment estimateurs « à poids d'équilibrage ». Ces estimateurs visent à estimer des effets moyens dont $\tau_{s,c}$ est un cas particulier. Les effets moyens dont l'estimation est visée ici sont de la forme :

$$\tau = \mu^0 - \mu^1$$

où :

$$\mu^0 = E[\omega_i^0(\boldsymbol{\alpha}) y_i | s_i = 0] \text{ avec } \omega^0(\boldsymbol{\alpha}) \propto \frac{h(\mathbf{x}_i)}{1 - p_i(\boldsymbol{\alpha})}$$

$$\mu^1 = E[\omega_i^1(\boldsymbol{\alpha}_0) y_i | s_i = 1] \text{ avec } \omega^0(\boldsymbol{\alpha}) \propto \frac{h(\mathbf{x}_i)}{p_i(\boldsymbol{\alpha})}$$

et :

$$p_i(\boldsymbol{\alpha}_0) = P[s_i = 1 | \mathbf{x}_i].$$

Nous omettons ici les indices et exposants k , ℓ et s afin d'alléger les notations. La fonction $h(\mathbf{x}_i)$ qui entre dans la définition des fonctions de poids $\omega^0(\boldsymbol{\alpha})$ et $\omega^1(\boldsymbol{\alpha})$ permet de définir la population d'intérêt

ciblée par l'effet moyen τ . Dans le cas de $\tau_{s,c}$ il s'agit de la sous-population des parcelles telles que $s_i = 1$, auquel cas $h(\mathbf{x}_i) = p_i(\boldsymbol{\alpha})$.

Nous supposons que l'échantillon employé pour estimer τ , $\boldsymbol{\alpha}$ et $\boldsymbol{\mu} = (\mu^0, \mu^1)$ est de taille N et est issu d'un tirage à stratification à probabilités variables conduisant aux poids d'échantillonnage w_i .

A la suite des travaux de Lunceford et Davidian (2004), nous construisons des M-estimateurs de $\boldsymbol{\alpha}$ et $\boldsymbol{\mu}$, mais dans une version pondérée avec les poids d'échantillonnage w_i . Puis nous dérivons leurs propriétés en nous inspirant des travaux de Wooldridge (1999, 2001) sur les M-estimateurs pondérés et de Wooldridge (2010) sur les estimateurs construits en deux étapes. En effet, l'estimateur de $\boldsymbol{\mu}$ est construit à partir d'un estimateur du Maximum de Vraisemblance Pondérée de $\boldsymbol{\alpha}$, noté $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N$.

Les M-estimateurs pondérés de τ et $\boldsymbol{\mu}$ sont donnés par

$$\hat{\tau}_N = \hat{\mu}_N^0 - \hat{\mu}_N^1$$

où :

$$\hat{\mu}_N^0 = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i (1 - s_i) \omega_i^0(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) y_i}{\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i (1 - s_i) \omega_i^0(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)} \text{ avec } \omega_i^0(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) = \frac{h(\mathbf{x}_i)}{1 - p_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)}$$

et :

$$\hat{\mu}_N^1 = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i s_i \omega_i^1(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) y_i}{\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i s_i \omega_i^1(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)} \text{ avec } \omega_i^1(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) = \frac{h(\mathbf{x}_i)}{p_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)}.$$

Nous montrons que l'estimateur de $\boldsymbol{\mu}$, qui est défini par $\hat{\boldsymbol{\mu}}_N = (\hat{\mu}_N^0, \hat{\mu}_N^1)$, est convergent et asymptotiquement normal. Sa matrice de variance-covariance asymptotique, $\boldsymbol{\Omega}$, est donnée par :

$$\boldsymbol{\Omega} = E[\mathbf{Q}_i(\boldsymbol{\alpha})]^{-1} E[w_i \mathbf{u}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha})'] E[\mathbf{Q}_i(\boldsymbol{\alpha})]^{-1}$$

où :

$$\mathbf{u}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}) = \mathbf{q}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}) - E[\mathbf{q}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}) \mathbf{s}_i(\boldsymbol{\alpha})'] E[\mathbf{s}_i(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{s}_i(\boldsymbol{\alpha})']^{-1} \mathbf{s}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}),$$

$$\mathbf{q}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}) = \begin{bmatrix} \omega_i^0(\boldsymbol{\alpha}) (1 - s_i) (y_i - \mu^0) \\ \omega_i^1(\boldsymbol{\alpha}) g_i(y_i - \mu^1) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{s}_i(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\alpha}} \ln p_i(\boldsymbol{\alpha}) = (s_i - p_i(\boldsymbol{\alpha})) \mathbf{x}_i,$$

et :

$$\mathbf{Q}_i(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}'} \mathbf{q}_i(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}) = - \begin{bmatrix} (1 - s_i) \omega_i^0(\boldsymbol{\alpha}) & 0 \\ 0 & s_i \omega_i^1(\boldsymbol{\alpha}) \end{bmatrix}.$$

Un estimateur de la variance de $\hat{\boldsymbol{\mu}}_N$ est alors donné par :

$$\hat{V}_N[\hat{\boldsymbol{\mu}}_N] = \left(\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i \mathbf{Q}_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) \right)^{-1} \left(\sum_{i \in \mathcal{E}} (w_i)^2 \hat{\mathbf{u}}_{i,N}(\hat{\boldsymbol{\mu}}_N, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) \hat{\mathbf{u}}_{i,N}(\hat{\boldsymbol{\mu}}_N, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)' \right) \left(\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i \mathbf{Q}_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) \right)^{-1}$$

où :

$$\hat{\mathbf{u}}_{i,N}(\hat{\boldsymbol{\mu}}_N, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) = \mathbf{q}_i(\hat{\boldsymbol{\mu}}_N, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) - \left(\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i \mathbf{q}_i(\hat{\boldsymbol{\mu}}_N, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) \mathbf{s}_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)' \right) \left(\sum_{i \in \mathcal{E}} w_i \mathbf{s}_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N) \mathbf{s}_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)' \right)^{-1} \mathbf{s}_i(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_N)$$

La convergence et la normalité asymptotique de $\hat{\tau}_N$ sont des conséquences directes des propriétés de $\hat{\boldsymbol{\mu}}_N$. De même, un estimateur de la variance de $\hat{\tau}_N$ est aisément obtenu à partir de $\hat{V}_N[\hat{\boldsymbol{\mu}}_N]$.

Les résultats présentés ici sont directement appliqués pour construire les estimateurs des effets moyens de nos scénarios – *i.e.*, les termes $\hat{\tau}_{s,c,N_s}^{PSP}$, $\hat{\mu}_{N_s}^{\ell(0)}$ et $\mu_{N_s}^{k(1)}$ – et calculer des estimateurs de leur variance.

6 Résultats d'estimation des surcoûts liés au retrait du glyphosate

Cette section présente une sélection de nos résultats d'estimation des surcoûts liés au glyphosate. Les résultats détaillés, incluant en particulier les écarts-types estimés d'estimation des effets estimés reportés ici, sont fournis en annexe. Les limites de nos calculs sont rappelées de sorte à nuancer l'interprétation de nos résultats.

Dans un premier temps, nous présentons des considérations générales relatives – *e.g.*, précision, recouvrement des échantillons lors des comparaisons de moyennes, intérêt de la pondération par les scores de propension – des estimations calculées.

Nous discutons dans un second temps du cas des parcelles identifiées comme étant « en situation délicate » en cas de retrait du glyphosate.

Dans un troisième temps, nous présentons en détail comment nous avons calculé les estimations des surcoûts liés au retrait du glyphosate dans les scénarios généraux que nous considérons, en prenant l'exemple de notre scénario général de référence. En particulier, il nous a fallu poser certaines hypothèses et trancher certaines questions. Nous présentons et discutons explicitement ces hypothèses et ces choix.

Nous présentons ensuite les effets techniques du retrait du glyphosate tels qu'ils sont estimés dans notre scénario général de référence.

Nous présentons enfin les évaluations des surcoûts liés au retrait du glyphosate telles qu'elles sont estimées dans notre scénario général de référence, puis dans les autres scénarios que nous considérons. Nous proposons des explications potentielles au fait que nos estimations de surcoûts sont sensiblement inférieures à celles avancées jusqu'à présent.

6.1. Considérations générales

La précision de calculs d'effets moyens du retrait du glyphosate est très bonne pour tous les scénarios considérés, sauf pour les scénarios concernant les parcelles actuellement en semis direct.³⁶ La précision d'estimation est toutefois satisfaisante dans les scénarios concernant les parcelles actuellement en semis direct. Ce différentiel de précision d'estimation est essentiellement dû au différentiel de taille des sous-échantillons considérés dans les scénarios, le sous-échantillon des parcelles en semis direct étant nettement plus petit que les autres.

La précision d'estimation des effets du retrait du glyphosate est très bonne pour tous les indicateurs – nombre et différents coûts – relatifs aux interventions mécaniques, sur les couverts végétaux et de travail du sol. La précision d'estimation est très bonne pour les indicateurs relatifs aux traitements au glyphosate. Elle est simplement bonne pour les IFT et les dépenses d'herbicides sans glyphosate. Ce différentiel de précision d'estimation est très certainement dû au fait que nombre et le prix des herbicides autorisés en culture varient très fortement entre espèces.

Dans tous les cas, les effets moyens estimés qui peuvent être considérés comme importants d'un point de vue technique ou économique (*e.g.*, des changements moyens d'IFT herbicides dépassant 0.3 ou

³⁶ Les écart-types estimés d'estimation, ainsi que certains estimateurs calculés, ne sont pas reportés dans les tableaux du texte pour améliorer la lisibilité de ces derniers. Les résultats détaillés, y compris les écart-types estimés d'estimation, sont donnés dans les annexes.

des surcoûts annuels moyens dépassant 10 €/ha) sont « significativement différents de zéro » d'un point de vue statistique, et souvent très largement

Il est important de rappeler ici que nos estimations sous-estiment très probablement les effets du retrait du glyphosate sur ses principaux substituts en inter-culture. Ceci nous amène à être très prudents quant aux effets que nous estimons pour les herbicides sans glyphosate, ces derniers concernant les herbicides utilisés en culture.

De fait, nous concentrerons nos interprétations de nos estimations de surcoûts sur ceux relatifs aux interventions mécaniques et aux traitements au glyphosate.

Il est intéressant de noter que les estimations obtenues diffèrent sensiblement selon qu'on utilise des estimateurs « naïfs » -- comparaisons de moyennes simples -- ou des estimateurs « PSP » -- comparaisons de moyennes corrigeant des différences structurelles entre les sous-échantillons par redressement selon l'approche de pondération par les scores de propension. Ceci est dû à ce que la plupart des calculs d'effets moyens, en particulier ceux comparant ce qui est fait sur des parcelles avec glyphosate à ce qui est fait sur des parcelles sans glyphosate, comparent des sous-échantillons composées de parcelles aux caractéristiques sensiblement différentes.

Les estimateurs « naïfs » tendent à sous-estimer, et ce de manière quasi-systématique, l'impact du retrait du glyphosate sur le nombre d'interventions de travail du sol. Le sens de ce biais est cohérent avec l'idée de la substitution entre glyphosate et le travail du sol.

6.2 Parcelles en « situation délicates » en cas de retrait du glyphosate

Les calculs réalisés pour la mesure des effets du retrait du glyphosate nous permettent d'identifier les parcelles potentiellement en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate (et qui sont exclues des calculs des effets moyens). Il s'agit principalement de celles sur lesquelles le glyphosate est actuellement utilisé et qui n'ont pas de « jumelles statistiques » dans les sous-échantillons de parcelles actuellement sans traitement au glyphosate. De fait, ces parcelles cumulent suffisamment de facteurs en faveur de l'utilisation de glyphosate pour qu'aucune parcelle aux caractéristiques (statistiquement) équivalentes ne soit pas traitée au glyphosate.

Les statistiques décrivant la taille des sous-échantillons de parcelles avec utilisation de glyphosate sans « jumelles statistiques » dans les sous-échantillons de parcelles actuellement sans traitement au glyphosate sont données dans le De fait, ce résultat concerne l'ensemble des parcelles traitées au glyphosate, quelle que soit la stratégie de travail du sol la caractérisant. La quasi-totalité des parcelles n'ayant pas de « jumelles statistiques » dans les sous-échantillons de parcelles à stratégie de travail du sol équivalente ou plus intense et sans glyphosate font partie d'exploitations de plus de 275ha de SAU, et souvent de plus 350 ha de SAU. Ce résultat s'explique en grande partie par le fait que le désherbage au glyphosate est une alternative efficace et rapide au travail du sol. Le remplacement de travaux du sol par du glyphosate réduit sensiblement les charges de mécanisation et simplifie grandement l'organisation du travail dans les périodes précédant les semis. Les effets des SAU très élevées ont un rôle important car ils ne font pas que s'ajouter à ceux des autres facteurs caractérisant des « situations délicates ». Ils jouent souvent un rôle amplificateur capté, dans les modèles des scores de propension, par les effets d'interaction entre les indicatrices des SAU très élevées et les autres facteurs liés à l'utilisation de glyphosate (et à la réduction du travail du sol).

Tableau 11.

D'après nos calculs, 18 parcelles en semis direct avec utilisation de glyphosate n'ont pas de « jumelles statistiques » dans le sous-échantillon des parcelles en labour fréquent sans traitement au glyphosate, ce qui correspond à 7.4% des parcelles et à 35.1% de surfaces en semis direct avec utilisation de glyphosate

De fait, ce résultat concerne l'ensemble des parcelles traitées au glyphosate, quelle que soit la stratégie de travail du sol la caractérisant. La quasi-totalité des parcelles n'ayant pas de « jumelles statistiques » dans les sous-échantillons de parcelles à stratégie de travail du sol équivalente ou plus intense et sans glyphosate font partie d'exploitations de plus de 275ha de SAU, et souvent de plus 350 ha de SAU. Ce résultat s'explique en grande partie par le fait que le désherbage au glyphosate est une alternative efficace et rapide au travail du sol. Le remplacement de travaux du sol par du glyphosate réduit sensiblement les charges de mécanisation et simplifie grandement l'organisation du travail dans les périodes précédant les semis. Les effets des SAU très élevées ont un rôle important car ils ne font pas que s'additionner à ceux des autres facteurs caractérisant des « situations délicates ». Ils jouent souvent un rôle amplificateur capté, dans les modèles des scores de propension, par les effets d'interaction entre les indicatrices des SAU très élevées et les autres facteurs liés à l'utilisation de glyphosate (et à la réduction du travail du sol).

Tableau 11 Taille des sous-échantillons de parcelles avec glyphosate repérées comme étant potentiellement en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate

			Parcelles avec glyphosate				
			Semis direct (N=242)	TCS (N=1040)	Labour occasionnel (N=720)	Labour fréquent (N=759)	Labour systématique (N=419)
Parcelles sans glyphosate	Labour occasionnel	Nb parcelles	42	61	28		
		% de parcelles	17.4%	5.9%	3.9%		
		% de surface	49.8%	11.8%	11.5%		
	Labour fréquent	Nb parcelles	18	18	5	7	
		% de parcelles	7.4%	1.7%	0.7%	0.9%	
		% de surface	35.1%	3.5%	2.5%	4.3%	
	Labour systématique	Nb parcelles	23	50	23	26	<3
		% de parcelles	9.5%	4.8%	3.2%	3.4%	0.2%
		% de surface	30.0%	8.3%	4.3%	11.3%	2.0%

Toutefois, la taille des exploitations n'est pas la seule caractéristique des parcelles avec glyphosate sans « jumelles statistiques » dans les sous-échantillons de parcelles en travail du sol d'intensité supérieure ou égale sans glyphosate. Certaines caractéristiques des parcelles reviennent quasi-systématiquement dans les profils des « situations délicates » : la spécialisation en grandes cultures, les textures argileuses et argilo-limoneuses et, dans une moindre mesure, une parcelle perçue comme sale (voire très sale). A ces caractéristiques s'ajoutent quasi-systématiquement des sols superficiels et (souvent très) caillouteux dans le cas des parcelles à stratégies du travail du sol sans labour. De manière similaire, les précédents à repousses caractérisent très souvent les parcelles en « situation délicate » dans les stratégies de travail du sol avec labour.

6.3 Effets estimés sur les interventions de désherbage et de travail du sol, et des surcoûts associés, pour le scénario général de référence

Les surcoûts moyens supportés par les agriculteurs (en fonction de leur stratégie de travail du sol) dans notre scénario général de référence sont présentés en quatre temps :

- Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques sur les parcelles avec utilisation de glyphosate
- Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques sur les parcelles sans utilisation de glyphosate
- Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques de désherbage et de travail du sol
- Résultats de l'estimation des surcoûts moyens supportés par les agriculteurs en cas retrait du glyphosate

a. Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques sur les parcelles avec utilisation de glyphosate

Le Tableau 12 se lit comme suit, en considérant le second bloc de résultats, celui correspondant à l'effet du retrait du glyphosate pour les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées :

- La colonne au milieu du bloc [TCS, Gly=1] reporte les ITF des traitements herbicides chimiques et le nombre d'interventions mécaniques réalisées, en moyenne, sur les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées traitées au glyphosate. Par exemple, ces parcelles reçoivent en moyenne 0.34 IFT de glyphosate et 1.716 interventions de travail du sol très superficiels, et 34.8% des surfaces couvertes par ce type de parcelles reçoivent une intervention de travail du sol profond.
- La colonne de gauche du bloc [Lbfreq, Gly=0] reporte les ITF des traitements herbicides chimiques et le nombre d'interventions mécaniques qui seraient réalisées, en moyenne, sur les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées et traitées au glyphosate si ces parcelles étaient travaillées comme le font actuellement, dans des conditions équivalentes, les agriculteurs qui labourent fréquemment leurs parcelles et n'utilisent pas de glyphosate. Par exemple, 61.2% des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées et traitées au glyphosate seraient labourées dans ce scénario.
- La colonne de droite [Lbfreq(0), TCS(1)] reporte la différence entre la colonne [Lbfreq, Gly=0] et la colonne [TCS, Gly=1]. Elle donne notre estimation de l'effet moyen du retrait du glyphosate et du passage à une stratégie de travail du sol avec labour fréquent pour les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées et traitées au glyphosate. Par exemple, dans ce scénario ces parcelles reçoivent en moyenne 0.242 intervention de travail du sol supplémentaire ou, de manière équivalente, 24.2% des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées et traitées au glyphosate reçoivent une intervention de travail du sol supplémentaire.

Tableau 12 Effets moyens estimés du scénario général référence sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. **Cas des parcelles avec traitement(s) au glyphosate, par type de stratégie de travail du sol**

		Avec traitement(s) au glyphosate en inter-culture															
		Semis Direct			Techniques Culturelles Simplifiées			Labour Occasionnel			Labour Fréquent			Labour Systématique			
		Part dans la surface en semis direct			Part dans la surface en techniques culturales simplifiées			Part dans la surface en labour occasionnel			Part dans la surface en labour fréquent			Part dans la surface en labour systématique			
		85.9%			39.3%			24.3%			11.9%			7.6%			
		LbFreq Gly=0	SD Gly=1	LbFreq(0) -SD(1)	LbFreq Gly=0	TCS Gly=1	LbFreq(0) -TCS(1)	LbFreq Gly=0	LbOcca Gly=1	LbFreq(0) -	LbFreq Gly=0	LbFreq Gly=1	LbFreq(0) -LbFreq(1)	LbSyst Gly=0	LbSyst Gly=1	LbSyst(0) -LbSyst(1)	
Sans traitement au glyphosate en inter-culture	Labour Fréquent	IFT Glyphosate	0.000	0.418	-0.418	0.000	0.340	-0.340	0.000	0.375	-0.375	0.000	0.368	-0.368			
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.519	1.806	-0.286	1.676	2.004	-0.327	1.616	1.909	-0.294	1.678	1.952	-0.274			
		Protection herbicide chimique	1.519	2.224	-0.704	1.676	2.344	-0.668	1.616	2.286	-0.671	1.678	2.320	-0.642			
		Interventions mécaniques sur couvert	0.770	0.576	0.194	0.752	0.796	-0.044	0.656	0.636	0.020	0.715	0.736	-0.021			
		Int. travail du sol très superficiel	1.839	0.000	1.839	1.957	1.716	0.242	1.854	1.455	0.399	1.942	1.784	0.158			
		Int. travail du sol superficiel	0.702	0.000	0.702	0.716	0.650	0.066	0.725	0.784	-0.059	0.709	0.583	0.126			
		Int. travail du sol profond, hors labour	0.140	0.000	0.140	0.203	0.348	-0.145	0.160	0.371	-0.211	0.180	0.247	-0.067			
		Labour	0.666	0.000	0.666	0.612	0.000	0.612	0.643	0.183	0.460	0.665	0.522	0.144			
	Toutes int. travail du sol	3.347	0.000	3.347	3.488	2.713	0.775	3.382	2.793	0.589	3.497	3.136	0.361				
	Labour Systématique	IFT Glyphosate													0.000	0.351	-0.351
		IFT Herbicides hors glyphosate													1.666	1.860	-0.194
		Protection herbicide chimique													1.667	2.212	-0.545
		Interventions mécaniques sur couvert													0.579	0.650	-0.071
		Int. travail du sol très superficiel													1.881	1.697	0.184
		Int. travail du sol superficiel													0.570	0.354	0.216
		Int. travail du sol profond, hors labour													0.097	0.089	0.008
Labour														1.013	1.001	0.012	
Toutes int. travail du sol													3.561	3.142	0.419		

Bien entendu, l'effet du passage d'une stratégie de semis direct à une stratégie avec labour fréquent est le plus « spectaculaire » (à défaut d'être le plus probable). Dans ce scénario, les parcelles actuellement en semis direct et traitées au glyphosate sont travaillées à la manière de parcelles actuellement labourées fréquemment et sans utilisation de glyphosate (à conditions équivalentes). Par exemple, ces parcelles perdraient 0.418 passage de glyphosate mais recevraient, en moyenne, 1.839 interventions de travail du sol très superficiel, 0.702 intervention de travail du sol superficiel et 0.14 intervention de travail du sol profond. Deux tiers des surfaces couvertes par ces parcelles seraient labourés.

Les effets moyens de ce scénario sont similaires pour les parcelles en techniques culturales simplifiées et traitées au glyphosate d'une part, et pour les parcelles labour occasionnel et traitées au glyphosate d'autre part, avec, logiquement un effet peu plus marqué pour les parcelles labour occasionnel. Ces parcelles perdraient environ un tiers d'IFT de glyphosate mais recevraient des interventions de travail du sol très superficiel supplémentaires, en moyenne 0.399 pour les parcelles en labour occasionnel et 0.242 pour celles en techniques culturales simplifiées. Un peu moins de deux tiers des surfaces couvertes par ces parcelles seraient labourées.

Dans le cas des parcelles actuellement en labour occasionnel, ceci correspond à une augmentation de 46% des surfaces labourées. Cette augmentation sensible du recours au labour explique la diminution du nombre d'interventions de travail du sol profond, -0.145 pour les parcelles en techniques culturales simplifiées et -0.211 pour celles en labour occasionnel.

On retrouve le même type d'effets moyens pour les parcelles traitées au glyphosate qui, dans notre scénario de référence, ne connaîtraient pas de changement de stratégie de travail du sol, c'est-à-dire pour les parcelles en labour fréquent ou systématique. Ces parcelles perdraient un tiers d'IFT de glyphosate en partie compensé par un accroissement du nombre d'interventions de travail du sol superficiel ou très superficiel, 0.284 en moyenne pour les parcelles en labour fréquent et 0.400 pour celles en labour systématique. La différence d'augmentation des d'interventions de travail du sol superficiel ou très superficiel s'explique en partie par l'augmentation du labour pour les surfaces en labour fréquent, avec 0.144 labour supplémentaire en moyenne.

Ces résultats de comparaison de pratiques d'agriculteurs (à conditions équivalentes) sont intéressants dans la mesure où ils suggèrent qu'il est possible, même à stratégie de travail du sol d'intensité constante, de remplacer des traitements au glyphosate par des interventions de travail du sol, plutôt superficielles, dans le cadre de stratégies de travail du sol relativement intenses. Les statistiques descriptives présentées dans la partie précédente montrent que les stratégies du travail les plus intenses permettent de se passer de glyphosate en inter-culture, à condition que la flore adventice soit « sous contrôle ».

i. Le cas spécifique de l'utilisation des herbicides en culture

Toutes nos comparaisons des pratiques de désherbage et de travail du sol d'agriculteurs (à conditions équivalentes) indiquent que les agriculteurs utilisent davantage d'herbicides en culture (donc sans glyphosate) s'ils travaillent moins leurs sols. Ce résultat est valide, non seulement pour des stratégies de travail du sol différentes, mais également à stratégie de travail du sol constante.

De manière plus spécifique, toutes nos comparaisons des pratiques de désherbage et de travail du sol d'agriculteurs utilisant du glyphosate *versus* n'utilisant pas de glyphosate (à conditions équivalentes) indiquent que les agriculteurs utilisent davantage d'herbicides en culture (donc sans glyphosate) s'ils

utilisent du glyphosate. Dans notre scénario de référence, la réduction de l'IFT des herbicides sans glyphosate varie entre -0.327 (pour les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées) et -0.194 (pour les parcelles actuellement en labour systématique).

Il est en outre important de mettre en évidence le fait que les réductions d'utilisation d'herbicides en culture estimées sont cohérentes. Les réductions estimées sont d'autant plus importantes qu'on compare des stratégies de travail du sol d'intensités éloignées. Par exemple, la différence moyenne d'IFT des herbicides en culture des parcelles en techniques culturales simplifiées par rapport celle des parcelles labourées (en conditions équivalentes) augmente (en valeur absolue) à mesure que la fréquence de labour augmente.

Nos résultats tendent donc à montrer que (a) le travail du sol et la protection herbicide chimique sont, sans surprise, des substituts alors que le glyphosate et (b) les herbicides en culture sont plutôt complémentaires au sein de la protection herbicide chimique.³⁷ Ce résultat est surprenant *a priori* car on s'attend généralement à une substitution entre herbicides chimiques. Deux types d'éléments explicatifs peuvent être avancés.

Tout d'abord, nos résultats sur les effets du retrait du glyphosate pourraient être remis en cause si ces effets étaient estimés sans tenir des effets de la pression adventice sur les choix de traitements herbicides des agriculteurs (ce qui n'est pas le cas, comme cela sera discuté plus bas). En effet, de simples statistiques descriptives confirment l'intuition selon laquelle le glyphosate est surtout employé, en appui des autres herbicides, dans les cas de flores adventices devenues difficiles à contrôler. Cet effet de la perception de la pression adventice sur l'utilisation de glyphosate est très marqué pour les parcelles en labour fréquent, marqué pour les parcelles en sans labour ou en labour occasionnel, mais nettement moins marqué pour les parcelles en labour systématique (Tableau 13). Plus de 25% des surfaces en labour fréquent sont traitées au glyphosate si elles sont jugées très sales, contre seulement 8.7% si elles sont jugées « propres ». Les parts correspondantes sont de 43.9 et 31.9% pour les surfaces non labourées ou labourées occasionnellement, et de 9.2 et 6.6% pour les surfaces en labour systématique. Aussi, si les agriculteurs ont tendance à utiliser plus fréquemment du glyphosate lorsqu'ils jugent leurs parcelles comme « sales » ou « très sales », la perception du salissement de la parcelle joue un rôle moins important sur l'utilisation de glyphosate que l'intensité du travail du sol.³⁸ La part des surfaces traitées au glyphosate des parcelles sans labour ou en labour occasionnel est 4.5 fois plus importante que celle des parcelles en labour systématique (34.1% *versus* 7.6%), celle des parcelles en labour fréquent est 1.6 fois plus importante (11.9% *versus* 7.6%).

Le constat est légèrement différent pour l'utilisation des herbicides sans glyphosate (Tableau 13). La stratégie de travail du sol impacte l'utilisation des herbicides sans glyphosate, avec un écart moyen de 0.25 IFT entre la stratégie avec labour systématique et les stratégies sans labour ou avec labour occasionnel. Mais l'impact de la stratégie de travail du sol est ici légèrement moins important que la perception du salissement des parcelles. L'écart moyen de l'IFT des herbicides sans glyphosate est de l'ordre de 0.60 IFT entre des parcelles jugées comme « très sales » *versus* celles jugées comme « propres ».

³⁷ Le Dicamba et le 2.4D étant des exceptions de ce point de vue.

³⁸ La mesure de perception porte sur l'état de la parcelle en culture. Le fait que les parcelles traitées au glyphosate soit plus souvent perçue comme « très sales » ne doit pas être interprétée comme une preuve d'inefficacité du glyphosate mais comme une conséquence de ce qu'il est difficile de se débarrasser d'une flore adventice développée.

Ceci dit, si les effets de la perception de la pression adventice sur les choix de traitements herbicides des agriculteurs sont prouvés sans ambiguïté, ces effets sont contrôlés dans nos calculs des effets moyens du retrait du glyphosate. En effet, la perception de la pression adventice fait partie de l'ensemble des caractéristiques des parcelles que nous employons pour définir les conditions d'équivalence des parcelles comparées.³⁹ Par conséquent, les effets moyens que nous estimons sur les IFT des herbicides sans glyphosate ne sont pas dus au fait que nous comparons des parcelles avec des pressions adventices perçues différentes.

Il n'en reste pas moins que le fait que le glyphosate soit un herbicide total à très large spectre lui confère un statut à part dans la « boîte à outils de désherbage » des agriculteurs, celui de solution efficace et rapide à mettre en œuvre contre les flores adventices les plus récalcitrantes.

Tableau 13 Relations en la stratégie de travail du sol, l'utilisation de glyphosate en inter-culture et la perception des agriculteurs de la pression adventice sur leurs parcelles

		Perception des agriculteurs de la pression adventice sur leurs parcelles		
Stratégie de travail du sol	Part de surface	Très sale	Sale	Propre
Sans labour ou labour occasionnel	38.4%	16.6%	45.2%	38.2%
Labour fréquent	33.7%	11.8%	43.3%	44.9%
Labour systématique	29.7%	9.2%	42.3%	48.4%
Ensemble	100%	12.9%	43.7%	43.3%
Part de surface traitée au glyphosate en inter-culture				
Stratégie de travail du sol	Toutes perceptions	Très sale	Sale	Propre
Sans labour ou labour occasionnel	34.1%	43.9%	31.9%	32.5%
Labour fréquent	11.9%	25.1%	11.6%	8.7%
Labour systématique	7.6%	9.2%	8.4%	6.6%
Ensemble	19.2%	31.2%	18.8%	16.1%
IFT des herbicides sans glyphosate moyen				
Stratégie de travail du sol	Toutes perceptions	Très sale	Sale	Propre
Sans labour ou labour occasionnel	1.83	2.21	1.88	1.60
Labour fréquent	1.75	2.22	1.81	1.56
Labour systématique	1.58	1.93	1.67	1.44
Ensemble	1.73	2.16	1.80	1.54

Nos estimations des effets moyens du retrait du glyphosate sur les IFT des herbicides sans glyphosate pourraient s'expliquer par les propriétés comparées du glyphosate et des autres herbicides. Son large spectre d'action, sa capacité d'élimination des vivaces et son prix font du glyphosate un concurrent sans équivalent, mais principalement en tant qu'herbicide utilisé en inter-culture.⁴¹ Le glyphosate et

³⁹ L'effectivité du contrôle des effets de la perception de la pression adventice dans nos calculs a été examinée en calculant les effets du retrait du glyphosate pour chaque modalité de salissement perçu. Nous avons obtenu, quelle que soit le niveau de salissement perçu, des effets moyens sur les IFT des herbicides sans glyphosate similaires à ceux obtenus en utilisant les sous-échantillons globaux et la pression adventice perçue en tant que variable de contrôle, confirmant ainsi l'effectivité du contrôle des effets de la pression adventice perçue dans nos calculs des effets moyens du retrait du glyphosate.

⁴¹ Dès lors que les cultures ne sont pas issues de semences OGM résistantes au glyphosate.

les herbicides autorisés en culture sont donc plutôt complémentaires, le premier étant polyvalent mais seulement utilisable contre les adventices levées en inter-culture, les seconds étant sélectifs et utilisables contre les adventices levant en culture. De ce point de vue le travail du sol a pratiquement les mêmes avantages et inconvénients que le glyphosate pour le contrôle des adventices. Il est surtout mobilisable en inter-culture. Le désherbage mécanique en culture n'est possible, en grandes cultures, que pour les plantes sarclées.

Cependant, les résultats que nous obtenons quant aux relations entre glyphosate, herbicides en culture et travail du sol ne peuvent s'expliquer que si le travail du sol est plus efficace que le glyphosate pour le contrôle des adventices en inter-culture. En effet, nos résultats indiquent (a) que l'utilisation de glyphosate et d'herbicides en culture diminue à mesure que l'intensité du travail du sol augmente et (b) que l'utilisation d'herbicides en culture diminue lorsque le glyphosate est remplacé par du travail du sol. De fait, le travail du sol, le labour en particulier, a certains avantages sur le glyphosate,⁴² mais également certaines limites. Par exemple, si le labour permet d'enfouir les graines d'adventices – graines contre lesquelles le glyphosate est sans effet – le labour peut également les faire remonter dans des horizons où elles peuvent germer, si le séjour en profondeur est court. De même, sectionner les rhizomes de certaines vivaces peut favoriser leur multiplication, sauf à répéter l'opération jusqu'à épuisement de la plante (Labreuche *et al*, 2019).

Ceci dit, les agriculteurs semblent attribuer une plus grande efficacité au travail du sol. En tout cas, ceux qui s'en remettent plus au travail du sol, et donc moins au glyphosate, pour le contrôle des adventices se disent plus souvent satisfaits de la « propreté » de leurs parcelles. Les résultats reportés dans le Tableau 13 montrent que les agriculteurs sont globalement (et significativement) d'autant plus satisfaits de l'état de salissement de leurs parcelles que leur travail du sol est intense. Ceci pourrait expliquer nos résultats sur l'utilisation des IFT des herbicides sans glyphosate. Que les perceptions des agriculteurs puissent être biaisées importe peu ici puisque ce sont ces perceptions, et non pas l'état réel des parcelles, qui déterminent leurs choix. Un agriculteur qui est satisfait de l'état de la flore adventice sur ses parcelles est évidemment moins enclin à utiliser des herbicides chimiques.

b. Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques sur les parcelles sans utilisation de glyphosate

Le Tableau 14 reporte nos résultats et hypothèses quant aux effets moyens du retrait du glyphosate sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques pour les parcelles non traitées au glyphosate dans le scénario général de référence.

Ces effets moyens ont été estimés pour les parcelles non traitées actuellement en techniques culturales simplifiées et en labour occasionnel par comparaison des pratiques de désherbage et de travail du sol sur ces parcelles par rapport aux pratiques sur les parcelles non traitées au glyphosate actuellement en labour fréquent (chiffres noirs). Ces effets moyens sont relativement limités, sauf pour le labour.

⁴² Le fait que très peu d'agriculteurs aient complètement abandonné le labour aux Etats-Unis (*e.g.*, Claassen *et al*, 2018) semble donner des arguments en ce sens. En effet, la plupart des producteurs américains de grandes cultures pratiquent régulièrement le semis direct ou implantent leurs cultures sans labour et la quasi-totalité d'entre eux utilisent massivement le glyphosate pour contrôler les adventices, à la fois en inter-culture et en culture puisque la quasi-totalité d'entre eux sèment des variétés OGM résistantes au glyphosate (*e.g.*, Hurley, 2016). Néanmoins, si le labour est utile pour le contrôle des adventices, il est également utile pour restructurer les sols tassés.

Tableau 14 Effets moyens estimés et supposés du scénario général référence sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. **Cas des parcelles sans traitement au glyphosate, par type de stratégie de travail du sol**

		Sans traitement au glyphosate en inter-culture															
		Semis Direct			Techniques Culturelles Simplifiées			Labour Occasionnel			Labour Fréquent			Labour Systématique			
		Part dans la surface en semis direct			Part dans la surface en techniques culturales simplifiées			Part dans la surface en labour occasionnel			Part dans la surface en labour fréquent			Part dans la surface en labour systématique			
		14.1%			60.7%			75.7%			88.1%			92.4%			
		LbFreq Gly=0	SD Gly=1	LbFreq(0) -SD(1)	LbFreq Gly=0	TCS Gly=1	LbFreq(0) -TCS(1)	LbFreq Gly=0	LbOcca Gly=1	LbFreq(0) -	LbFreq Gly=0	LbFreq Gly=1	LbFreq(0) -LbFreq(1)	LbSyst Gly=0	LbSyst Gly=1	LbSyst(0) -LbSyst(1)	
Sans traitement au glyphosate en inter-culture	Labour Fréquent	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		IFT Herbicides hors glyphosate				1.642	1.722	-0.080	1.615	1.770	-0.155						
		Protection herbicide chimique	1.519	1.519	0.000	1.643	1.727	-0.085	1.615	1.771	-0.156	1.952	1.952	0.000			
		Interventions mécaniques sur couvert	0.770	0.576	0.194	0.710	0.552	0.158	0.661	0.581	0.081	0.715	0.736	-0.021			
		Int. travail du sol très superficiel	1.839	0.000	1.839	1.753	1.852	-0.099	1.757	1.740	0.017	1.942	1.784	0.158			
		Int. travail du sol superficiel	0.702	0.000	0.702	0.751	0.848	-0.097	0.683	0.744	-0.061	0.709	0.583	0.126			
		Int. travail du sol profond, hors labour	0.140	0.000	0.140	0.181	0.391	-0.210	0.178	0.282	-0.104	0.180	0.247	-0.067			
		Labour	0.666	0.000	0.666	0.515	0.000	0.515	0.578	0.322	0.256	0.665	0.522	0.144			
	Toutes int. travail du sol	3.347	0.000	3.347	3.199	3.091	0.109	3.196	3.088	0.108	3.497	3.136	0.361				
	Labour Systématique	IFT Glyphosate												0.000	0.000	0.000	
		IFT Herbicides hors glyphosate															
		Protection herbicide chimique												1.860	1.860	0.000	
		Interventions mécaniques sur couvert												0.579	0.650	-0.071	
		Int. travail du sol très superficiel												1.881	1.697	0.184	
		Int. travail du sol superficiel												0.570	0.354	0.216	
		Int. travail du sol profond, hors labour												0.097	0.089	0.008	
Labour													1.013	1.001	0.012		
Toutes int. travail du sol												3.561	3.142	0.419			

La part de surface labourée des parcelles non traitées actuellement en techniques culturales simplifiées passe de 0 à 51.5%. Celle des parcelles non traitées actuellement en labour occasionnel passe de 33.2% à 57.8%, ce qui correspond à un ajout de 25.6% de part de surface labourée. Ce recours accru au labour s'accompagne d'une réduction du nombre d'interventions de travail du sol profond et superficiel, ainsi que d'une réduction, modeste, des IFT des herbicides en culture.

Les effets moyens estimés du retrait du glyphosate sont plus modestes, en valeur absolue, pour les parcelles sans traitement au glyphosate en comparaison de ceux estimés pour les parcelles traitées au glyphosate, à stratégie de travail du sol donnée.

Les effets moyens du retrait du glyphosate sur les parcelles non traitées ne peuvent être estimés pour les parcelles actuellement en semis direct, en labour fréquent et en labour systématique, faute de base de comparaison exploitable (chiffres gris).

Pour ce qui concerne les parcelles non traitées actuellement en semis direct, cette base de comparaison existe mais est trop petite pour obtenir des résultats exploitables d'un point de vue statistique. Seules 58 des parcelles actuellement en semis direct ne sont pas traitées au glyphosate en inter-culture dans notre échantillon. Pour ce qui concerne les parcelles non traitées actuellement en labour fréquent ou systématique, la base de comparaison n'existe tout simplement pas pour notre scénario général de référence.

Nous supposons ici que les effets moyens du retrait du glyphosate sur les parcelles non traitées (a) sont identiques à ceux des parcelles traitées pour ce qui concerne les interventions mécaniques et (b) sont nuls pour ce qui concerne les traitements herbicides.⁴⁴ Cette hypothèse est raisonnable pour ce qui concerne les parcelles en semis direct. Comme discuté ci-dessus, cette hypothèse tend très probablement à surestimer les effets du retrait du glyphosate sur le travail du sol pour les parcelles non traitées au glyphosate actuellement en labour fréquent ou systématique.

c. Résultats de l'estimation des effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques de désherbage et de travail du sol

Les effets calculés pour les parcelles traitées au glyphosate et ceux calculés ou supposés pour les parcelles sans traitement au glyphosate sont ensuite combinés pour obtenir les effets moyens du retrait du glyphosate sur les choix techniques des agriculteurs sur l'ensemble des parcelles de grandes cultures, par type de stratégie de travail du sol. Les estimations ainsi obtenues sont reportées dans le Tableau 15. Évidemment, le poids des effets estimés pour les parcelles traitées au glyphosate est d'autant plus important dans les effets « combinés » que la part des surfaces actuellement traitées au glyphosate est importante dans le type de stratégie de sol considérée. Ce poids augmente à mesure que la fréquence de labour s'accroît.

Les effets estimés du retrait du glyphosate les plus importants concernent les 1.7% de surface actuellement en semis direct. Étant donné que 85.8% des surfaces en semis direct sont traitées au glyphosate (et notre hypothèse sur les effets pour les parcelles non traitées), les effets « combinés » sont pratiquement identiques aux effets sur les parcelles traitées. L'effet moyen sur l'IFT du glyphosate est le seul modifié, pour tenir compte des 14.2% de surface actuellement en semis direct et non traitée.

⁴⁴ Ce qui est logique pour le glyphosate, et qui n'a pas d'impact pour la suite pour les autres herbicides, ces derniers n'étant plus considérés à partir de ce stade de l'analyse.

Tableau 15 Effets moyens estimés du scénario général référence sur les IFT des herbicides et le nombre d'interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. **Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol**

		Avec ou sans traitement(s) au glyphosate en inter-culture														
		Semis Direct			Techniques Culturelles Simplifiées			Labour Occasionnel			Labour Fréquent			Labour Systématique		
		Part dans la surface de grandes cultures 1.7%			Part dans la surface de grandes cultures 18.1%			Part dans la surface de grandes cultures 18.6%			Part dans la surface de grandes cultures 33.7%			Part dans la surface de grandes cultures 27.9%		
		LbFreq Gly=0	SD Gly=1,0	LbFreq(0) -SD	LbFreq Gly=0	TCS Gly=1,0	LbFreq(0) -TCS	LbFreq Gly=0	LbOcca Gly=1,0	LbFreq(0) -LbOcca	LbFreq Gly=0	LbFreq Gly=1,0	LbFreq(0) -LbFreq	LbSyst Gly=0	LbSyst Gly=1,0	LbSyst(0) -LbSyst
Sans traitement au glyphosate en inter-culture	Labour Fréquent	IFT Glyphosate	0.000	0.359	-0.359	0.000	0.134	-0.134	0.000	0.091	-0.091	0.000	0.044	-0.044		
		Interventions mécaniques sur couvert	0.770	0.576	0.194	0.727	0.648	0.079	0.660	0.594	0.066	0.715	0.736	-0.021		
		Int. travail du sol très superficiel	1.839	0.000	1.839	1.833	1.798	0.035	1.780	1.671	0.109	1.942	1.784	0.158		
		Int. travail du sol superficiel	0.702	0.000	0.702	0.737	0.770	-0.033	0.693	0.754	-0.060	0.709	0.583	0.126		
		Int. travail du sol profond, hors labour	0.140	0.000	0.140	0.190	0.374	-0.184	0.174	0.304	-0.130	0.180	0.247	-0.067		
		Labour	0.666	0.000	0.666	0.553	0.000	0.553	0.594	0.288	0.306	0.665	0.522	0.144		
		Toutes int. travail du sol	3.347	0.000	3.347	3.313	2.942	0.370	3.241	3.016	0.225	3.497	3.136	0.361		
	Labour Systématique	IFT Glyphosate												0.000	0.027	-0.027
		Interventions mécaniques sur couvert												0.579	0.650	-0.071
		Int. travail du sol très superficiel												1.881	1.697	0.184
		Int. travail du sol superficiel												0.570	0.354	0.216
		Int. travail du sol profond, hors labour												0.097	0.089	0.008
		Labour												1.013	1.001	0.012
		Toutes int. travail du sol												3.561	3.142	0.419

Pour les parcelles qui reçoivent actuellement des interventions de travail du sol, l'effet moyen du retrait du glyphosate sur l'IFT du glyphosate diminue (en valeur absolue) à mesure que l'intensité de la stratégie actuelle de travail du sol augmente. En effet, les parts de surface traitées au glyphosate diminuant nettement avec la fréquence des labours. Aussi, si le retrait du glyphosate implique une diminution moyenne de l'IFT du glyphosate de -0.134 IFT pour les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées, cette diminution n'est que de -0.027 IFT pour les surfaces actuellement en labour systématique.

L'effet du retrait du glyphosate le plus marquant dans notre scénario général de référence concerne le recours au labour. L'effet estimé d'augmentation des surfaces labourées est en grande partie lié, de manière « mécanique », à notre choix d'imposer au minimum une stratégie de labour fréquent à l'ensemble des parcelles, mais pas seulement.

Nos calculs tiennent compte des différences des caractéristiques des exploitations de chaque type de stratégie de travail du sol considéré. L'augmentation des surfaces labourées est d'autant plus importante que l'intensité de la stratégie de travail du sol actuel de la parcelle est faible. Cette augmentation correspond à 55.3% des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées, à 30.6% des surfaces actuellement en labour occasionnelle (pour un total de 59.4% de surface labourées) et à 14.4% des surfaces actuellement en labour fréquent (pour total de 66.5% de surface labourées), les parcelles actuellement en labour systématique demeurant labourées une fois (deux fois dans de très rares cas) chaque année.

Cette augmentation du recours au labour s'accompagne d'une réduction du nombre d'interventions de travail du sol profond pour les parcelles sur lesquelles ces interventions sont actuellement fréquemment mises en œuvre, c'est-à-dire pour les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées ou en labour occasionnel. Elle est également accompagnée d'une augmentation des interventions de travail du sol très superficiel, en particulier pour les parcelles labourées actuellement.

Les augmentations des interventions de travail du sol sont importantes pour les surfaces actuellement en labour fréquent ou en labour systématique. Selon notre scénario général de référence, 28.4% des surfaces en labour fréquent reçoivent une intervention supplémentaire de travail du sol superficiel ou très superficiel. Cette part est de 40.0% pour les surfaces actuellement en labour systématique. Ces augmentations moyennes du nombre d'interventions de travail du sol superficiel ou très superficiel sont celles que nous avons estimées pour les parcelles avec utilisation de glyphosate en cas de retrait du glyphosate et qui, par hypothèse, ont été imputées aux parcelles sans utilisation de glyphosate.

De fait, ces augmentations d'interventions de travail du sol ont été calculées comme celles pouvant remplacer des traitements au glyphosate sur les parcelles où ces traitements sont appliqués. Elles surestiment peut-être les augmentations du nombre d'interventions de travail du sol qui seraient nécessaires pour compenser la perte des effets retardés des traitements au glyphosate appliqués les années précédentes.

d. Résultats de l'estimation des surcoûts moyens supportés par les agriculteurs en cas de retrait du glyphosate dans le scénario général de référence

i. Résultats du scénario de référence

Les surcoûts estimés du retrait du glyphosate dans notre scénario général de référence sont présentés dans le Tableau 16. Afin d'aider à la lecture de ce tableau de résultats, les moyennes par classe de taille

de SAU des coûts des interventions sur lesquels sont basés nos calculs sont reportés dans le *Tableau 17*. Ces coûts et leur décomposition, sont calculés pour une intervention et sont rapportés à l'hectare.⁴⁵

Le Tableau 16 se lit comme suit, en considérant le second bloc :

- L'entête du second bloc du Tableau 16 indique que ce bloc donne les résultats des surcoûts pour les parcelles actuellement en techniques culturales simplifiées qui, dans notre scénario général de référence, passeraient en labour fréquent sans glyphosate. L'entête de ce bloc rappelle la part de surface de grandes cultures actuellement en techniques culturales simplifiées, 18.1%.
- La première colonne du bloc, « Effet du scénario », rappelle les effets moyens de notre scénario de référence sur les choix techniques en techniques culturales simplifiées. Par exemple, ce scénario implique une réduction moyenne de -0.359 IFT pour le glyphosate et une augmentation des surfaces labourées équivalente à 55.3% des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées.
- La seconde colonne du bloc « Glyphosate » donne les effets du scénario sur les dépenses de glyphosate, une réduction de -4.89 €/ha et par an dans le cas des techniques culturales simplifiées (ce qui correspond à une économie d'environ 12 €/ha sur 40% des surfaces).
- La troisième colonne du bloc « Equipement » donne l'estimation des surcoûts par hectare et par an en matière de charges de mécanisation (investissement, entretien et amortissement) de notre scénario de référence pour les principales interventions de désherbage et de travail du sol. Ces charges incluent les outils (*e.g.*, charrues, pulvérisateurs) et les tracteurs. Dans le cas des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées, l'augmentation de 55.3% des surfaces labourées induite par notre scénario général de référence se traduit par un surcoût moyen des charges de mécanisation de 20.51 €/ha et par an pour les labours.
- Les quatrième et cinquième colonnes, « Carburant » et « Main d'œuvre », reportent nos estimations des surcoûts pour les charges de carburant et de main d'œuvre, en € par hectare et par an. La quantité de main d'œuvre considérée comprend celle apportée par l'exploitant (ou des exploitants). Les charges de main d'œuvre sont évaluées aux salaires proposés par les Barèmes d'entraide (FR CUMA AuRA, 2018). Le prix du gazole est évalué à 0.70 €/l. Dans le cas des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées, l'arrêt des traitements au glyphosate se traduit par des économies de carburant estimées à -0.37 €/ha et par an en moyenne et par des économies de main d'œuvre évaluées à -0.98 €/ha et par an en moyenne.
- La sixième colonne du bloc, « Total sans MO », reporte la somme des troisième et quatrième colonnes (« Total sans MO » = « Equipement » + « Carburant ») alors que la septième, « Total », reporte la somme des sixième et cinquième colonne (« Total » = « Equipement » + « Carburant » + « Main d'œuvre »).
- La septième colonne, « Carburant », reporte nos estimations des augmentations moyennes de consommation de carburant en l/ha et par an. Dans cas des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées, notre scénario général de référence de référence implique une augmentation de la consommation de gazole de 10.73 l/ha et par an, principale en raison de l'augmentation des surfaces labourées qui induit une augmentation moyenne de 13.15 l/ha et par an. Les diminutions du nombre d'interventions de travail du sol profond, d'interventions

⁴⁵ Les éléments reportés dans de tableau sont issus des calculs que nous avons menés pour affecter les éléments de coûts fournis dans les Barèmes d'entraide (FR CUMA AuRA, 2018 ; APCA, 2018) aux exploitations de notre échantillon en fonction, essentiellement, de leur SAU.

mécaniques sur les couverts et de pulvérisations de glyphosate se traduisent par de légères diminutions moyennes de consommation de carburant.

Tableau 16 Surcoûts moyens estimés dans le scénario général référence pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol

	Semis direct avec ou sans glyphosate → Labour fréquent sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 1.7%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glyphosate	Équipement	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.359	-11.93	-8.44	-0.88	-2.32	-21.25	-23.57	-1.25	-0.14
Interventions mécaniques sur couvert	0.194		0.77	-0.01	-0.22	0.76	0.54	-0.02	0.00
Interventions de travail du sol très superficiel	1.839		17.95	6.44	7.23	24.39	31.62	9.20	0.43
Interventions de travail du sol superficiel	0.702		8.54	3.62	4.55	12.17	16.72	5.18	0.29
Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.140		3.26	1.09	1.19	4.35	5.54	1.55	0.07
Labour	0.666		24.30	11.13	13.56	35.42	48.98	15.90	0.78
Toutes interventions de travail du sol	3.347		54.05	22.28	26.53	76.33	102.86	31.82	1.57
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-11.93	46.38	21.39	23.99	55.84	79.83	30.55	1.43

	Techniques culturales simplifiées avec ou sans glyphosate → Labour fréquent sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 18.1%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glyphosate	Équipement	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.134	-4.98	-3.49	-0.37	-0.98	-8.84	-9.81	-0.52	-0.06
Interventions mécaniques sur couvert	0.078		-0.12	-0.10	0.04	-0.22	-0.19	-0.14	0.01
Interventions de travail du sol très superficiel	0.035		0.88	0.23	0.59	1.12	1.71	0.33	0.04
Interventions de travail du sol superficiel	-0.033		0.33	0.09	0.16	0.42	0.57	0.13	0.02
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.184		-4.35	-1.55	-1.65	-5.90	-7.55	-2.21	-0.10
Labour	0.553		20.51	9.21	11.30	29.71	41.02	13.15	0.65
Toutes interventions de travail du sol	0.354		17.36	7.98	10.40	25.35	35.74	11.41	0.61
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-4.98	13.69	7.51	9.45	16.18	25.63	10.73	0.56

	Labour occasionnel avec ou sans glyphosate → Labour fréquent sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 18.6%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glyphosate	Équipement	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.091	-3.22	-2.16	-0.24	-0.65	-5.61	-6.27	-0.34	-0.04
Interventions mécaniques sur couvert	0.066		0.29	0.02	0.15	0.30	0.45	0.02	0.01
Interventions de travail du sol très superficiel	0.109		1.12	0.35	0.52	1.46	1.98	0.49	0.03
Interventions de travail du sol superficiel	-0.060		-0.82	-0.35	-0.32	-1.16	-1.49	-0.49	-0.02
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.130		-2.70	-0.97	-1.02	-3.67	-4.69	-1.38	-0.06
Labour	0.306		9.90	4.74	4.81	14.65	19.46	6.78	0.27
Toutes interventions de travail du sol	0.230		7.50	3.78	3.98	11.28	15.26	5.40	0.22
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-3.22	5.61	3.56	3.47	5.94	9.42	5.08	0.19

	Labour fréquent avec ou sans glyphosate → Labour fréquent sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 33.7%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glyphosate	Équipement	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.044	-1.47	-1.11	-0.12	-0.31	-2.70	-3.01	-0.17	-0.02
Interventions mécaniques sur couvert	-0.021		-0.64	-0.21	0.00	-0.85	-0.85	-0.29	-0.01
Interventions de travail du sol très superficiel	0.158		0.51	0.27	0.33	0.78	1.11	0.39	0.02
Interventions de travail du sol superficiel	0.126		-0.13	0.10	0.14	-0.03	0.11	0.14	-0.01
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.067		-1.74	-0.54	-0.57	-2.28	-2.85	-0.77	-0.03
Labour	0.144		5.98	2.59	3.46	8.57	12.03	3.69	0.20
Toutes interventions de travail du sol	0.340		4.63	2.42	3.35	7.04	10.39	3.45	0.18
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.47	2.87	2.09	3.04	3.49	6.53	2.99	0.15

Tableau 16 Surcoûts moyens estimés dans le scénario général référence pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol (suite)

Effet du scénario	Labour systématique avec ou sans glyphosate → Labour systématique sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 27.9%								
	Coûts financiers (€/ha)						Total	Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
Glyphosate	Équipement	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total				
Traitements au glyphosate	-0.027	-1.08	-0.67	-0.07	-0.21	-1.83	-2.03	-0.10	-0.01
Interventions mécaniques sur couvert	-0.071		0.72	0.24	0.29	0.97	1.25	0.34	0.02
Interventions de travail du sol très superficiel	0.184		-0.41	0.05	0.07	-0.35	-0.28	0.07	0.01
Interventions de travail du sol superficiel	0.216		1.38	0.66	0.89	2.04	2.93	0.94	0.04
Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.008		0.30	-0.09	-0.15	0.20	0.06	-0.14	-0.01
Labour	0.012		1.05	0.50	0.91	1.55	2.47	0.72	0.05
Toutes interventions de travail du sol	0.348		2.32	1.12	1.73	3.44	5.17	1.60	0.09
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.08	2.37	1.29	1.81	2.58	4.38	1.84	0.10

- o La huitième colonne, « Main d'œuvre », reporte nos estimations des augmentations moyennes des quantités de main d'œuvre nécessaires à la mise en œuvre des interventions de désherbage et de travail du sol, en h/ha et par an. Pour les surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées, nos estimations indiquent une augmentation moyenne du travail de 0.56 h/ha (34 mn/ha) et par an due à notre scénario général de référence. Là encore, cette augmentation globale est essentiellement due à l'augmentation des surfaces labourées, qui génère à elle seule un accroissement moyen de travail évalué à 0.65 h/ha et par an.

Tableau 17 Coûts moyens par hectare d'une intervention, par type d'intervention et selon la taille de SAU

	Coûts moyens à l'hectare d'une intervention								
	"Petites" exploitations : SAU =< 100 ha								
	Coûts (€/ha)						Total	Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
Tracteurs	Outils	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total				
Pulvérisations de pesticides	1.84	7.12	1.12	3.69	10.08	13.77	1.60	0.22	
Interventions mécaniques sur couvert	8.09	9.30	7.97	14.41	25.36	39.77	11.39	0.85	
Interventions de travail du sol très superficiel	3.43	7.17	3.96	4.98	14.56	19.54	5.66	0.30	
Interventions de travail du sol superficiel	5.27	8.37	5.66	8.36	19.30	27.66	8.08	0.47	
Interventions de travail du sol profond, hors labour	9.95	17.05	10.22	12.44	37.22	49.66	14.60	0.71	
Labour	19.01	24.97	18.78	28.27	62.77	91.03	26.83	1.66	

	Coûts moyens à l'hectare d'une intervention								
	"Moyennes" exploitations : 100 ha < SAU =< 200 ha								
	Coûts (€/ha)						Total	Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
Tracteurs	Outils	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total				
Pulvérisations de pesticides	1.75	7.13	0.98	2.75	9.86	12.61	1.40	0.16	
Interventions mécaniques sur couvert	6.13	9.21	4.30	4.67	19.65	24.32	6.14	0.38	
Interventions de travail du sol très superficiel	3.16	6.25	3.51	4.09	12.92	17.01	5.02	0.24	
Interventions de travail du sol superficiel	4.91	7.93	5.51	6.77	18.35	25.12	7.87	0.46	
Interventions de travail du sol profond, hors labour	6.21	14.38	6.98	7.08	27.57	34.65	9.98	0.41	
Labour	15.90	18.94	16.76	20.32	51.60	71.92	23.94	1.16	

	Coûts moyens à l'hectare d'une intervention								
	"Grandes" exploitations : 200 ha < SAU								
	Coûts (€/ha)						Total	Carburant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
Tracteurs	Outils	Carburant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total				
Pulvérisations de pesticides	1.61	6.91	0.86	2.14	9.39	11.53	1.23	0.13	
Interventions mécaniques sur couvert	3.20	7.53	3.05	4.41	13.78	18.20	4.36	0.24	
Interventions de travail du sol très superficiel	2.48	5.75	2.99	2.77	11.22	13.99	4.28	0.16	
Interventions de travail du sol superficiel	4.25	7.80	5.24	5.11	17.29	22.40	7.49	0.35	
Interventions de travail du sol profond, hors labour	5.95	13.74	7.06	6.76	26.75	33.50	10.09	0.40	
Labour	13.25	17.59	14.78	14.74	45.62	60.36	21.12	0.85	

ii. *Surcoûts moyens estimés, et « situations délicates » identifiées*

Les surcoûts moyens totaux estimés liés à notre scénario général de référence varient très significativement en fonction du type de stratégie de travail du sol actuellement pratiquée sur les parcelles considérées. Notre scénario général de référence de retrait du glyphosate induirait des surcoûts moyens annuels allant de près de 80 €/ha, pour les surfaces en semis direct, à moins de 10 €/ha pour les surfaces actuellement en labour occasionnel ou avec des fréquences de labour supérieures. Ce scénario supposant l'adoption ou le maintien d'une stratégie de travail du sol à labour fréquent ou systématique, les surcoûts moyens qu'il induit sont d'autant plus importants que les surfaces considérées sont en travail réduit du sol.

Pour les 1.7% de surfaces en semis direct, la mise en œuvre d'une stratégie de travail du sol à labour fréquent sans glyphosate engendre un surcoût moyen annuel estimé à 79.83 €/ha. Ce surcoût se répartit pour environ la moitié en coût de mécanisation, un quart pour le carburant et un quart pour la main d'œuvre. Le surcoût annuel lié au travail sol de 102.86 €/ha, qui correspond plus ou moins aux coûts de travail du sol en labour fréquent, n'est compensé que par une économie de 23.57 €/ha sur les traitements herbicides au glyphosate (coûts de pulvérisation compris). Ces coûts annualisés des charges de mécanisation supposent l'acquisition d'un parc d'équipement de taille substantielle pour les exploitations en semis direct.

L'accroissement substantiel du travail du sol pour les parcelles en semis direct dans notre scénario de référence engendre un accroissement moyen de la consommation annuelle de carburant estimé à 30.55 l/ha (auquel correspond un accroissement des charges annuelles de carburant de 22.28 €/ha). L'accroissement des besoins de main d'œuvre, estimé à 1.57 h/ha par an, a la même origine. Ces besoins accrus en main d'œuvre engendrent des coûts directs estimés à 23.99 €/ha par an. Mais ils supposent également une réorganisation du travail qui peut être substantielle lors des périodes de préparation des semis, en particulier pour les plus grandes exploitations.

De fait, ce scénario suppose des changements très importants pour les parcelles en semis direct puisqu'il suppose l'adoption d'une stratégie de travail du sol avec labour fréquent. De tels changements peuvent être complexes à mettre en place, pour les plus grandes exploitations et/ou celles à sols « difficiles » (*e.g.*, superficiels et caillouteux) en particulier.

Les très grandes exploitations en semis direct et à sol difficile constituent des exploitations repérées lors de nos calculs comme pouvant être en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate. Il n'y a pas, ou très peu, d'exploitations avec des caractéristiques équivalentes (*i.e.*, des « jumelles statistiques ») qui pratiquent fréquemment le labour et n'emploient pas de glyphosate. Ces exploitations potentiellement en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate dans notre scénario de référence représentent 35.1% des surfaces en semis direct. Cette part de surface importante s'explique certainement en partie pour des raisons « statistiques ».⁴⁸ Les 35.1% de surface détectés comme étant en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate proviennent de seulement 7.4% des exploitations en semis direct, ces exploitations étant de grande, voire de très grande taille. S'il est vrai que les effets mesurés ici sont peu précis car ils concernent des effectifs

⁴⁸ D'une part, un individu « aberrant » peut modifier très significativement une moyenne calculée sur un petit échantillon. D'autre part, on détecte « mécaniquement » plus de cas particuliers dans un petit échantillon (242 parcelles en semis direct) lorsqu'on utilise un grand nombre de variables comme nous le faisons.

relativement petits, l'existence de l'effet taille décrit ci-dessus nous semble robuste. En effet, tous nos calculs (*e.g.*, statistiques descriptives, estimation des scores de propension) montrent que la taille des exploitations est un facteur déterminant et qui joue souvent un rôle amplificateur des autres facteurs déterminants de l'utilisation du glyphosate.

Les surcoûts qui seraient supportés par les agriculteurs en semis direct dans notre scénario général de référence de retrait du glyphosate sont, et de loin, supérieurs à ceux qui seraient supportés par les agriculteurs qui travaillent déjà leurs sols.

Pour les 18.1% de surfaces en techniques culturales simplifiées, le surcoût total moyen estimé dans le cadre de notre scénario de référence est de 25.63 €/ha par an. Là encore, la répartition de ce surcoût est de l'ordre de la moitié pour les charges de mécanisation, l'autre moitié étant partagée entre les charges de main d'œuvre et de carburant. Ce surcoût est essentiellement dû au recours au labour fréquent imposé par notre scénario de référence. Ce dernier engendre un surcoût annuel moyen de 41.02 €/ha qui n'est que très partiellement compensé par des économies sur les interventions de travail du sol profond (-7.55 €/ha par an) et les traitements au glyphosate (-9.81 €/ha par an). Alors que près de 86% des surfaces actuellement en semis direct reçoivent en moyenne un traitement au glyphosate (qui coûte environ 26 €/ha, 13 €/ha pour l'achat du glyphosate et 13 €/ha pour le passage du pulvérisateur), moins de 40% des surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées sont traitées au glyphosate, également avec un traitement en moyenne.

L'effet du passage à une stratégie de travail du sol avec labour fréquent serait significatif sur la consommation de carburant et les besoins de main d'œuvre pour les surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées, avec des augmentations annuelles moyennes de 10.73 l/ha pour le carburant et de 0.56 h/ha pour la main d'œuvre.

Notre scénario de référence impose un accroissement des besoins de main d'œuvre importants, quoique de l'ordre du tiers de celui imposé aux surfaces en semis directs, sur les surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées. Cet accroissement des besoins en main d'œuvre peut significativement impacter l'organisation de la préparation des semis et la gestion des adventices des très grandes exploitations en techniques culturales simplifiées, notamment celles avec des sols « difficiles » (superficiels et caillouteux, ou argileux). Les parcelles en techniques culturales simplifiées détectées par nos calculs comme pouvant être en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate appartiennent à ce type d'exploitations. Ces parcelles sont également systématiquement caractérisées par des « précédents à repousse », notamment de colza et de céréales à paille.

Pour les 80.2% de surface actuellement labourées au moins occasionnellement, l'impact de notre scénario de référence sur le coût total du travail du sol et de désherbage au glyphosate est de moins 10 €/ha par an.

Le surcoût annuel moyen du retrait du glyphosate est estimé à 4.38 €/ha pour les surfaces actuellement en labour systématique, à 6.53 €/ha pour celles en labour fréquent et à 9.42 €/ha pour les surfaces en labour occasionnel. Pour les surfaces en labour occasionnel ou fréquent, les surcoûts s'expliquent par un accroissement des surfaces labourées qui engendrent un surcoût annuel moyen de 19.46 €/ha et 12.03 €/ha. Les parts de surfaces traitées au glyphosate étant négativement corrélées avec la fréquence de labour, les économies liées à l'arrêt des traitements au glyphosate diminuent à mesure que la fréquence de labour actuelle augmente. Ces économies varient de 6.27 €/ha par an pour les surfaces en labour occasionnel à 2.03 €/ha par an pour surfaces en labour systématique.

Pratiquement aucune parcelle en labour fréquent ou systématique n'a été repérée comme étant en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate. Les quelques parcelles en labour occasionnel repérées comme telles appartiennent à de très grandes exploitations et sont principalement dans une configuration d'inter-culture de blé sur colza.

Évidemment, nos estimations de surcoûts moyens de moins de 10 €/ha pour les surfaces labourées peuvent paraître très faibles, surtout lorsqu'elles sont comparées à certains chiffres qui ont été évoqués dans la presse comme les « 50 à 150 €/ha par an » cités dans le rapport parlementaire de Novembre 2019 (Fugit et Moreau, 2019).

Bien qu'ils soient faibles, nous considérons que nos surcoûts moyens ne sont pas sous-estimés. Nous rappelons brièvement ici raisons qui expliquent ce point de vue, ces points ayant été déjà exposés précédemment. Tout d'abord, les hypothèses de calcul de notre scénario général de référence tendent à surestimer les surcoûts liés au retrait du glyphosate en matière de travail du sol pour les surfaces en labour fréquent et en labour systématique. Ensuite, nos estimations des effets du retrait du glyphosate ont mis en évidence des réductions des utilisations des herbicides sans glyphosate, et ce dans tous les scénarios que nous avons envisagés. Les conséquences de ces réductions de protection avec herbicide chimique ne sont pas prises en compte dans nos estimations de surcoûts qui sont centrés sur le glyphosate et le travail du sol.

Il ne nous a pas été possible de retrouver les éléments utilisés pour aboutir aux surcoûts qui ont été évoqués depuis que le retrait du glyphosate a été envisagé par l'Etat français. Néanmoins, trois éléments reviennent souvent dans les discussions à ce sujet : l'augmentation de l'utilisation d'herbicides sans glyphosate, le recours au labour et les pertes de rendement. Le premier élément ayant été déjà discuté, nous n'aborderons ici que les deux derniers.

Le labour est l'intervention de travail du sol la plus souvent évoquée en substitution à l'utilisation de glyphosate. Cette substitution joue d'ailleurs un rôle essentiel dans nos calculs de surcoûts. C'est également l'intervention de travail du sol la plus coûteuse, son coût moyen étant de l'ordre 75 €/ha. Néanmoins, ajouter un labour sur chaque parcelle de grandes cultures comme le suggèrent implicitement certains calculs de surcoût reviendrait à labourer deux fois plus de la moitié des surfaces de grandes cultures. En outre, labourer les surfaces qui ne sont pas labourées tend à réduire le recours à d'autres interventions de travail du sol, les plus profondes en particulier. Nos calculs tiennent compte des effets évoqués ici.

Considérer que le retrait du glyphosate ferait perdre 5 à 10% de rendement pour les grandes cultures, comme nous l'avons parfois entendu, implique des pertes économiques importantes. Par exemple, en considérant un rendement moyen de blé tendre à 7.5 t/ha et un prix moyen du blé à 150€/t ces pertes sont de 66 à 112 €/ha. Néanmoins, si le développement des adventices peut nuire au rendement des cultures, le travail du sol complété par une protection herbicide chimique sans glyphosate permet généralement de contrôler les adventices aussi efficacement qu'avec du glyphosate. Les calculs que nous avons réalisés pour examiner cette hypothèse ne l'ont pas remise en cause. Dès lors qu'on contrôle les effets de la stratégie du travail du sol et des caractéristiques des parcelles et des inter-culture l'utilisation de glyphosate a un impact négligeable sur les rendements. Les expertises publiées sur le sujet n'évoquent jamais de « défaut généralisé » de contrôle des adventices en cas de retrait du glyphosate (*e.g.*, Reboud et al, 2017 ; Labreuche *et al*, 2018). Les pertes de rendements évoquées dans ces expertises sont ponctuelles et concernent certaines conditions pédoclimatiques. Elles sont la conséquence de retards de semis ou de lits de semence dégradés dus à des interventions de travail du

sol décalées ou réalisées dans de mauvaises conditions, ce type de problème pouvant parfois être évités grâce à des traitements au glyphosate.

Néanmoins, le fait que les surcoûts du retrait du glyphosate que nous estimons soient des surcoûts moyens peut rendre difficile leur interprétation. En effet, ces surcoûts moyens peuvent masquer, par dilution, des surcoûts potentiellement importants pour certaines exploitations ou/et certaines situations (les cas de « situations délicates » que nous avons systématiquement chercher à identifier, que ce soit dans la littérature ou *via* nos calculs). C'est particulièrement le cas lors ces exploitations sont peu nombreuses et/ou ces situations sont peu fréquentes. Ces points sont discutés ci-dessous.

iii. « Situations délicates » potentiellement non identifiées et surcoûts spécifiques

Dans ce qui précède, nous avons présenté des résultats statistiques, c'est-à-dire essentiellement « en moyenne ». Nous avons également discuté des parcelles ou exploitations potentiellement en « situations délicates » que notre approche permet d'identifier, et qui sont exclues des calculs d'effets moyens parce qu'elles sont « trop particulières ». Nous discutons ici de cas particuliers que notre approche ne peut pas détecter et qui sont « dilués » dans des calculs en moyenne.

Nous nous concentrons notre attention ici sur les exploitations qui pratiquent le labour, pour deux raisons. D'une part, les exploitations et parcelles en en semis direct ou en techniques culturales simplifiées ont déjà fait et feront dans la suite l'objet d'un traitement particulier.

D'autre part, nos estimations de surcoûts moyens tendent à montrer que les effets du retrait du glyphosate seraient limités pour les parcelles actuellement labourées. Selon nous, ces estimations sont pertinentes pour la grande majorité des exploitations concernées. Le fait que 92.4% des surfaces en labour systématique et 88.1% de celles en labour fréquent ne soient pas traitées au glyphosate illustre la faible dépendance des systèmes avec labour vis-à-vis du glyphosate. Il n'en reste pas moins que effets du retrait du glyphosate puissent être bien plus importants que ceux estimés en moyenne, soit pour un nombre limité d'exploitations, soit lors de la survenue d'évènements peu fréquents (qui pourraient potentiellement impacter la plupart des exploitations).

Nos surcoûts moyens estimés tendent à « diluer » des surcoûts potentiellement importants liés au retrait du glyphosate dans trois grands types de cas identifiés dans la littérature (*e.g.*, Reboud *et al*, 2017 ; Labreuche *et al*, 2018).

Certains agriculteurs travaillent leurs sols sensiblement en avance des semis puis éliminent au glyphosate les adventices levées juste avant les semis. Cette stratégie peut être motivée par des considérations essentiellement organisationnelles et/ou économiques. Il s'agit ici d'étaler dans le temps les interventions de travail du sol et de réduire les charges de mécanisation (voire de main d'œuvre). Mais cette stratégie peut également constituer une réponse à une contrainte. Il s'agit ici de contourner les problèmes soulevés par un nombre (chroniquement) insuffisant de jours agronomiques disponibles pour le travail sol juste avant les semis (*e.g.*, sur des sols argileux et/ou très hydromorphes, voir, *e.g.*, Gaubrie, Clavé et Rattier, 2019).

Notre méthode de calcul des surcoûts considère implicitement que les coûts des traitements au glyphosate mis en œuvre dans le cadre de cette stratégie seraient simplement « économisés » en cas de retrait du glyphosate. En outre, les cas où cette stratégie d'anticipation des travaux du sol est motivée par des contraintes liées à des fenêtres d'intervention réduites sont des cas typiques de « situation délicates » en cas de retrait du glyphosate. Les parcelles concernées ne peuvent être

détectées comme étant potentiellement « en situation délicate » en cas de retrait du glyphosate par notre approche.

Le glyphosate peut également être employé dans des systèmes avec labour lorsque la flore adventice a partiellement échappé ou échappe progressivement au contrôle de l'agriculteur. L'utilisation de glyphosate peut être régulière sur longue période lorsque cette situation est la conséquence d'un système de culture très spécialisé également mis œuvre sur longue période. La flore adventice se sélectionne par synchronisation de son cycle biologique avec celui de la rotation courte et peut développer des résistances aux herbicides sélectifs. Le glyphosate vient alors en appui de ces derniers.

Nos calculs tiennent compte des pressions adventices telles qu'elles sont perçues par les agriculteurs mais ne tiennent pas compte des systèmes de cultures. Les parcelles concernées ne peuvent donc être détectées comme étant potentiellement en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate.

Ceci dit, les utilisations de glyphosate considérées ici tentent de pallier des impasses agronomiques engendrées par des systèmes de culture vulnérables vis-à-vis des adventices. Les parcelles concernées peuvent être considérées comme étant déjà en situation délicate d'un point de vue agronomique. Les coûts des traitements au glyphosate peuvent alors être considérés comme des « surcoûts » engendrés par une situation difficilement soutenable.

Les deux cas discutés jusqu'à présent concernent des exploitations spécifiques. Le dernier concerne des situations accidentelles dans lesquelles le glyphosate est employé en tant que solution de rattrapage rapide, efficace, facile à mettre en œuvre et, dans certains cas, « définitive » (*e.g.*, contre les adventices les plus « difficiles »). Il peut s'agir de rattraper les conséquences d'interventions de travail du sol qui se sont avérées être peu efficaces ou impossibles à mettre en œuvre, que ce soit pour contrôler une flore adventice ou pour détruire un couvert d'inter-culture. Il peut également s'agir de développements accidentels d'adventices « coriaces ». Nos calculs tiennent compte de ces situations, mais seulement « difficiles ».

Nos calculs tendent à prouver que ces situations sont peu fréquentes. Il n'en reste pas moins que ces situations peuvent être coûteuses à gérer sans glyphosate lorsqu'elles surviennent. Les solutions à base de travail du sol, comme le labour ou les faux semis, sont certainement un peu moins efficaces, plus coûteuses et sont moins rapides, voire moins « définitives », que le glyphosate.

6.4 Analyses de sensibilité du scénario général de référence

Dans cette section nous comparons les surcoûts moyens que nous avons estimés aux excédents bruts d'exploitation (EBE) des exploitations de grandes cultures afin d'analyser l'impact potentiel du retrait du glyphosate sur le revenu des agriculteurs. Nous présentons également trois types d'analyses de sensibilité des résultats issu de notre scénario général de référence. (a) Nous examinons l'impact de hausses de 30% des charges de mécanisation et de main d'œuvre sur les surcoûts que nous avons estimés. (b) Nous comparons les résultats issus de notre scénario général de référence, selon lequel le retrait du glyphosate contraindrait les agriculteurs à adopter une stratégie de travail du sol avec labour au moins fréquent, à un scénario général « extrême » selon lequel tous les agriculteurs seraient contraints de labourer systématiquement leurs parcelles. (c) Nous revenons spécifiquement sur le cas des parcelles en semis direct et en techniques culturales simplifiées en examinant les surcoûts qui seraient engendrés par l'adoption d'une stratégie de travail du sol avec labour occasionnel.

i. Impacts sur le revenu des agriculteurs des surcoûts moyens estimés dans le cadre de notre scénario général de référence du retrait du glyphosate

Afin de mesurer l'impact sur le revenu des agriculteurs des surcoûts moyens estimés dans le cadre de notre scénario général de référence du retrait du glyphosate nous comparons ici ces surcoûts à l'EBE par hectare (EBE/ha) des exploitations spécialisées dans la production de céréales et d'oléo-protéagineux, c'est-à-dire de grains (OTEX 15) à partir des données du RICA.

Les EBE/ha des exploitations spécialisées dans la production de céréales et oléo-protéagineux sont en moyenne plus faibles que ceux des exploitations spécialisées dans production de grandes cultures en général (qui comprennent également les cultures industrielles en général plus rémunératrices).

Tableau 18 EBE/ha moyens, sur la période 2009–2018, des exploitations spécialisées dans la production de grains, par grande région française

Région\Année	Excédent brut d'exploitation par hectare des exploitations spécialisées dans la production de grains (€/ha)										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Moyenne
Île-de-France	396	772	814	977	590	474	499	125	495	518	566
Centre-Val de Loire	270	726	747	902	466	433	447	80	411	435	492
Bourgogne-Franche-Comté	267	621	677	721	373	308	425	156	416	417	438
Normandie	311	728	774	895	579	471	498	349	433	445	548
Hauts-de-France	324	662	806	862	691	505	539	153	482	491	552
Grand Est	386	726	899	933	560	473	542	289	461	540	581
Pays de la Loire	383	619	787	865	415	481	377	261	395	454	504
Bretagne	908	231	465	383	68	180	317	215	303	340	341
Nouvelle-Aquitaine	376	653	673	792	305	413	378	277	344	418	463
Occitanie	235	602	633	700	297	415	395	338	400	296	431
Auvergne-Rhône-Alpes	265	610	616	759	404	390	319	363	448	551	472
Provence-Alpes-Côte d'Azur	280	485	714	569	372	415	633	450	493	361	477
France métropolitaine	329	668	739	831	448	428	446	229	416	442	498

Note : calcul des auteurs à partir des micro-données du RICA. Les valeurs sont en euros constants 2015.

Le Tableau 18 reporte les EBE/ha moyens des exploitations spécialisées dans la production de grains sur la période 2009–2018, par grande (nouvelle) région française. Ces EBE/ha moyens étant variables d'une région à l'autre et très variables d'une année à l'autre, nous comparons nos estimations des surcoûts du retrait du glyphosate aux EBE/ha moyens sur la période de chaque région. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans le Tableau 19.

Les surcoûts moyens estimés des effets du retrait du glyphosate impacteraient relativement peu le revenu des agriculteurs qui labourent leurs parcelles. En effet, la part de ces surcoûts dans les EBE/ha ne dépassent pas 3%. Cette part est de l'ordre de 1% pour les surfaces actuellement en labour systématique, de 1.5% celles en labour fréquent et de 2% pour celles en labour occasionnel.

En revanche, les surcoûts estimés des effets du retrait du glyphosate (dans le cadre de notre scénario de référence) impacteraient significativement le revenu des agriculteurs qui ne labourent pas leurs parcelles, et plus particulièrement le revenu de ceux qui travaillent essentiellement en semis direct. La part des surcoûts moyens estimés des effets du retrait du glyphosate dans les EBE/ha varie entre 13.7 et 23.4% pour les surfaces actuellement en semis direct, et entre 4.4 et 7.5% pour celles en techniques culturales simplifiées.

Il convient de rappeler ici que les systèmes sans labour sont plus fréquemment pratiqués sur des terres peu productives, les terres à sols superficiels et caillouteux constituant un exemple typique des terres peu productives (et difficiles à travailler) sur lesquelles sont pratiquées le semis direct. Aussi, les ratios surcoûts estimés sur EBE/ha reportés dans le Tableau 19 tendent vraisemblablement à sous-estimer

l'impact estimé du retrait du glyphosate sur le revenu des agriculteurs pratiquant des systèmes sans labour et à (légèrement) surestimer celui sur le revenu des agriculteurs pratiquant, au moins occasionnellement le labour.

Tableau 19 Part des surcoûts moyens estimés dans le cadre de notre scénario général de référence du retrait du glyphosate et des EBE/ha moyens sur la période 2009–2018 des exploitations spécialisées dans la production de grains, par grande région française

	Part du surcoût annuel moyen estimé du retrait du glyphosate dans l'EBE/ha moyen (2009-2018), par type de stratégie de travail du sol et par région				
	Semis direct	Techniques culturales simplifiées	Labour occasionnel	Labour fréquent	Labour systématique
Île-de-France	14.1%	4.5%	1.7%	1.2%	0.8%
Centre-Val de Loire	16.2%	5.2%	1.9%	1.3%	0.9%
Bourgogne-Franche-Comté	18.2%	5.8%	2.1%	1.5%	1.0%
Normandie	14.6%	4.7%	1.7%	1.2%	0.8%
Hauts-de-France	14.5%	4.6%	1.7%	1.2%	0.8%
Grand Est	13.7%	4.4%	1.6%	1.1%	0.8%
Pays de la Loire	15.9%	5.1%	1.9%	1.3%	0.9%
Bretagne	23.4%	7.5%	2.8%	1.9%	1.3%
Nouvelle Aquitaine	17.2%	5.5%	2.0%	1.4%	0.9%
Occitanie	18.5%	5.9%	2.2%	1.5%	1.0%
Auvergne-Rhône-Alpes	16.9%	5.4%	2.0%	1.4%	0.9%
Provence-Alpes-Côte d'Azur	16.7%	5.4%	2.0%	1.4%	0.9%
France métropolitaine	16.0%	5.2%	1.9%	1.3%	0.9%
Part de surface dans les grandes cultures (%)	1.7%	18.1%	18.6%	33.7%	27.9%
Part de surface dans les surfaces de grandes cultures traitées au glyphosate (%)	7.7%	37.0%	23.4%	20.9%	11.1%

De la même manière, il est utile de rappeler ici que les estimations de surcoûts moyens considérées ici ont été calculées « à état des connaissances constant », c'est-à-dire sans tenir compte des éventuelles innovations qui pourraient être induites par le retrait du glyphosate. Ces dernières pourraient, au moins à moyen terme, atténuer les surcoûts de ce retrait.

Enfin, les estimations des surcoûts présentées jusqu'à présent ont été calculées dans le cadre de notre scénario général de référence. Dans la suite de cette section, nous comparons les résultats obtenus avec ce scénario général de référence à ceux obtenus avec deux autres scénarios.

ii. Sensibilité des estimations de surcoûts moyens aux hypothèses sur les charges de mécanisation et de main d'œuvre

Bien que nous ayons ajusté les charges de mécanisation et de main d'œuvre à la taille de notre échantillon, cet ajustement est nécessairement approximatif. D'une part, nous ne connaissons que la SAU des exploitations. L'enquête PK-GCP_2017 ne renseigne pas l'assolement des exploitations, ni même leurs surfaces de terres arables. D'autre part, le fait d'apparier les données des Barèmes d'entraide que nous utilisons et celles de l'enquête PK-GCP_2017 nous a contraint à poser des hypothèses sur la nature des équipements utilisés par les agriculteurs enquêtés.

Enfin, les données des Barèmes d'entraide que nous utilisons reposent sur des hypothèses d'amortissement et de dépréciation des équipements qui, bien que largement acceptées par les

agriculteurs, peuvent impacter le niveau des charges de mécanisation que nous considérons dans nos calculs.

Afin de tester la sensibilité de nos résultats aux hypothèses concernant les charges de mécanisation et de main d'œuvre, le Tableau 20 présente les effets d'augmentations de 30% des charges de mécanisation et de main d'œuvre sur nos estimations de surcoûts moyens.

Tableau 20 Analyse de la sensibilité des surcoûts moyens estimés au niveau des charges de mécanisation et de main d'œuvre

Stratégie de travail du sol actuelle	Semis Direct	Techniques Culturales Simplifiées	Labour Occasionnel	Labour Fréquent	Labour Systématique
	↓	↓	↓	↓	↓
Stratégie de travail du sol supposée après le retrait du glyphosate	Labour Fréquent	Labour Fréquent	Labour Fréquent	Labour Fréquent	Labour Systématique
Scénario général de référence					
Surcoût annuel total (€/ha)	79.83	25.63	9.42	6.53	4.38
Surcoût annuel total hors main d'œuvre (€/ha)	55.84	16.18	5.94	3.49	2.58
Effet sur la consommation annuelle de carburant (l/ha)	30.55	10.73	5.08	2.99	1.84
Effet sur le besoin de main d'œuvre (h/ha)	1.43	0.56	0.19	0.15	0.10
Scénario général de référence + 30% sur les coûts de mécanisation					
Surcoût annuel total (€/ha)	100.16	32.03	12.17	8.02	5.48
Augmentation du surcoût annuel total (€/ha)	+20.33	+6.41	+2.76	+1.49	+1.10
Scénario général de référence + 30% sur les coûts de main d'œuvre					
Surcoût annuel total (€/ha)	87.02	28.46	10.46	7.45	4.93
Augmentation du surcoût annuel total (€/ha)	+7.20	+2.83	+1.04	+0.91	+0.54
Scénario général de référence + 30% sur les coûts de mécanisation et de main d'œuvre					
Surcoût annuel total (€/ha)	107.35	34.87	13.22	8.94	6.02
Augmentation du surcoût annuel total (€/ha)	+27.53	+9.24	+3.80	+2.40	+1.64
Part dans les surfaces totales de grandes cultures					
	1.7%	18.1%	18.6%	33.7%	27.9%
Part dans les surfaces totales de grandes cultures traitées au glyphosate					
	7.7%	37.0%	23.4%	20.9%	11.1%

Sans surprise, une augmentation de 30% des charges de mécanisation et de main d'œuvre impacte plus les surcoûts moyens estimés sur les parcelles sur lesquelles, dans notre scénario général de référence, le travail du sol augmente le plus.

De même, le travail du sol étant coûteux en outils et, pour certaines interventions telles que le labour, en puissance de traction, les effets des augmentations de charges sont plus marqués pour les charges de mécanisation que pour les charges de main d'œuvre.

Néanmoins, même si les effets d'augmentations de 30% des charges de mécanisation et de main d'œuvre ne peuvent être négligées, ces effets ne modifient pas les ordres de grandeur de nos estimations de surcoûts moyens.

iii. Scénarios alternatifs : scénario général « extrême » pour le retrait du glyphosate

Afin d'établir une borne « supérieure » pour les surcoûts moyens du retrait du glyphosate, nous avons défini un scénario « extrême » selon lequel le retrait du glyphosate conduirait tous les agriculteurs à

labourer (ou à continuer à labourer) systématiquement leurs parcelles. Il s'agit ici d'estimer les surcoûts moyens liés à une intensification « maximale » du travail du sol.

Tableau 21 Surcoûts moyens estimés dans le scénario général référence « extrême » pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol

	Semis direct avec ou sans glyphosate → Labour systématique sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 1.7%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carbu-rant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glypho-sate	Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.340	-10.94	-8.10	-0.85	-2.25	-19.90	-22.15	-1.22	-0.13
Interventions mécaniques sur couvert	0.128		1.51	0.44	0.58	1.95	2.53	0.63	0.05
Interventions de travail du sol très superficiel	1.865		17.48	6.26	7.02	23.74	30.76	8.95	0.42
Interventions de travail du sol superficiel	0.522		7.26	2.91	3.61	10.17	13.78	4.16	0.24
Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.055		1.56	0.52	0.55	2.08	2.64	0.74	0.03
Labour	1.015		34.09	15.65	16.92	49.74	66.66	22.35	0.97
Toutes interventions de travail du sol	3.457		60.39	25.34	28.10	85.73	113.83	36.20	1.66
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-10.94	53.80	24.93	26.43	67.79	94.21	35.62	1.57

	Techniques culturales simplifiées avec ou sans glyphosate → Labour systématique sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 18.1%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carbu-rant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glypho-sate	Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.138	-5.09	-3.56	-0.37	-1.00	-9.03	-10.03	-0.53	-0.06
Interventions mécaniques sur couvert	0.113		0.58	0.28	0.69	0.86	1.55	0.40	0.05
Interventions de travail du sol très superficiel	-0.062		1.94	0.48	1.01	2.43	3.44	0.69	0.06
Interventions de travail du sol superficiel	-0.292		-1.84	-0.93	-0.91	-2.77	-3.68	-1.33	-0.05
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.312		-7.09	-2.52	-2.66	-9.61	-12.27	-3.59	-0.16
Labour	1.005		34.58	15.72	17.41	50.30	67.71	22.46	1.00
Toutes interventions de travail du sol	0.337		27.58	12.76	14.86	40.35	55.20	18.23	0.86
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-5.09	24.60	12.67	14.54	32.19	46.73	18.10	0.85

	Labour occasionnel avec ou sans glyphosate → Labour systématique sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 18.6%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carbu-rant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glypho-sate	Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.092	-2.88	-2.17	-0.24	-0.66	-5.29	-5.95	-0.34	-0.04
Interventions mécaniques sur couvert	0.076		0.77	0.26	0.40	1.03	1.43	0.37	0.03
Interventions de travail du sol très superficiel	-0.022		1.68	0.39	0.72	2.07	2.79	0.56	0.04
Interventions de travail du sol superficiel	-0.268		-2.13	-0.99	-0.95	-3.12	-4.07	-1.42	-0.07
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.237		-5.31	-1.90	-2.05	-7.22	-9.26	-2.72	-0.12
Labour	0.731		23.15	10.92	10.70	34.07	44.77	15.60	0.61
Toutes interventions de travail du sol	0.215		17.39	8.41	8.43	25.80	34.23	12.02	0.47
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-2.88	16.05	8.44	8.19	21.72	29.91	12.05	0.46

	Labour fréquent avec ou sans glyphosate → Labour systématique sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 33.7%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carbu-rant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glypho-sate	Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.043	-1.49	-1.11	-0.12	-0.31	-2.72	-3.03	-0.17	-0.02
Interventions mécaniques sur couvert	0.030		0.48	0.23	0.35	0.70	1.06	0.32	0.02
Interventions de travail du sol très superficiel	0.002		1.03	0.21	0.42	1.24	1.66	0.30	0.03
Interventions de travail du sol superficiel	-0.205		-1.74	-0.85	-0.88	-2.59	-3.47	-1.21	-0.06
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.107		-2.62	-0.99	-1.10	-3.60	-4.70	-1.41	-0.06
Labour	0.421		13.27	6.21	6.09	19.48	25.57	8.86	0.35
Toutes interventions de travail du sol	0.113		9.94	4.58	4.53	14.53	19.06	6.55	0.26
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.49	9.37	4.70	4.59	12.67	17.26	6.71	0.26

Tableau 21 Surcoûts moyens estimés dans le scénario général référence « extrême » pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol (suite)

	Labour systématique avec ou sans glyphosate → Labour systématique sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 27.9%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)					Total sans MO	Total	Carbu-rant (l/ha)
Glyphosate		Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total				
Traitements au glyphosate	-0.027	-1.08	-0.67	-0.07	-0.21	-1.83	-2.03	-0.10	-0.01
Interventions mécaniques sur couvert	-0.071		0.72	0.24	0.29	0.97	1.25	0.34	0.02
Interventions de travail du sol très superficiel	0.184		-0.41	0.05	0.07	-0.35	-0.28	0.07	0.01
Interventions de travail du sol superficiel	0.216		1.38	0.66	0.89	2.04	2.93	0.94	0.04
Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.008		0.30	-0.09	-0.15	0.20	0.06	-0.14	-0.01
Labour	0.012		1.05	0.50	0.91	1.55	2.47	0.72	0.05
Toutes interventions de travail du sol	0.348		2.32	1.12	1.73	3.44	5.17	1.60	0.09
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.08	2.37	1.29	1.81	2.58	4.38	1.84	0.10

Les estimations des surcoûts moyens supportés par les agriculteurs dans le cadre de notre scénario extrême sont reportées dans le Tableau 21.

Sans surprise, les surcoûts moyens sont significativement supérieurs dans le cadre du scénario général « extrême, à labour systématique » à ceux obtenus dans le cadre de scénario général de référence « à labour fréquent ». Le surcoût annuel moyen augmente d'environ 15 €/ha pour les surfaces en semis direct, de 21 €/ha pour celles en techniques culturales simplifiées, de 20 €/ha pour les surfaces en labour occasionnel et de 11 €/ha pour les surfaces en labour fréquent (les deux scénarios considérés ayant les mêmes implications pour les surfaces déjà en labour systématique).

Il est intéressant de noter que, même dans le cadre d'un scénario « extrême » d'adoption généralisée d'une stratégie de travail du sol avec labour systématique, nos estimations des surcoûts annuels moyens qui seraient dus au retrait du glyphosate n'entrent dans une fourchette comprise entre 50 et 100 €/ha que pour les 19.8% des surfaces de grandes cultures sans labour.

Dans le cadre de notre scénario général « extrême », nous estimons le surcoût annuel moyen des 1.7% de surfaces en semis direct à 94.21 €/ha, celui des 18.1% de surfaces en techniques culturales simplifiées à 46.7 » €/ha et celui des 18.8% de surfaces en labour occasionnel à 29.91%.

Ces surcoûts annuels moyens « extrêmes » n'excèdent pas 20 €/ha pour les 61.6% de surfaces labourées fréquemment ou systématiquement, avec 17.26 €/ha pour les 33.7% de surfaces en labour fréquent et 4.38 €/ha pour les 27.9% de surfaces en labour systématique.

iv. Scénarios alternatifs : scénario spécifique pour les surfaces sans labour

Il est peu probable qu'un retrait du glyphosate inciterait les agriculteurs utilisant des stratégies de travail du sol sans labour ou sans travail du sol tout court à adopter une stratégie de travail du sol avec labour fréquent. Il n'est pas ici question de discuter les arguments qui sous-tendent cette hypothèse mais d'examiner l'impact sur nos estimations de surcoûts d'un scénario moins extrême, pour les surfaces actuellement sans labour, que notre scénario général de référence « à labour fréquent ».

Le Tableau 22 reporte les estimations des surcoûts annuels moyens dans le cadre d'un scénario « intermédiaire » selon lequel le retrait du glyphosate contraindrait les agriculteurs actuellement en semis direct ou en techniques culturales simplifiées à labourer occasionnellement leurs parcelles.

Deux éléments majeurs ressortent de l'analyse des résultats présentés dans le Tableau 22. Tout d'abord, si le scénario « intermédiaire » induit des surcoûts moyens inférieurs à ceux induits par le scénario de référence, les différences de surcoûts entre les deux scénarios sont relativement limitées (et ce, même si la différence relative est importante dans le cas des surfaces en techniques culturales simplifiées). Ces différences de surcoûts annuels moyens sont de 6.06 €/ha pour les surfaces actuellement en semis direct et de 10.09 €/ha pour celles en techniques culturales simplifiées. Ces résultats s'expliquent par le fait que le scénario « intermédiaire », bien qu'il s'appuie sur des stratégies de travail du sol avec labour occasionnel, inciterait, selon nos calculs, les agriculteurs à labourer une part significative de leurs surfaces : 44.9% pour ceux actuellement en semis direct et 33.2% pour ceux en techniques culturales simplifiées.

Ensuite, ces résultats tendent à prouver que notre scénario général de référence est plutôt crédible dans le sens où une part de 44.9% de surfaces labourées correspond en fait à une stratégie de travail du sol avec labour fréquent. De même, une part de 33.2% de surfaces labourées se situe sur la borne supérieure des parts de surfaces labourées dans le cadre d'une stratégie de travail du sol avec labour fréquent. Nos estimations suggèrent donc que la plupart des agriculteurs actuellement en systèmes sans labour pourraient labourer leurs sols. En effet, nos calculs montrent qu'un nombre suffisant de parcelles sont actuellement labourées fréquemment dans des conditions « statistiquement équivalentes ».

Tableau 22 Surcoûts moyens estimés dans le scénario « spécifique pour les parcelles sans labour » pour les traitements au glyphosate et interventions mécaniques de travail du sol et sur les couverts végétaux. Toutes parcelles, par type de stratégie de travail du sol

	Semis direct avec ou sans glyphosate → Labour occasionnel sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 1.7%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carbu-rant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glypho-sate	Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.365	-12.31	-9.11	-0.94	-2.51	-22.37	-24.88	-1.35	-0.15
Interventions mécaniques sur couvert	0.062		-0.62	-0.36	-0.41	-0.98	-1.39	-0.51	-0.03
Interventions de travail du sol très superficiel	1.963		17.40	6.38	7.11	23.78	30.89	9.11	0.42
Interventions de travail du sol superficiel	0.683		9.25	3.88	4.98	13.13	18.11	5.54	0.31
Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.272		5.96	2.00	2.08	7.95	10.03	2.85	0.12
Labour	0.449		19.81	8.44	12.77	28.25	41.01	12.06	0.75
Toutes interventions de travail du sol	3.368		52.41	20.69	26.94	73.11	100.05	29.56	1.60
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-12.31	42.68	19.39	24.02	49.76	73.77	27.70	1.43

	Techniques culturales simplifiées avec ou sans glyphosate → Labour occasionnel sans glyphosate								
	Part de surface dans les surfaces de grandes cultures: 18.1%								
	Effet du scénario	Coûts financiers (€/ha)						Carbu-rant (l/ha)	Main d'œuvre (h/ha)
	Glypho-sate	Equipe-ment	Carbu-rant	Main d'œuvre	Total sans MO	Total			
Traitements au glyphosate	-0.133	-5.26	-3.57	-0.37	-1.00	-9.21	-10.21	-0.54	-0.06
Interventions mécaniques sur couvert	0.020		-0.69	-0.26	-0.28	-0.95	-1.23	-0.37	-0.01
Interventions de travail du sol très superficiel	-0.012		0.42	0.10	0.26	0.52	0.77	0.14	0.02
Interventions de travail du sol superficiel	-0.013		0.78	0.26	0.27	1.04	1.31	0.37	0.03
Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.079		-2.18	-0.79	-0.86	-2.97	-3.83	-1.13	-0.05
Labour	0.320		13.90	5.98	8.93	19.87	28.80	8.54	0.52
Toutes interventions de travail du sol	0.181		12.92	5.54	8.59	18.46	27.05	7.91	0.51
Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-5.26	8.64	4.91	7.30	8.24	15.54	7.01	0.44

Un bémol doit cependant être apporté à cette dernière conclusion. En effet, une part significative (35.1 %) des surfaces actuellement en semis direct représentées notre échantillon n'ont pas de

« jumelles statistiques » dans le sous-échantillon représentant les surfaces qui sont labourées fréquemment actuellement. Il s'agit essentiellement parcelles à sols superficiels et caillouteux appartenant à de grandes, et souvent, très grandes exploitations.

Conclusion

Conformément au cahier des charges de l'étude, l'approche que nous avons retenue s'appuie sur les données de l'enquête Pratiques culturales sur les grandes cultures et prairies de la campagne 2017 (PK-GCP_2017), complétées par diverses bases de données publiques. Ces données nous permettent de caractériser les usages de glyphosate par les agriculteurs pour les 17 grandes cultures majeures en France métropolitaine.

Notre analyse des utilisations de glyphosate montre que 18,9% des surfaces de grandes cultures sont traitées avec une quantité moyenne de substance active de 832 g/ha. Pour l'ensemble des grandes cultures et des prairies, la part de surface traitée est de 11,5% avec une quantité de substance active de 824,5 g/ha, ce qui correspondrait à un total de 1990 tonnes de glyphosate épandu sur les surfaces couvertes par le champ de l'enquête PK-GCP_2017. La somme de notre estimation des utilisations de glyphosate sur grandes cultures, et des estimations que nous avons faites sur les autres productions (arboriculture, viticulture) est nettement inférieure à la somme des ventes globales de glyphosate recensées sur la base nationale des données de vente (BNV-D). Même en tenant compte des autres usages connus ou estimés, il reste un écart important (voir nos calculs dans l'annexe H).

On peut s'interroger sur une éventuelle sous-estimation de l'utilisation de glyphosate en grandes cultures dans l'enquête PK-GCP_2017. Cette enquête n'est pas spécifiquement dédiée à couvrir les pratiques de agriculteurs durant les inter-cultures, période durant laquelle la quasi-totalité du glyphosate est épandu en grandes cultures, et les agriculteurs peuvent omettre de déclarer certains traitements. Néanmoins, il faudrait que les producteurs de grandes cultures n'aient déclaré que la moitié des utilisations de glyphosate pour « retrouver » les écarts constatés entre les estimations des utilisations et des ventes, ce qui est très peu vraisemblable. Des investigations complémentaires sont donc nécessaires sur cette question.

Notre travail concerne les utilisations du glyphosate en inter-culture, ces dernières représentant 98% des utilisations de glyphosate selon les données de l'enquête PK-GCP_2017. Il ne nous a pas été possible d'étudier avec cette base de données certaines productions particulières, notamment les cultures destinées à la production de semences. Le retrait du glyphosate pourrait être problématique pour ces productions, car les exigences de pureté des récoltes de grain supposent de contrôler rigoureusement les adventices comme c'est également le cas pour certaines adventices toxiques en cultures légumières.

Les surcoûts que nous avons mesurés sont ceux qui seraient supportés par les agriculteurs après avoir changé de pratiques suite au retrait du glyphosate. Ils incluent les coûts liés à des augmentations de besoins d'équipement et de main d'œuvre (sous forme annualisée et rapportée à l'hectare), ils n'incluent pas les coûts liés à l'apprentissage de la nouvelle pratique ou à la phase de réorganisation de certaines activités ou de certains chantiers sur l'exploitation.

Notre analyse des alternatives au glyphosate dans le secteur des grandes cultures montre que la question est intimement liée à celle de l'évolution des stratégies de travail du sol. Le travail du sol est le levier principal pour se passer de glyphosate et les conséquences seraient donc très différentes pour les exploitations qui labourent déjà leur sol et les autres.

Ainsi, nos estimations de surcoûts reposent principalement sur deux hypothèses. (a) Selon notre première hypothèse, intensifier suffisamment la stratégie de travail du sol permet de contrôler efficacement les adventices sans glyphosate. Cette hypothèse est cohérente avec les faits observés.

Par exemple, les agriculteurs qui labourent fréquemment leurs sols emploient très peu de glyphosate et nos calculs montrent que nombre d'entre eux n'en utilisent pas. (b) Notre seconde hypothèse est que les agriculteurs maîtrisent les pratiques qu'ils ont adoptées après le retrait du glyphosate. Nos scénarios supposent que les agriculteurs utilisateurs de glyphosate adoptent des pratiques déjà utilisées par des agriculteurs qui utilisent peu ou pas de glyphosate.

Notre approche d'estimation des surcoûts est basée sur la comparaison statistique des choix de désherbage et de travail du sol des agriculteurs utilisateurs de glyphosate d'une part, et des agriculteurs non utilisateurs de glyphosate d'autre part. Elle combine (i) la définition de scénarios décrivant des réactions possibles des choix des agriculteurs en matière de stratégie de travail du sol et (ii) des calculs statistiques permettant l'évaluation économique des effets de ces scénarios sur les choix de désherbage et de travail du sol des agriculteurs. Schématiquement, l'approche consiste à estimer ce que les agriculteurs utilisateurs de glyphosate feraient, en moyenne, en cas de retrait du glyphosate à partir de l'observation de ce que font déjà des agriculteurs non utilisateurs de glyphosate dans des conditions équivalentes. Nos estimations reposent sur une méthode couramment employée en statistique médicale et en économétrie, la méthode dite de pondération par les scores de propension.

Cette approche a également l'avantage de permettre d'identifier, selon des critères statistiques, les agriculteurs potentiellement en « situation délicate » en cas de retrait du glyphosate. Il s'agit des agriculteurs utilisateurs de glyphosate dont les conditions d'exploitation sont telles qu'il n'existe pas, ou très peu, d'agriculteurs qui n'utilisent pas de glyphosate dans des conditions équivalentes.

Le scénario général de référence suppose que les parcelles en semis direct, techniques culturales simplifiées ou labour occasionnel passent en labour fréquent en cas de retrait du glyphosate. Dans ce scénario, les parcelles en labour fréquent restent en labour fréquent et celles en labour systématique restent en labour systématique. Ce scénario a été choisi en tant que scénario de référence parce que les exploitations pratiquant des systèmes à labour fréquent sont nombreuses, utilisent très peu de glyphosate et ont des caractéristiques très variées, ce qui implique que les stratégies de travail de sol avec labour fréquent sont des stratégies qui peuvent être mises en place sur la plupart des exploitations et permettre de contrôler les adventices de manière satisfaisante sans glyphosate. Cependant, il est probable que les agriculteurs actuellement en travail du sol réduit adopteraient des stratégies de travail du sol moins coûteuses que celles à labour fréquent en cas de retrait du glyphosate.

Les surcoûts moyens totaux estimés dans ce scénario général de référence varient significativement en fonction du type de stratégie de travail du sol actuelle des agriculteurs considérés. Les surcoûts moyens annuels vont de près de 80 €/ha, pour les surfaces en semis direct, à moins de 10 €/ha pour les surfaces actuellement en labour occasionnel ou avec des fréquences de labour supérieures.

Pour les 1.7% de surfaces en semis direct, la mise en œuvre d'une stratégie de travail du sol à labour fréquent sans glyphosate engendre un surcoût moyen annuel estimé à 79,83 €/ha. Ce surcoût se répartit pour environ la moitié en coût de mécanisation, un quart pour le carburant et un quart pour la main d'œuvre. Le surcoût lié au travail du sol de 102,86 €/ha, qui correspond plus ou moins aux coûts de travail du sol en labour fréquent, n'est compensé que par une économie de 23,57 €/ha sur les traitements herbicides au glyphosate (coûts de pulvérisation compris). Le surcoût annuel en charges de mécanisation inclut, sous forme annualisée, des investissements nécessaires pour l'acquisition et le renouvellement des équipements nécessaires au travail du sol et au désherbage mécanique. Ce

scénario suppose l'acquisition d'un parc d'équipement de taille substantielle et de puissance de traction adaptée pour les exploitations dont la surface est principalement en semis direct.

Nos calculs révèlent que certaines exploitations pratiquant le semis direct pourraient être en situation « délicate » en cas de retrait du glyphosate. Il s'agit principalement d'exploitations de grande et de très grande taille pratiquant le semis direct sur des sols superficiels et caillouteux. Ces exploitations sont considérées en situation « délicate » parce qu'il n'y a actuellement pas, ou très peu, d'exploitations ayant des caractéristiques équivalentes labourant fréquemment leurs sols.

Pour les 18,1% de surfaces en techniques culturales simplifiées, le surcoût total moyen estimé dans le cadre du scénario de référence est de 25,63 €/ha par an. Là encore, la répartition de ce surcoût est de l'ordre de la moitié pour les charges de mécanisation, l'autre moitié étant partagée entre les charges de main d'œuvre et de carburant. On constate ainsi un accroissement des besoins de main d'œuvre importants, quoique de l'ordre du tiers de celui imposé aux surfaces en semis direct, sur les surfaces actuellement en techniques culturales simplifiées. Cet accroissement des besoins en main d'œuvre peut significativement impacter l'organisation de la préparation des semis et la gestion des adventices des très grandes exploitations en techniques culturales simplifiées, notamment celles avec des sols « difficiles » (superficiels et caillouteux, ou argileux, présentant une faible réserve utile en eau).

Pour les 80,2% de surface actuellement labourées au moins occasionnellement, l'impact de notre scénario de référence sur le coût total du travail du sol et de désherbage est de moins 10 €/ha par an. Cette estimation est en phase avec celle obtenue par Böcker *et al* (2018a, 2018b) pour le cas du maïs en Allemagne, à partir d'une approche très différente de la nôtre. De nombreux agriculteurs suivent actuellement une stratégie de travail du sol à labour fréquent sans glyphosate dans des conditions équivalentes, ce qui suggère que cette stratégie permet de contrôler les adventices sans glyphosate et d'obtenir des résultats technico-économiques satisfaisants dans la plupart des configurations de pédo-climat et de structure des exploitations.

Deux autres scénarios et des tests de sensibilité sur les charges de main d'œuvre et de mécanisation ont été réalisés. Ils confirment nos résultats.

Finalement, les surcoûts annuels estimés ont été mis en perspective au regard de l'EBE par hectare des exploitations spécialisées dans la production de céréales et d'oléo-protéagineux de la période 2009-2018 (données du RICA pour l'OTEX 15). Les surcoûts moyens estimés sont relativement faibles en comparaison du revenu pour les agriculteurs qui labourent leurs parcelles. En effet, la part de ces surcoûts dans les EBE par hectare ne dépasse pas 3 %. Cette part est de l'ordre de 1 % pour les surfaces actuellement en labour systématique, de 1,5 % pour celles en labour fréquent et de 2 % pour celles en labour occasionnel. En revanche, les surcoûts estimés des effets du retrait du glyphosate dans le cadre du scénario de référence) représentent une part significative du revenu des agriculteurs qui ne labourent pas leurs parcelles. La part des surcoûts moyens estimés dans les EBE par hectare varie, selon les régions, entre 13,7 et 23,4 % pour les surfaces actuellement en semis direct, et entre 4,4 et 7,5 % pour celles en techniques culturales simplifiées.

Au terme de ce travail, deux recommandations peuvent être émises. La première concerne les bases de données. Il faut d'une part s'assurer de la capacité des enquêtes culturales à bien capturer les pratiques mises en œuvre au long de l'interculture. Il faut d'autre part s'assurer de la cohérence globale des différentes bases de données et en particulier, pour les utilisations de produits phytosanitaires, entre les estimations que l'on peut faire à partir des pratiques documentées via les enquêtes PK et les données remontées par les ventes via la BNVD (Base Nationale des Ventes des

Distributeurs). La seconde recommandation concerne le besoin de poursuivre les études en ce qui concerne l'agriculture de conservation, en l'absence à ce jour de définition unique. A partir de l'analyse des données 'Pratiques culturales' sur des parcelles en Semis Direct et en Techniques Culturales Simplifiées, et en croisant celles-ci avec des analyses à l'échelle des systèmes de culture et des exploitations, il faudrait s'attacher à identifier tous les leviers permettant d'atteindre les services écosystémiques permis par la diversité de cultures, la couverture permanente, la perturbation minimale du sol, sans recours à l'usage d'un pesticide systémique.

Bibliographie

- Angrist, J.D., J.-S. Pischke. 2009. Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion. Princeton University Press.
- APCA, 2018. Coûts des opérations culturales 2018 des matériels agricoles. Un référentiel pour le calcul des coûts de production et le barème d'entraide. https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/002_inst-site-chambres/actu/2018/COC_agroequipement_2018_VF.pdf
- Arvalis, 2017. Lien du référentiel sol Arvalis 2017 - Correspondance nom officiel-nom Arvalis. <https://data.opendatasoft.com/explore/embed/dataset/referentiel-sol-arvalis-2017@api-agro/table/?flg=fr>
- Arvalis, 2019. « Effets de la densité des adventices sur le rendement des céréales ». Consulté le 13 février 2020. <https://www.arvalis-infos.fr/quelle-est-la-nuisibilite-des-mauvaises-herbes-en-cereales-a-paille--@/view-17542-arvarticle.html>.
- Benbrook, C. M., 2016. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. Environmental Sciences Europe, 28(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>.
- Böcker, T., W. Britz and R. Finger, 2018a. Modelling the Effects of a Glyphosate Ban on Weed Management in Silage Maize Production. Ecological Economics 145, 182–193.
- Böcker, T., W. Britz and R. Finger, 2018b. An economic and environmental assessment of a glyphosate ban for the example of maize production. Working paper, ETH Zürich.
- Böcker, T. and R. Finger, 2018a. Implications de la culture du blé Extensio sans herbicide en Suisse. Recherche Agronomique Suisse 9 (9): 296–305.
- Böcker, T. and R. Finger, 2018b. Bio-economic model on weed control in cultivation of wheat. Herbicide free wheat production in Switzerland (HerbiFree). Research Collection ETH Zürich.
- Bonny, S., 2011. Herbicide-tolerant transgenic soybean over 15 years of cultivation: pesticide use, weed resistance, and some economic issues. The case of the USA. Sustainability, 3(9), 1302-1322.
- CAN DEPHY, 2018. Le glyphosate dans le réseau DEPHY FERME : état des lieux des usages, des freins et des alternatives. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 62p.
- Claassen, R., M. Bowman, J. McFadden, D. Smith and S. Wallander, 2018. Tillage Intensity and Conservation Cropping in the United States, EIB-197, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, September 2018.
- Cordeau, S. et D. Moreau, 2017. Gestion des adventices au moyen des cultures intermédiaires multi-services: potentiels et limites. Innovations Agronomiques, INRA, 2017, 62, pp.1-14. hal- 01770356
- Crump, R., V.J. Hotz, G.W. Imbens and O. Mitnik, 2009. Dealing with Limited Overlap in Estimation of Average Treatment Effects. Biometrika 96(1), 187–99.
- Danne, M., O. Mußhoff and M. Schulte, 2019. Analysing the importance of glyphosate as part of agricultural strategies: A discrete choice experiment. Land Use Policy 86, 189-207.
- DuGoff, E.H., M. Schuler and E.A. Stuart, 2014. Generalizing Observational Study Results: Applying Propensity Score Methods to Complex Surveys. Health Services Research 49, 284-303.

Duke, S. O. and S. B. Powles, 2008. « Glyphosate: A Once-in-a-Century Herbicide ». *Pest Management Science* 64, no 4 (2008): 319-25. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>.

FAO. « Qu'est-ce que l'agriculture de conservation? | Agriculture de conservation | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ». Consulté le 22 janvier 2020. <http://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/what-is-conservation-agriculture/fr/>.

France Agricole, 2008. « Travail du sol et protection des cultures : Effets contradictoires ». Consulté le 29 décembre 2019. <http://www.lafranceagricole.fr/article/travail-du-sol-et-protection-des-cultures-effets-contradictaires-1,0,16076737.html>.

FR CUMA AuRA, 2018. Barème d'entraide 2018/2019. <http://www.aura.cuma.fr/sites/default/files/baremeqdest2018-2019-56pages-br.pdf>

Fugit, J.-L. et J.-B. Moreau, 2019. Rapport par la mission d'information commune sur le suivi de la stratégie de sortie du glyphosate. Assemblée Nationale, Rapport d'information n°2406, Nov. 2019. <http://www.assemblee-nationale.fr/15/pdf/rap-info/i2406.pdf>

Gaubrie S., S. Clavé et T. Ratier, 2020. « Le glyphosate dans les terres très argileuses du Marais Poitevin ». CDPM- CRA Pays de la Loire/GEDA Sud Vendée-CAVAC.

Gautellier Vizios, L., C. Dessienne, B. Pierrot et L. Jouy, 2010. Gestion de l'interculture dans des rotations de grandes cultures : évaluation multicritère de solutions alternatives à l'utilisation du glyphosate. Phloème, biennales de l'innovation céréalière. Paris, 29-30 Janvier 2019.

Guérin, C., 2019. « Quels usages, quelles alternatives en production de semences ? », Bulletin de semences n°269 FNAMS.

Hirschy M., S. Blocaille, L. Leveau, J. Halska, 2018. « Répartir les labours dans la rotation - GECO ». ACTA-IRSTEA-Chambre d'Agriculture Saône et Loire. Consulté le 7 février 2020. <https://geco.ecophytopic.fr/concept/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252Fconcept%252FLabourer%2528et%2528Repartir%2528Les%2528Labours%2528Dans%2528La%2528Rotation%2529>

Hurley, T.M., 2016. Shock and Awe Pest Management: Time for Change. *Choices* 31(4), 1-8.

Imbens, G.W., 2015. Matching Methods in Practice: Three Examples. *Journal Human Resources* 50(2), 373-419.

Imbens, G.W. and D.B. Rubin, 2015. *Causal Inference in Statistics, Social, and Biomedical Sciences*. New York: Cambridge University Press.

Imbens G.W. and J.M. Wooldridge, 2010. Recent Developments in the Econometrics of Program Evaluation. *Journal of Economic Literature* 47(1), 5-86.

Labreuche, J., L. Bonin, L. Gautellier Vizios, F. Vuillemin, 2019. « Alternatives au glyphosate pour la destruction des couverts d'interculture | Ecophytopic ». Source Arvalis-Terres Inovia-APCA et Chambres d'Agriculture IdF & Bretagne. Article du Centre de ressources Glyphosate - Janvier 2019. Consulté le 20 janvier 2020. <https://ecophytopic.fr/proteger/alternatives-au-glyphosate-pour-la-destruction-des-couverts-dinterculture>.

- Labreuche, J., B. Perriot, L. Gautellier Vizioz, D. Brun, A. Uijttewaal, L. Bonin, F. Vuillemin, F. Deroueix, R. Duval, C. Royer, C. Buridant et A. Rodriguez, 2019. Glyphosate : peut-on s'en passer et avec quelles conséquences ? Perspectives Agricoles 468, Juillet-Août 2018.
- Labreuche, J. et A. Collet, 2010. « AFPP – vingtième et unième conférence du coloma journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes dijon-8 et 9 décembre 2010 ».
- Lamine, C. 2011. Anticiper ou temporiser : injonctions environnementales et recompositions des identités professionnelles en céréaliculture. *Sociologie du travail* 53,75–92
- Laurent, F., 2015. L'Agriculture de Conservation et sa diffusion en France et dans le monde. *Cybergeogeo* <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.27284>.
- Li, F., K.L. Morgan and A.M. Zaslavsky, 2018. Balancing Covariates via Propensity Score Weighting. *Journal of the American Statistical Association* 113(521), 390–400.
- Li, L. and T. Greene, 2013. A Weighting Analogue to Pair Matching in Propensity Score Analysis. *International Journal of Biostatistics* 9, 1–20.
- Lunceford, J.K. and M. Davidian, 2004. Stratification and Weighting via the Propensity Score in Estimation of Causal Treatment Effects: a Comparative Study. *Statistics in Medicine* 23, 2937-2960.
- Miranowski, J.A., 1980. Estimating the Relationship between Pest Management and Energy Prices, and the Implications for Environmental Damage. *American Journal of Agricultural Economics* 63(5), 995-1000.
- Ministère des Solidarités et de la Santé, 2018. « Ambroisie.info : Les risques pour la santé ». <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/especes-nuisibles-et-parasites/ambroisie-info/article/les-risques-pour-la-sante>.
- Moss, S., 2017 « Herbicide Resistance in Weeds ». In *Weed Research*, 181-214. John Wiley & Sons, Ltd, 2017. <https://doi.org/10.1002/9781119380702.ch7>.
- Osteen, Craig D., et Fernandez-Cornejo J., 2013. « Economic and Policy Issues of U.S. Agricultural Pesticide Use Trends ». *Pest Management Science* 69(9): 1001-25. <https://doi.org/10.1002/ps.3529>.
- Reboud, X., 2020. « Pourquoi et comment le datura contamine-t-il les denrées alimentaires ? » *The Conversation*. Consulté le 6 février 2020. <http://theconversation.com/pourquoi-et-comment-le-datura-contamine-t-il-les-denrees-alimentaires-113772>.
- Ridgeway, G., S.A. Kovalchik, B.A. Griffin and M.U. Kabeto, 2015. Propensity Score Analysis with Survey Data. *Journal of Causal Inference* 3(2), 237-249.
- Rougier, M., I. Félix et E. Emonet, 2019. Le réseau DEPHY EXPE 2 : vers une utilisation des produits phytosanitaires en ultime recours. Présentation des 13 projets de la filière grandes cultures. Phloème, biennales de l'innovation céréalière. Paris, 29-30 Janvier 2019.
- Rubin, D.B., 1974. Estimating Causal Effects of Treatments in Randomized and Non-Randomized Studies. *Journal of Educational Psychology* 66, 688–701.
- Schaller, N. (2013) L'agriculture de conservation, *Analyse-Centre d'études et de prospective* 61.
- Serpantié, G., 2009. L'agriculture de conservation à la croisée des chemins. *Vertigo* 9(3). <https://doi.org/10.4000/vertigo.9290>

Smith, R., N. Warren et S. Cordeau, 2020. Are Cover Crop Mixtures Better at Suppressing Weeds than Cover Crop Monocultures? *Weed Science*, 1-33. 2020 doi:10.1017/wsc.2020.12

Wiese, A., M. Schulte, L. Theuvsen and HH. Steinmann, 2018. « Interactions of Glyphosate Use with Farm Characteristics and Cropping Patterns in Central Europe ». *Pest Management Science* 74, no 5 (2018): 1155-65. <https://doi.org/10.1002/ps.4542>.

Wooldridge, J.M., 2010. *Econometric Analysis of Cross-section and Panel Data*, 2nd Edition. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Wooldridge, J.M., 2001. Asymptotic Properties of Weighted M-estimators for Standard Stratified Samples. *Econometric Theory* 17(2):451–70.

Wooldridge, J.M., 1999. Asymptotic Properties of Weighted M-estimators for Variable Probability Samples. *Econometrica* 67(6):1385–406.

Zanutto, E.L., 2006. A Comparison of Propensity Score and Linear Regression Analysis of Complex Survey Data. *Journal of Data Science* 4, 67-91.

Ressources électroniques consultées

Site Arvalis
Centre ressource glyphosate
Ephy - Agritox
Data.gouv
SSP/Agreste

Annexes

Annexe A Démarche d'utilisation des données

A-1 Les données PK-GCP 2017.

Les enquêtes des pratiques culturales sur les grandes cultures et prairies portant sur la campagne 2016-2017 conduites par le service de la statistique et de la prospective (SSP) / Agreste. Elles détaillent l'ensemble des pratiques sur une parcelle culturale pour la campagne 2016-2017.

L'échantillon est constitué de 27958 parcelles culturales et est représentatif de l'assolement par cultures et par régions. 22708 parcelles culturales en grandes cultures annuelles pour une superficie extrapolée de 12,8 millions d'hectares sont présentes. Les cultures pluriannuelles retirées sont les prairies temporaires, les prairies permanentes et les mélanges fourragers. Les 17 grandes cultures annuelles retenues sont blé tendre, blé dur, orge, triticale, colza, tournesol, pois protéagineux, maïs fourrage, maïs grain, betterave sucrière, pomme de terre, féverole, soja, lin fibre, lin oléagineux, mélange de céréales et mélange avec protéagineux. Parmi cet échantillon, 20986 parcelles sont conduites en mode conventionnel. Nous analysons pour l'évaluation des coûts, les parcelles pour lesquelles toutes les variables d'intérêt de l'échantillon des parcelles en grandes cultures annuelles conduites en mode conventionnel sont bien renseignées, soit 17342 parcelles pour une superficie extrapolée de 11,3 millions d'hectares. Cet échantillon représente 90.4 % de la superficie extrapolée totale des 20986 parcelles conduites en mode conventionnel.

Le choix de cet échantillon résulte de la sélection des enquêtes dont les informations étaient complètes pour tous les facteurs explicatifs ci-dessous. La représentativité par culture et par région de cet échantillon par rapport à l'échantillon contenant toutes les parcelles conduites en mode conventionnel. La réduction du nombre de parcelles est en premier lieu due au retrait des parcelles dont le type de sols n'était pas identifiable ou non renseigné. La seconde raison de la réduction du nombre de parcelles analysées est due à la sélection des enquêtes où le nombre de labour sur les 5 ans précédents l'enquête (de 2012 à 2016) était renseigné pour au moins 3 années sur 5. Cet échantillon est celui que nous avons utilisé dans le calcul des coûts de l'arrêt du glyphosate.

Source : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturales/>

A-2 Les coûts

Les données relatives aux coûts des traitements chimiques et aux opérations de travail mécanique ne sont pas observées dans les enquêtes PK. Plusieurs sources de données sont mobilisées pour les reconstruire.

- Dephy-Agrosyst

Le coût des herbicides chimiques est reconstruit à partir du prix des spécialités commerciales pour une unité de produit. Les prix de 782 herbicides sont utilisés, dont 146 spécialités commerciales à base de glyphosate. Pour les spécialités commerciales où les prix ne sont pas observés, des prix moyens sont ajustés par mode d'action des produits.

La dépense en herbicides chimiques de la parcelle est donc égale au prix de vente de la spécialité commerciale (par unité) à la dose d'application multiplié par le pourcentage de surface traitée. La somme de la dépense herbicide chimique est ensuite agrégée pour chaque parcelle culturale.

Le coût d'application des herbicides chimiques est augmenté des passages de pulvérisateur sur la base de la surface de travail totale de la parcelle en hectares à partir de coûts de passage du barème d'entraide.

- Coût des interventions mécaniques

Les coûts d'interventions liés aux interventions mécaniques sont élaborés à partir du barème d'entraide EST 2018/2019 (APCA, CUMA EST, 2018).

Les indicateurs économiques pris en compte sont les suivants (définitions issues de la France agricole et du barème d'entraide) :

-La surface annuelle de travail (Surface ha/an) : croissante par type d'intervention pour l'analyse des coûts (tableau) est la performance techniquement réalisable par l'outil et cohérente par rapport aux jours disponibles. Pour les passages de pulvérisateurs, les surfaces annuelles de travail sont les superficies déployées. Source définition : barème d'entraide

-Les temps de travaux (Performance) indiqués dans les tableaux, correspondent à une estimation du nombre d'heures par an jugées nécessaires pour réaliser le chantier dans de bonnes conditions, avec les outils choisis. Ce temps « optimal » varie selon les réglages des outils, les « plages météo », le type de sol, le niveau d'exigence de chacun en termes de qualité de travail et de prise de risque.

-Le coût de chantier, hors carburant et hors main-d'œuvre (Coût chantier sans MO €/ha) intègre les charges fixes du tracteur et du matériel (amortissements, intérêts de 2 % du capital engagé, remisage et assurance) et les charges variables du tracteur (pneumatiques, entretien-réparation et lubrifiants à 3,5 €/l). Les amortissements sont calculés à partir d'une valeur d'achat moyenne en neuf (tous constructeurs confondus) et tiennent compte de la valeur de revente du bien. Ce ne sont pas des amortissements comptables.

-La quantité de carburant nécessaire (Carburant en l/ha) pour chaque opération culturale tient compte du taux de charge du moteur du tracteur ou de l'automoteur. On retient 40 % pour les travaux légers et 80 % pour les travaux lourds. Le **coût du carburant** est fixé à 0,70 €/l pour l'étude.

-Le coût de la main-d'œuvre (coût chantier avec MO €/ha moins coût chantier sans MO €/ha) est calculé à partir d'un tarif de 17 €/h TTC. Il est susceptible de varier selon le type de matériel utilisé et la qualification du chauffeur exigée.

Les types d'interventions mécaniques de l'enquête PK_GCP-2017 pris en compte sont appariés à un même type d'interventions mécaniques issu du barème d'entraide EST 2018-2019. Pour un type d'intervention mécanique, il existe plusieurs catégories de machines et pour une même catégorie, plusieurs machines existent. Elles se différencient par leurs dimensions/ paramètres. Une machine est notamment caractérisée par un intervalle de surface annuelle de travail réalisable.

Pour un même type d'intervention mécanique issu de l'enquête, plusieurs surfaces annuelles de travail sont détaillées. Lorsque plusieurs machines d'un même type d'interventions mécaniques peuvent réaliser une même surface annuelle de travail, la moyenne des indicateurs économiques est calculée.

Pour les types d'interventions autres, la moyenne par surface annuelle de travail est calculée à partir des types d'interventions de même profondeur de travail du sol.

La surface de travail annuelle et les coûts associés sont ensuite appariés à la SAU de l'exploitation multipliée par le nombre d'interventions de même type de l'exploitation pour chaque parcelle

enquêtée, et ce par type d'interventions mécaniques de travail du sol réalisés. L'appariement pour les pulvérisateurs se fait par type de pulvérisateur (porté ou autres) et sur la base de la SAU multipliée par le nombre de traitements phytosanitaires de la parcelle.

Les tableaux A-1 à A-3 suivants synthétisent les couts utilisés.

Tableau A-1 Barème d'entraide pour les interventions de travail des sols (1/6)

Nom du type d'intervention mécanique issu enquête PK_GCP- 2017		Nom simplifié issu barème d'entraide EST 2018-2019	Surface ha/an	cout €/ha outil	cout horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant en l/ha	cout chantier sans MO €/ha	cout chantier avec MO €/ha
Travail superficiel du sol < 8 cm	Déchaumeur Cultivateur à dents rigides	Déchaumeur 3m	150	9.3	27.4	0.6	11.2	24.5	33.9
		Déchaumeur 3m	175	8.6	27.4	0.6	11.2	23.8	33.3
		Moyenne déchaumeur 3m -4m	200	9.4	29.6	0.5	10.6	23.4	31.5
		Déchaumeur 4m	250	9.5	31.7	0.4	10.1	22.1	28.9
		Moyenne déchaumeur 4m -6m	300	10.1	36.2	0.3	9.6	22.2	28.0
		Déchaumeur 6m	400	9.7	40.7	0.3	9.1	21.4	26.2
		Déchaumeur 6m	500	8.7	40.7	0.3	9.1	20.3	25.2
	Vibroculteur	Vibroculteur 4m	80	5.4	27.4	0.4	8.4	13.6	18.1
		Vibroculteur 4m	100	4.6	27.4	0.4	8.4	12.8	17.3
		Moyenne vibro 4m-6m	120	4.7	29.6	0.3	7.5	13.0	17.5
		Vibroculteur 6m	150	4.5	31.7	0.3	6.6	12.8	17.3
		Vibroculteur 6m	180	4.0	31.7	0.3	6.6	12.3	16.8
	Sarclouse Déchaumeur à disques	DDI 3m porté	200	12.5	31.7	0.4	10.1	25.1	31.9
		Moyenne DDI 3mporté-4mporté-4mtrainé	250	15.5	34.7	0.3	8.1	25.8	30.9
		Moyenne DDI 3mporté-5mtrainé	300	12.5	38.0	0.3	9.0	23.7	29.0
		DDI 4m trainé	325	16.7	36.2	0.3	7.1	25.8	30.0
		Moyenne DDI 4mtrainé-4mporté-5mtrainé-6mporté	400	12.7	42.4	0.2	7.3	21.9	25.7
		Moyenne 5mtrainé-6mporté	500	11.1	48.5	0.2	7.4	20.4	23.7
		DDI 6m porté	600	10.1	52.8	0.2	7.0	18.9	21.8
	Herse classique	Herse en Z 6m	80	6.4	18.6	0.3	4.5	12.6	18.2
		Moyenne herse en Z 6m-lourde 8m	100	8.4	23.0	0.3	5.6	16.1	21.8
		Herse en Z 6m	120	4.5	18.6	0.3	4.5	10.7	16.3
		Herse lourde 8m	150	8.0	27.4	0.3	6.7	17.1	22.8
		Herse lourde 8m	200	6.2	27.4	0.3	6.7	15.3	21.0
	Herse animée Outil animé (dont herse rotative)	Herse rotative 3m	80	21.8	22.6	0.8	14.0	40.6	54.8
		Moyenne herse rotative 3m-3.5m	100	19.9	24.3	0.7	13.2	38.0	50.7
		Herse rotative 3m	120	15.9	22.6	0.8	14.0	34.7	48.8
		Herse rotative 3.50m	125	18.1	25.9	0.7	12.3	35.4	46.7
		Moyenne herse rotative 3.5-4.5m	150	19.9	27.9	0.6	11.6	36.0	45.9
		Herse rotative 4.5m	200	19.0	29.8	0.5	10.9	33.9	42.4
		Herse rotative 4.5m	250	16.0	29.8	0.5	10.9	30.9	39.4
		Herse rotative 6m	300	17.4	36.2	0.3	9.5	29.5	35.1
		Herse rotative 6m	400	14.1	36.2	0.3	9.5	26.1	31.8
Herse rotative 6m		500	12.0	36.2	0.3	9.5	24.1	29.8	

Tableau A-1 Barème d'entraide pour les interventions de travail des sols (2/6)

Nom du type d'intervention mécanique issu enquête PK_GCP- 2017	Nom simplifié issu barème d'entraide EST 2018-2019	Surface ha/an	cout €/ha outil	cout horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant en l/ha	cout chantier sans MO €/ha	cout chantier avec MO €/ha	
Travail superficiel du sol < 8 cm	Herse étrille	Herse étrille 6m	100	6.4	18.6	0.3	4.5	12.6	18.3
		Moyenne herse étrille 6m-9m	125	6.8	21.0	0.2	3.8	12.0	16.4
		Moyenne herse étrille 6m-9m-12m	150	6.8	23.1	0.2	3.4	11.4	15.0
		herse étrille 9m	175	6.2	23.3	0.2	3.1	10.4	13.5
		Moyenne herse étrille 12m-18m	200	9.4	29.6	0.1	2.5	12.6	14.5
		Moyenne herse étrille 12m-18m-24m	250	9.4	32.9	0.1	2.6	12.7	14.5
		Moyenne herse étrille 18m-24m	300	9.6	35.6	0.1	2.6	12.8	14.4
		Herse étrille 24m	350	9.5	39.5	0.1	2.7	12.8	14.3
	Bineuse (ou sarcleuse)	Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : 4 rangs/5 éléments à portée arrière	30	14.8	13.6	1.2	5.6	26.1	40.3
		Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : 4 rangs/5 éléments portée arrière	40	11.3	13.6	1.2	5.6	22.7	36.8
		Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : 4 rangs/5 éléments portée arrière	50	9.3	13.6	1.2	5.6	20.6	34.8
		Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : 6 rangs/7 éléments portée arrière	60	12.1	13.6	1.7	4.0	20.1	30.1
		Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : moyenne 6 rangs/7 éléments portée arrière-8 rangs/9 éléments	80	200.0	7.0	12.6	1.5	5.0	15.4
		Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : moyenne 6 rangs/7 éléments portée arrière-8 rangs/9 éléments	100	200.0	6.6	12.6	1.5	5.0	15.0
		Bineuses à dents inter-rang large 0.60 à 0.80 m (typemais) : 8 rangs/9 éléments portée arrière	120	8.4	15.2	2.2	3.4	15.3	23.1
		Bineuse à étoiles pour maïs : 6 rangs/7 éléments portée arrière	150	10.1	10.1	7.9	6.6	24.5	35.8
		Bineuse à étoiles pour maïs : 6 rangs/7 éléments portée arrière	200	7.9	10.1	7.9	6.6	22.3	33.7
		Bineuse à étoiles pour maïs : 6 rangs/7 éléments portée arrière	250	6.6	10.1	7.9	6.6	21.0	32.4
		Houe rotative Ecrouteuse	Houe rotative 4.5	100	8.6	19.0	0.2	2.5	12.9
	Moyenne houe rotative 4.5m-6.4m		150	8.9	19.5	0.2	2.0	12.4	15.5
	Houe rotative 4.5m		200	5.0	19.0	0.2	2.5	9.2	13.0
	Houe rotative 6.4m		225	8.1	19.9	0.1	1.4	11.0	13.4
	Houe rotative 6.4m		300	6.4	19.9	0.1	1.4	9.3	11.7
	Autres		97	13.3	22.8	0.5	9.2	26.0	35.4
			168	12.5	26.2	0.3	8.1	23.7	30.8
			283	10.6	32.2	0.2	6.6	19.4	23.9
			373	9.6	36.5	0.2	7.3	19.1	23.6

Tableau A-1 Barème d'entraide pour les interventions de travail des sols (3/6)

Nom du type d'intervention mécanique issu enquête PK_GCP- 2017		Nom simplifié issu barème d'entraide EST 2018-2019	Surface ha/an	cout €/ha outil	cout horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant en l/ha	cout chantier sans MO €/ha	cout chantier avec MO €/ha
Travail superficiel du sol entre 8 et 15 cm	Pulvériseur, déchaumeur à disques	pulvériseur 3m 24 ou 28 disques	80	12.1	18.6	0.8	11.2	27.6	41.8
		pulvériseur 3m 24 ou 28 disques	100	10.1	18.6	0.8	11.2	25.6	39.8
		moyenne pulvériseur 3m 24 ou 28 disques-3.6m 32 disques	120	10.1	20.6	0.7	11.2	25.3	38.0
		pulvériseur 3.6m 32 disques	160	8.9	22.6	0.7	11.2	24.0	35.3
		moyenne pulvériseur 3.6m 32 disques- 4.5m44 disques	200	10.2	27.2	0.5	11.3	24.9	34.4
		pulvériseur 4.5m44 disques	275	10.0	31.7	0.5	11.5	24.4	32.1
		pulvériseur 4.5m44 disques	350	8.4	31.7	0.5	11.5	22.8	30.5
	Cultivateur animé ou herse animée Outil animé	cultivateur rotatif 3m rotavator	60	20.3	18.6	0.8	16.8	43.5	64.8
		moyenne cultivateur rotatif 3m rotavator-3m à pointes	80	21.9	20.6	0.9	16.8	44.8	63.9
		moyenne cultivateur rotatif 3m rotavator-3m à pointes-4m à pointes	100	23.8	23.7	1.1	16.1	45.6	62.1
		cultivateur rotatif 3m à pointes	120	20.2	22.6	1.0	16.8	42.8	59.8
		cultivateur rotatif 4m à pointes	150	25.0	29.8	1.5	14.6	44.8	56.2
	Autres	cultivateur rotatif 4m à pointes	200	20.5	29.8	1.5	14.6	40.3	51.7
			92	11.4	19.9	0.6	8.4	23.9	34.3
			159	13.1	27.9	0.5	11.3	28.4	37.8
			234	10.4	30.4	0.4	8.9	22.4	29.5
			358	10.3	36.4	0.3	8.2	21.3	27.0

Tableau A-1 Barème d'entraide pour les interventions de travail des sols (4/6)

Nom du type d'intervention mécanique issu enquête PK_GCP- 2017		Nom simplifié issu barème d'entraide EST 2018-2019	Surface ha/an	cout €/ha outil	cout horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant en l/ha	cout chantier sans MO €/ha	cout chantier avec MO €/ha
Travail profond du sol sans retournement (>15 cm)	Soussoleuse- Décompacteur	3 corps portée	20	21.8	22.6	1.7	28.0	59.4	87.7
		4 corps portée	30	15.8	22.6	1.7	28.0	53.4	81.7
		5 corps portée	40	12.8	22.6	1.7	28.0	50.4	78.8
		moyenne 3m 4 lames droites-6 lames droites	50	21.3	28.6	0.8	17.5	45.1	59.3
		moyenne 3m 4 lames-6 lames avec rouleau	75	16.4	28.6	0.8	17.5	40.2	54.3
		moyenne 3m 6 lames-4m 8 lames avec rouleau	100	14.5	29.6	0.7	16.3	36.3	48.8
		4m 8 lames avec rouleau	125	13.9	31.7	0.6	14.0	31.5	40.9
		4m 8 lames avec rouleau	150	12.7	31.7	0.6	14.0	30.3	39.7
	Cultivateur, lourd ou chisel, cultivateur à dents et disques	charrue express 2.5 m	50	30.8	29.8	0.9	19.9	57.9	73.3
		charrue express 2.5 m	75	21.8	29.8	0.9	19.9	48.9	64.3
		moyenne charrue express 2.5m-chisel lourd 3m	100	24.9	29.8	0.6	15.4	45.9	57.8
		moyenne chisel lourd 3m-4m	150	26.1	30.8	0.4	10.5	39.9	47.6
		moyenne chisel lourd 3m-4m	200	21.0	30.8	0.4	10.5	34.7	42.4
		chisel lourd 4m pseudo lab degagt sous bati 1m , socs étroits, disques de nivellement	250	19.5	31.7	0.4	10.1	32.1	38.9
	Roto bêche Machine à bêcher	combiné bêche roulante + disques + rouleaux	200	30.9	40.7	0.2	6.4	39.1	42.5
		combiné bêche roulante + disques + rouleaux	250	25.4	40.7	0.2	6.4	33.5	36.9
		combiné bêche roulante + disques + rouleaux	300	21.7	40.7	0.2	6.4	29.8	33.2
	Autres		77	19.4	26.8	0.7	18.3	44.1	60.8
			163	16.7	29.5	0.4	11.1	31.2	40.1
			233	18.0	34.7	0.3	10.2	30.7	37.3

Tableau A-1 Barème d'entraide pour les interventions de travail des sols (5/6)

Nom du type d'intervention mécanique issu enquête PK_GCP- 2017		Nom simplifié issu barème d'entraide EST 2018-2019	Surface ha/an	cout €/ha outil	cout horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant en l/ha	cout chantier sans MO €/ha	cout chantier avec MO €/ha
Labour	Labour - charrue à versoirs-charrue à disques	3 corps, portée	20	36.4	20.8	1.8	27.5	74.2	105.1
		3 corps, portée	40	22.1	20.8	1.8	27.5	59.8	90.8
		moyenne 3-4 corps portée	60	19.8	23.4	1.6	26.9	57.2	84.8
		4 corps portée, sécurité non stop hydraulique	70	25.0	25.9	1.4	26.4	62.0	86.3
		Moyenne 4 corps portée	80	20.8	25.9	1.4	26.4	57.8	82.0
		Moyenne 4 corps portée	100	18.2	25.9	1.4	26.4	55.2	79.5
		5 corps portée, sécurité non stop hydraulique	120	20.3	29.8	1.1	24.3	53.4	72.3
		5 corps portée, sécurité non stop hydraulique	160	17.2	29.8	1.1	24.3	50.3	69.2
		Moyenne 5-6 corps portée-7 ou 8 corps semi portée	200	18.9	33.1	0.8	20.5	43.2	59.0
		Moyenne 6 corps portée-6 ou 7 ou 8 corps semi portée	250	17.4	34.0	0.7	19.5	42.0	54.4
		Moyenne 6 corps portée- 7 ou 8 ou 9 ou 10corps semi portée	300	17.2	38.3	0.7	19.9	42.3	53.8
		9 ou 10 corps lourde	350	19.3	48.9	0.5	19.3	43.7	52.2
		Moyenne 9 ou 10 lourde ou 12 corps semi portée	400	18.0	50.9	0.4	18.1	40.8	48.5
	12 corps , semis portée , sol léger	450	17.0	52.8	0.4	16.8	38.2	45.0	
	12 corps , semis portée , sol léger	500	16.1	52.8	0.4	16.8	37.2	44.0	
	Autres		66	24.4	25.8	1.2	24.0	57.6	80.4
			166	20.7	30.8	0.7	18.0	44.3	58.1
			267	18.0	34.6	0.6	16.5	38.8	49.1
			390	18.0	47.4	0.4	16.2	38.4	45.7
	Roulage	Rouleau lisse	Cambridge 6m	80	8.7	16.3	0.3	2.8	14.1
Cambridge 8m			100	8.8	19.9	0.3	2.5	13.8	19.8
Cambridge 6m			120	6.0	16.3	0.3	2.8	11.5	18.3
Cambridge 9.5m			125	15.1	23.5	0.2	2.5	19.8	18.0
Moyenne cambridge 6m-8m-10m			150	6.2	19.9	0.3	2.6	11.2	19.3
Cambridge 9.5m			175	11.0	23.5	0.2	2.5	15.7	15.3
Moyenne cambridge 8m-10m			200	5.3	21.7	0.2	2.5	10.1	17.6
Cambridge 10m			250	4.8	23.5	0.2	2.5	9.5	16.8
Rouleau non lisse couteau (« rolo faca »)		ouleau destructeur 3m simple	80	7.1	13.6	0.5	3.4	13.8	22.3
		Rouleau destructeur 3m simple	115	5.0	13.6	0.5	3.4	11.8	20.3
		Rouleau destructeur 3m simple	150	3.9	13.6	0.5	3.4	10.7	19.2
Autres			87	8.2	16.6	0.3	2.9	13.9	20.6
			148	7.5	18.9	0.3	2.8	13.0	18.3
		200	4.4	18.6	0.3	2.9	10.1	18.0	

Tableau A-1 Barème d'entraide pour les interventions de travail des sols (6/6)

Nom du type d'intervention mécanique issu enquête PK_GCP- 2017	Nom simplifié issu barème d'entraide EST 2018-2019	Surface ha/an	cout €/ha outil	cout horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant en l/ha	cout chantier sans MO €/ha	cout chantier avec MO €/ha
Broyage des végétaux	Axe vertical giro 180cm	30	12.3	18.6	1.4	19.2	38.9	63.2
	Axe vertical giro 180cm	45	9.0	18.6	1.4	19.2	35.5	59.8
	Axe vertical giro 180cm	60	7.3	18.6	1.4	19.2	33.8	58.1
	Axe horizontal 3m ou giro 360cm	70	20.0	22.6	0.7	11.2	35.0	46.4
	Axe horizontal 3m ou giro 360cm	110	14.2	22.6	0.7	11.2	39.2	40.6
	Axe horizontal 3m ou giro 360cm	150	11.5	22.6	0.7	11.2	26.5	37.8
	Axe vertical repliable giro 4.50/5m 3 rotors	200	15.1	29.8	0.3	6.2	23.6	28.5
	Axe vertical repliable giro 4.50/5m 3 rotors	275	11.6	29.8	0.3	6.2	20.1	25.0
Entretien prairie - fauche ou broyage des refus	Axe vertical repliable giro 4.50/5m 3 rotors	350	9.6	29.8	0.3	6.2	18.1	22.9
	rotative 2.8m 7 disques	70	16.7	13.6	0.6	3.7	24.3	33.7
	rotative 3.2m 8 disques	80	16.5	13.6	0.5	3.1	22.7	30.4
	rotative 2.8m 7 disques	90	13.8	13.6	0.6	3.7	21.4	30.8
	rotative 3.2m 8 disques	100	14.0	13.6	0.5	3.1	20.1	27.9
	rotative 2.8m 7 disques	110	12.0	13.6	0.6	3.7	19.6	29.0
	rotative 3.2m 8 disques	120	12.3	13.6	0.5	3.1	18.4	26.2
	rotative 4m de 8 à 10 disques	125	15.6	19.9	0.3	3.4	22.2	27.9
	rotative 4m de 8 à 10 disques	165	12.7	19.9	0.3	3.4	19.3	25.0
	rotative 4m de 8 à 10 disques	200	11.1	19.9	0.3	3.4	17.8	23.5

Tableau A-2 Cout d'achat et surface annuelle de travail des outils de travail des sols (1/2)

Type de Machine	Typologie de la machine	Prix neuf € ht	Fourchette surface annuelle de travail ha/ an
Rouleaux lisses	Rouleau Cambridge 6m, repliage hydraulique	7 880 €	80 -150 ha
	Rouleau Cambridge 9.5m, repliage hydraulique, lame niveleuse + équipement divers	22 200 €	125-225 ha
	Rouleau Cambridge 10m, simple, repliage hydraulique	12 600 €	150-250 ha
Rouleaux destructeurs ou écraseurs de couverts végétaux	Rouleau destructeur 3m , Rouleau simple	6 560 €	80-150 ha
Broyeurs tractés	Axe vertical, giro' 180cm	2 390 €	30-60 ha
	Axe horizontal 3m ou 'giro' 360cm	8 800 €	70-150 ha
	Axe vertical repliable , giro' 4.50/5m 3 rotors	20 300 €	200-350 ha
Déchaumeur à dents	Déchaumeur 3m , combiné dents avec ou sans disques, sécurité mécanique	8 600 €	150-200 ha
	Déchaumeur 4m, combiné dents avec ou sans disques ,sécurité non stop	15 000 €	250-300 ha
	Déchaumeur 6m, combiné dents avec ou sans disques , sécurité non stop + repliable	25 300 €	300-500 ha
Vibroculteurs	Vibroculteur 4m, 21 dents vibrantes, avec rouleaux cage	3 950 €	80-120 ha
	Vibroculteur 6m, rouleaux cage, repliage hydraulique	5 750 €	120-180 ha
Déchaumeur à disques indépendants	Déchaumeur rapide 3m, disques indépendants chassis fixe	16 400 €	200-300 ha
	Déchaumeur rapide 4m, Trainé, disques indépendants, repliage hydraulique, homologué	26 500 €	250-400 ha
	Déchaumeur rapide 6m, Porté, disques indépendants , repliage hydraulique	36 700 €	400-600 ha
Déchaumeurs combiné	Combiné bêche roulante + disques + rouleaux	49 100 €	200-300 ha
Herse rotatives et alternatives	Herse rotative 3m, rouleau barre	12 600 €	80-120 ha
	Herse rotative 3.50m, rouleau packer de 450mm,	15 600 €	100-150 ha
	Herse rotative 4.5m, rouleau packer, repliable	26 500 €	150-250 ha
	Herse rotative 6m, rouleau packer, repliable	35 600 €	300-500 ha
Cultivateur rotatif animés à axe horizontal	Cultivateur rotatif 3m , type "rotavator", lame équerre, patins	9 900 €	60-100 ha
	Cultivateur rotatif 3m à pointes, rouleau packer attelage semoir inclus	13 400 €	80-120 ha
	Cultivateur rotatif 4m à pointes, rouleau packer	21 200 €	100-200 ha

Tableau A-2 Cout d'achat et surface annuelle de travail des outils de travail des sols (2/2)

Type de Machine	Typologie de la machine	Prix neuf € ht	Fourchette surface annuelle de travail ha/ an
Herse de reprise sur culture et emousseuses	Herse étrille 6m, portée, repliage hydraulique	6 450 €	100-150 ha
	Herse étrille 9m, portée, repliage hydraulique	10 700 €	125-175 ha
	Herse étrille 24m, Semi-portée, repliage hydraulique	36 000 €	250-350 ha
Houe rotative	Houe rotative 4.5 m, 2 rangs d'étoiles, porté, repliage hydraulique	9 000 €	100-200 ha
	Houe rotative 6.4m, 2 rangs d'étoiles, porté, repliage hydraulique	18 800 €	150-300 ha
Bineuses à dents inter-rang étroit 0.45 à 0.55m	Bineuse arrière, 6 rangs/ 7 éléments	8 200 €	60-100 ha
	Bineuse arrière , 11 rangs/12 éléments	17 300 €	120-180 ha
	Bineuse arrière , 18 rangs/19 éléments	22 000 €	200-300 ha
Bineuses à dents inter-rang large 0.6 à 0.8 m (type maïs)	6 rangs/ 7 éléments, portée arrière	8 200 €	60-100 ha
	8 rangs/ 9 éléments, portée arrière	11 000 €	80-120 ha
Bineuses à étoiles pour maïs	6 rangs/ 7 éléments , portée arrière	16 000 €	150-250 ha
Soussoleuse-Décompacteur	Décompacteur 3 corps portée, sécurité boulon de rupture	4 400 €	20-40 ha
	Décompacteur 4m , 8 lames avec rouleau, sécurité boulon de rupture	11 400 €	100-150 ha
Matériels de pseudo labour	Charrue express 2.5 m	14 350 €	50-100 ha
	Chisel lourd 4m pseudo lab degagt sous bati 1m , socs étroits, disques de nivellement	37 400 €	150-250 ha
Charrues réversibles	3 corps, portée, boulon de rupture	7 080 €	20-60 ha
	4 corps, portée, sécurité non stop hydraulique	14 900 €	60-100 ha
	5 corps, portée, sécurité non stop hydraulique	18 700 €	120-200 ha
	9 ou 10 corps, "lourde" chariot 2 roues, sécurité non stop hydraulique	50 000 €	300-400 ha
	12 corps , semis portée , sol léger, sécurité boulons, versoirs composite, homologué route 40 km/h	51 600 €	400-500 ha

Tableau A-2 Coûts de passage des pulvérisateurs (1/2)

Nom simplifié via croisement barème d'entraide 2018-2019 * surface annuelle travaillée, classification par surface annuelle travaillée croissante	Coût achat	surface ha/an (utilisation annuelle)	coût €/ha	coût horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant l/ha	coût chantier sans MO €/ha	coût chantier avec MO €/ha
Porté 600l rampe 12m P constante	6500	100	6.4	9.9	0.1	2.0	9.7	15.3
Porté 600l rampe 12m P constante		150	4.5	9.9	0.1	2.0	7.8	13.4
Moyenne porté 600l rampe 12m P constante; porté 100l rampe 12-15m DPM, équipé		200	5.25	11.8	0.1	1.8	8.6	13.6
Porté 100l rampe 12-15m DPM, équipé		300	4.9	13.6	0.1	1.7	8.3	12.6
Porté 1800l rampe 28m DPAE , repliage hydraulique		500	8.2	16.3	0.1	1.2	10.6	13.0
Moyenne porté 1200l DPM rampe 18 à 21 m DPM , repliage hydraulique ; porté 1800l + cuve AV 800l rampe 28m DPAE, repliage hydraulique ; trainé 2500l rampe 24m, DPAE, entrée de gamme ; trainé 2500l rampe 24m, DPAE, tout équipé		600	7.275	18.7	0.1	1.3	9.9	12.3
Porté 1800l rampe 28m DPAE , repliage hydraulique		700	6.2	16.3	0.1	1.2	8.5	11.0
Moyenne porté 1200l DPM rampe 18 à 21 m DPM , repliage hydraulique ; porté 1500l rampe 24m DPAE , repliage hydraulique ; porté 1800l + cuve AV 800l rampe 28m DPAE, repliage hydraulique ; trainé 2500l rampe 24m, DPAE, entrée de gamme		800	5.2	17.8	0.1	1.4	7.9	10.6
Porté 1800l rampe 28m DPAE , repliage hydraulique		900	6.8	19.9	0.1	1.0	8.8	10.5
Moyenne porté 1800l + cuve AV 800l rampe 28m DPAE, repliage hydraulique; trainé 2500l rampe 24m, DPAE, entrée de gamme ; trainé 2500l rampe 24m, DPAE, tout équipé		1000	5.5	19.9	0.1	1.3	8.0	10.1
Trainé 3200 l DPAE 28 m		1200	5.4	19.9	0.1	1.0	7.4	9.1
Moyenne trainé 3200 l DPAE 28 m; Trainé 4000 l rampe Alu 32 à 36 m DPAE		1400	5.4	21.7	0.1	1.0	7.4	9.0
Moyenne 140 cg 15-18 hl 2RM rampe 24m; 180 ch 4 RM 30hl Cabine classe 4 rampe 28 m équipement standard		1500	5.4	21.7	0.1	0.9	12.8	13.7

Tableau A-2 Coûts de passage des pulvérisateurs (2/2)

Nom simplifié via croisement barème d'entraide 2018-2019 * surface annuelle travaillée, classification par surface annuelle travaillée croissante	Coût achat	surface ha/an (utilisation annuelle)	coût €/ha	coût horaire base 700 ha / an	Performance	Carburant l/ha	coût chantier sans MO €/ha	coût chantier avec MO €/ha
Moyenne 180 ch 4 RM 30hl Cabine classe 4 rampe 28 m équipement standard ; 180 ch 4RM 30hl Cabine classe 4 rampe 36m Autoguidage, circulation continue, etc		2000	5.4	21.7	0.1	0.7	11.6	12.2
Moyenne Trainé 4000 l rampe Alu 32 à 36 m DPAAE; 140 cg 15-18 hl 2RM rampe 24m; 180 ch 4 RM 30hl Cabine classe 4 rampe 28 m équipement standard ; 180 ch 4RM 30hl Cabine classe 4 rampe 36m Autoguidage, circulation continue, etc ; 200ch 4RM 40hl rampe 28 à 32m équipement standard		2500	3.9	23.5	0.0*	0.8	8.7	9.6
Moyenne 180 ch 4RM 30hl Cabine classe 4 rampe 36m Autoguidage, circulation continue, etc ; 200ch 4RM 40hl rampe 28 à 32m équipement standard		3000	3.9	23.5	0.0*	0.7	9.0	9.6
Moyenne Trainé 5200 l HG rampe Alu 36m DPAAE, Haut de gamme Ttes options; 200ch 4RM 40hl rampe 28 à 32m équipement standard		3500	4.4	23.5	0.0*	0.9	7.5	8.4
220 ch 4RM 50hl rampe 36m équipement standard		4000	4.4	23.5	0.0*	0.9	7.6	8.3
220 ch 4RM 50hl rampe 36m équipement standard		4500	4.4	23.5	0.0*	0.9	7.0	7.7
Moyenne trainé 5200 l HG rampe Alu 36m DPAAE, Haut de gamme Ttes options ; 250 ch 4RM 50hl Cabine cl.4 rampe 36m tt equipt + voie variable; v		5000	3.4	23.5	0.0*	0.6	7.1	7.7
Moyenne 250 ch 4RM 50hl Cabine cl.4 rampe 36m tt equipt + voie variable; 250 ch 4RM 50hl Cabine avancée cl. 4 rampe 36m , voie et hauteur variable		6000	3.4	23.5	0.0*	0.5	7.1	7.4
Moyenne 250 ch 4RM 50hl Cabine cl.4 rampe 36m tt equipt + voie variable; 250 ch 4RM 50hl Cabine avancée cl. 4 rampe 36m , voie et hauteur variable		7000	3.4	23.5	0.0*	0.5	6.3	6.6

Note : * La performance est de 0.04.

Autres sources de données

- Ephy

La base de données réglementaire (ANSES) liste l'ensemble des produits phytosanitaires autorisés ainsi que les caractéristiques des produits : substances actives, concentration, usages.

Source : export des données en novembre 2019 : <https://ephy.anses.fr> et <https://www.data.gouv.fr/fr/>

- BNVD – Banque nationale de données des ventes/achats des distributeurs

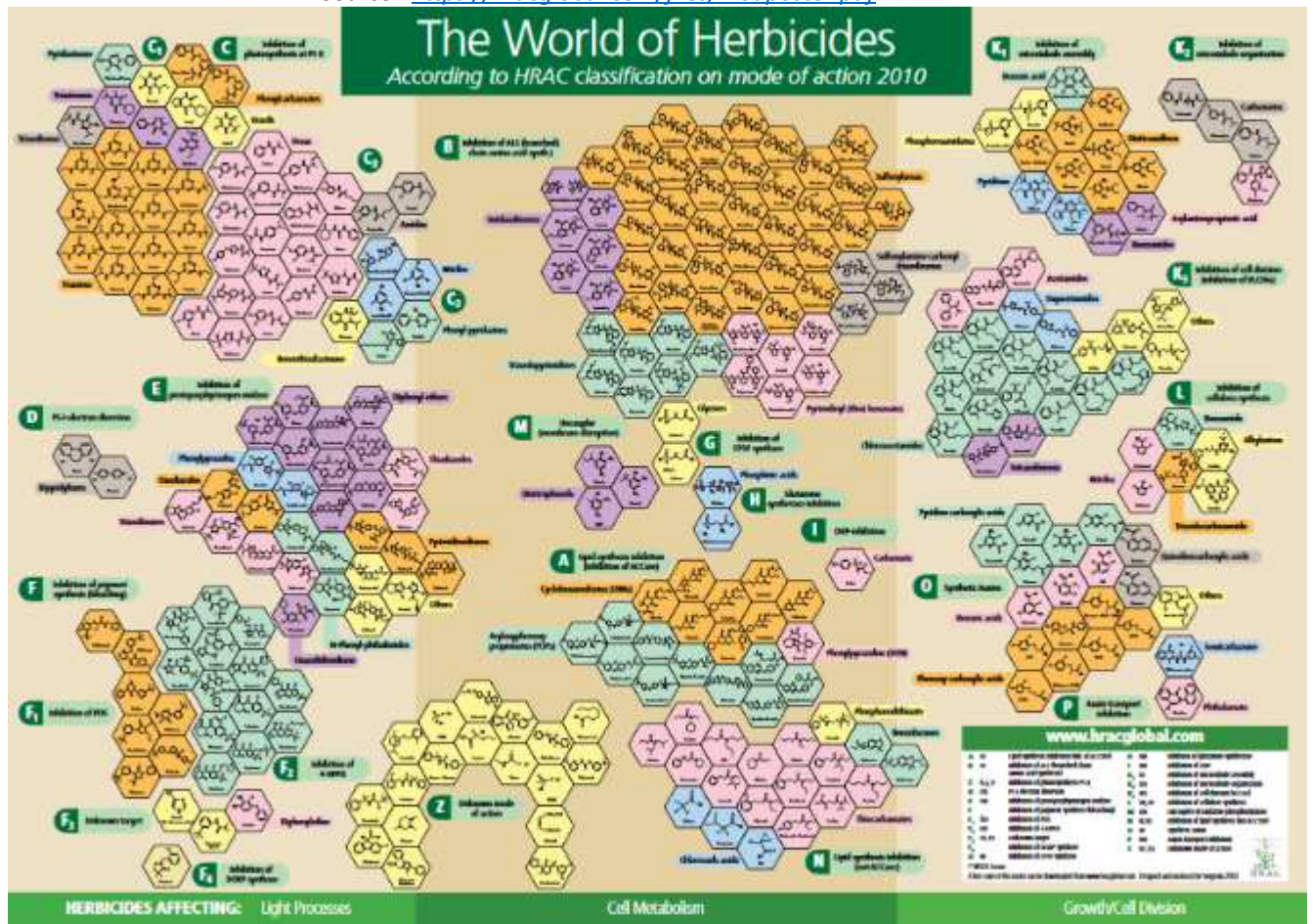
Source : dernière consultation janvier 2020, <https://www.data.gouv.fr/fr/>

- RICA – Réseau d'information comptable agricole

Source : dernière consultation janvier 2020, utilisation des microdonnées. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/reseau-d-information-comptable/>

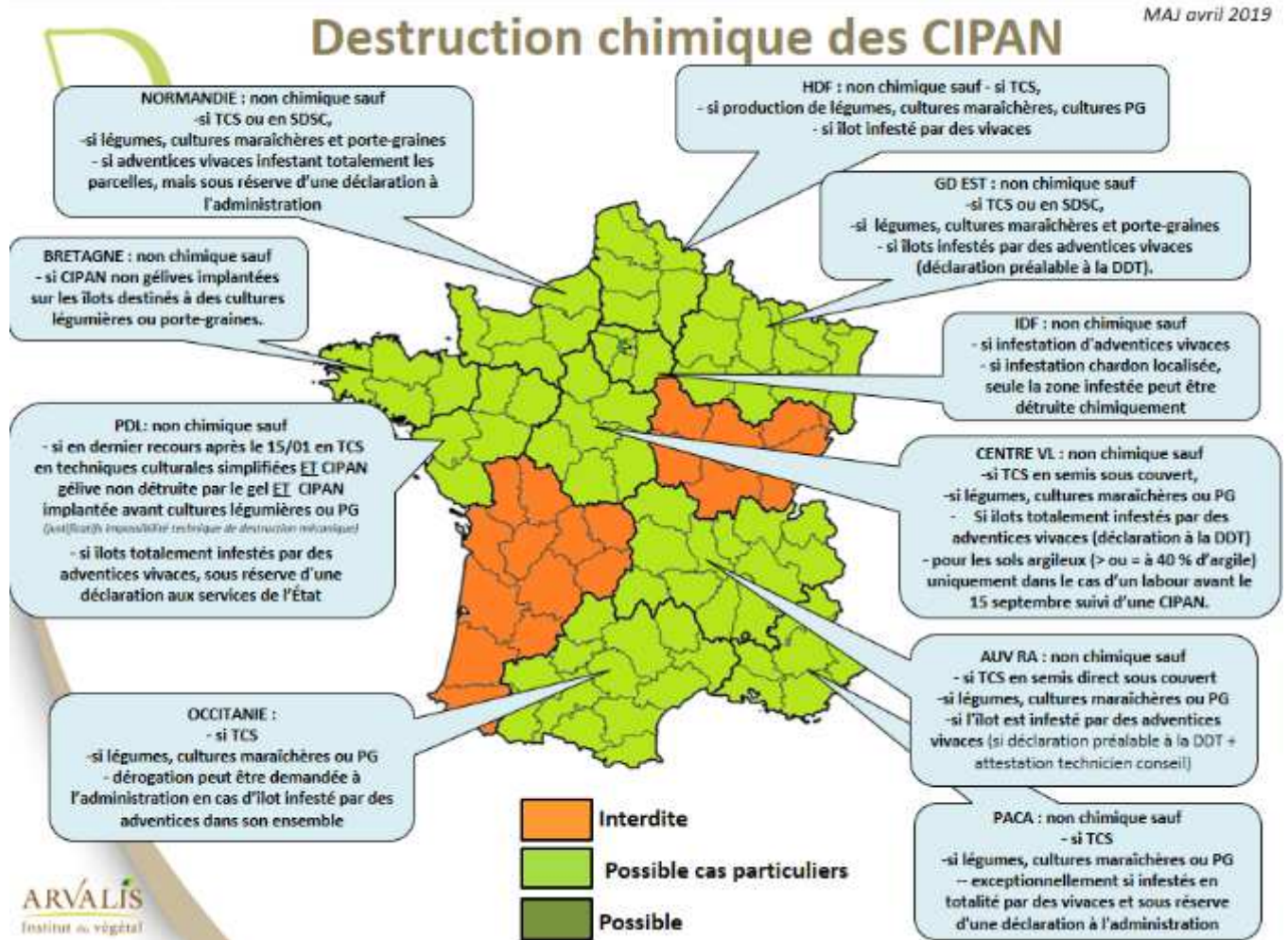
Annexe B Classification HRAC des modes d'actions des herbicides

Source : <https://hracglobal.com/files/moaposter.pdf>



Note Source : Arvalis, avril 2019

MAJ avril 2019



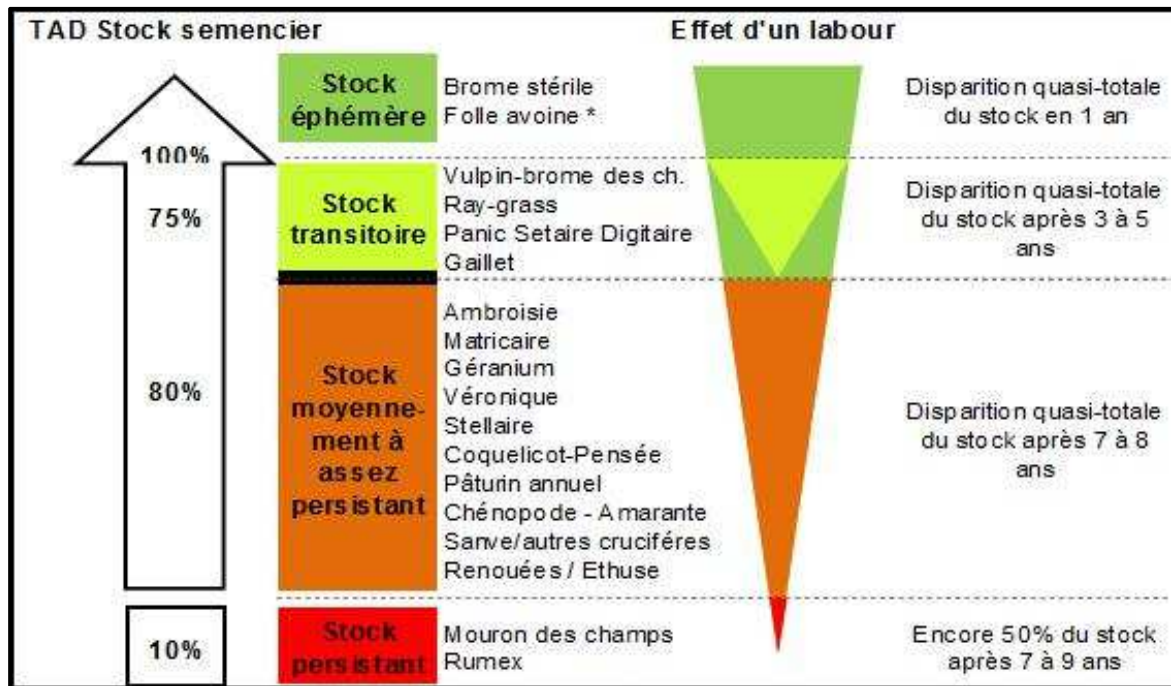
Annexe D Sensibilité des différentes espèces aux différents modes de destruction. Elle peut être modulée selon le développement du couvert (couvert développé, variété précoce = plus sensible au gel).

Note : Source : Arvalis-Institut du végétal

	Gel	Roulage sur gel	Broyage	Labour	Déchaumage
Niger, Tournesol, Sarrasin	0 à -4°	++++	+++	++++	+++
Moutarde blanche	-5 à -10°	+++	++++	(+ broyage)	(+ broyage)
Radis fourrager (rosette)	-8 à -15°	++	+	++	++
Phacélie	-5 à -13°	++++	+++	++++	+++
Seigle, ray grass (tallage)	<-15°	+	+	+++	++
Céréale (épiée)	-5 à -10°	++	++	+++	+++
Vesce, Féverole (floraison)	-5 à -10°	+++	selon hauteur	++++	+++
Très sensible	++++	Assez sensible	++		
Sensible	+++	Peu sensible	+		

Annexe E Taux annuel de décroissance d'adventices et effet d'un labour.

Note : Source Arvalis



Annexe F Méthodes de maitrises des adventices selon les cibles

Note (Source : Arvalis dans Reboud, 2017)

	MATURITE		FAISABILITE		EFFICACITE									
	Vivaces dicotylédones	Vivaces graminées	Intercultures dicotylédones	Intercultures graminées	Semis direct intercultures dicotylédones	Semis direct intercultures graminées	Interculture végétal couvert	Semis direct intercultures végétal couvert	Semis direct couvert permanent	Destruction des prairies	Régulation des couverts (jachères)			
Glyphosate (X)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Nouv. herbicides (X)	*	*	*1	*2	*1	*2	*	*	*	*	*	*		
Subst. naturelles (Xb)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
Pureté semences (P)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
Nettoyage mat. (P)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
Menures pailles (P)	**	**	**4	**3	**	**3	**	**	**	**	**	**		
Bordures/haies (P)	**	**	**4	**4	**4	**4	**4	**4	**4	**4	**4	**4		
Compostage (P)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
Rotation/espèces (A)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
Choix variétal (A)	S	S	*6	*6	*6	*6	*6	*6	*6	*6	*6	*6		
Date de semis (A)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Densité semis (A)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
Fertilisation (A)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Labour (A)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Faux semis (A)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Roulage et gel (φ)														
Broyage (φ)														
Robots (φ)														

Tableau 8. Analyse des potentialités de différentes méthodes pour maîtriser les plantes adventices et les couverts en grande culture. Chaque méthode est caractérisée par son niveau de maturité technologique (M), sa facilité de mise en œuvre (F), et son efficacité (E). Les codes couleurs suivants sont utilisés pour chacun des trois critères. Niveau de maturité technologique ; vert foncé : déjà commercialisé et/ou utilisé ; vert clair : a démontré son efficacité dans de nombreux cas ; orange : méthode validée dans des conditions expérimentales particulières ; jaune : preuve de concept fournie, phase de recherche active ; rouge : plus bas niveau, les principes de bases sont uniquement formalisés. Faisabilité et l'efficacité ; vert foncé : très élevée ; vert clair : élevée ; orange : moyenne ; jaune : mauvaise ; rouge : très mauvaise. Les codes couleurs des cellules divisées en deux indiquent les classes extrêmes encadrant la variabilité du critère concerné. En gris : non concerné.

* : effet sur l'année n, directement sur la culture quel que soit le niveau d'infestation ; ** : effet à terme ou contribution au maintien d'un faible stock semencier.

Annexe G Résultats additionnels

Tableau G-1 : Effets moyens estimés sur les interventions de désherbage et de travail du sol: **scénario général de référence (1)**

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Semis Direct (0 labour sur 2012-2017 ; 0 travail du sol en 2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 1.7%						
		LabFreq		SD		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.359	0.030	-0.359	0.030
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.519	0.059	1.806	0.145	-0.286	0.160
		IFT Protection herbicide chimique	1.519	0.059	2.224	0.135	-0.704	0.153
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.770	0.083	0.576	0.076	0.194	0.099
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.839	0.114	0.000	0.000	1.839	0.114
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.702	0.085	0.000	0.000	0.702	0.085
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.140	0.043	0.000	0.000	0.140	0.043
		Nb. labour	0.666	0.045	0.000	0.000	0.666	0.045
	Nb. int. travail du sol	3.347	0.144	0.000	0.000	3.347	0.144	

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Techniques Culturelles Simplifiées (0 labour sur 2012-2017 ; travail du sol en 2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 18.1%						
		LabSyst		TCS		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.134	0.005	-0.134	0.005
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.656	0.026	1.833	0.036	-0.177	0.042
		IFT Protection herbicide chimique	1.656	0.026	1.970	0.035	-0.314	0.042
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.727	0.031	0.648	0.029	0.079	0.042
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.833	0.038	1.798	0.048	0.035	0.062
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.737	0.032	0.770	0.037	-0.033	0.048
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.190	0.016	0.374	0.021	-0.184	0.026
		Nb. labour	0.553	0.017	0.000	0.000	0.553	0.017
	Nb. int. travail du sol	3.313	0.042	2.942	0.046	0.370	0.062	

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Labour Occasionnel (1 à 2 labours sur 2012-2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 18.6%						
		LabFreq		LabOcca		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.091	0.004	-0.091	0.004
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.615	0.021	1.804	0.044	-0.189	0.049
		IFT Protection herbicide chimique	1.615	0.021	1.897	0.044	-0.281	0.049
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.660	0.028	0.594	0.026	0.066	0.036
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.780	0.034	1.671	0.044	0.109	0.054
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.693	0.030	0.754	0.038	-0.060	0.048
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.174	0.013	0.304	0.021	-0.130	0.024
		Nb. labour	0.594	0.015	0.288	0.016	0.306	0.019
	Nb. int. travail du sol	3.241	0.036	3.016	0.044	0.225	0.054	

Tableau G-1 : Effets moyens estimés sur les interventions de désherbage et de travail du sol: **scénario général de référence (2)**

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Labour Fréquent (3 à 5 labours sur 2012-2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 33.7%						
		LabFreq		LabFreq		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	<i>IFT Glyphosate</i>	0.000	0.000	0.044	0.002	-0.044	0.002
		<i>IFT Herbicides hors glyphosate</i>	1.714	0.030	1.747	0.031	-0.033	0.010
		<i>IFT Protection herbicide chimique</i>	1.715	0.030	1.791	0.031	-0.077	0.010
		<i>Nb. int. mécaniques sur couvert</i>	0.624	0.063	0.645	0.024	-0.021	0.063
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	1.882	0.092	1.725	0.034	0.158	0.093
		<i>Nb. int. travail du sol superficiel</i>	0.814	0.065	0.688	0.024	0.126	0.065
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	0.134	0.033	0.201	0.013	-0.067	0.033
		<i>Nb. labour</i>	0.721	0.041	0.577	0.015	0.144	0.042
		<i>Nb. int. travail du sol</i>	3.552	0.095	3.191	0.039	0.361	0.096

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Labour Systématique (6 labours sur 2012-2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 27.9%						
		LabSyst		LabSyst		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	<i>IFT Glyphosate</i>	0.000	0.000	0.027	0.001	-0.027	0.001
		<i>IFT Herbicides hors glyphosate</i>	1.569	0.027	1.583	0.028	-0.015	0.007
		<i>IFT Protection herbicide chimique</i>	1.568	0.027	1.610	0.028	-0.041	0.007
		<i>Nb. int. mécaniques sur couvert</i>	0.523	0.090	0.594	0.023	-0.071	0.090
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	1.862	0.103	1.679	0.029	0.184	0.103
		<i>Nb. int. travail du sol superficiel</i>	0.669	0.100	0.453	0.024	0.216	0.100
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	0.097	0.034	0.089	0.008	0.008	0.034
		<i>Nb. labour</i>	1.020	0.008	1.008	0.001	0.012	0.008
		<i>Nb. int. travail du sol</i>	3.648	0.107	3.229	0.037	0.419	0.108

Tableau G-2 : Effets moyens estimés sur les interventions de désherbage et de travail du sol: **scénario général**
« **extrême** » (1)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Semis Direct (0 labour sur 2012-2017 ; 0 travail du sol en 2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 1.7%						
		LabSyst		SD		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.340	0.032	-0.340	0.032
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.529	0.080	1.823	0.143	-0.295	0.143
		IFT Protection herbicide chimique	1.529	0.080	2.220	0.136	-0.690	0.143
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.720	0.081	0.592	0.085	0.128	0.099
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.865	0.120	0.000	0.000	1.865	0.120
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.522	0.086	0.000	0.000	0.522	0.086
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.055	0.020	0.000	0.000	0.055	0.020
		Nb. labour	1.015	0.013	0.000	0.000	1.015	0.013
		Nb. int. travail du sol	3.457	0.117	0.000	0.000	3.457	0.117

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Techniques Culturelles Simplifiées (0 labour sur 2012-2017 ; travail du sol en 2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 18.1%						
		LabSyst		TCS		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.138	0.005	-0.138	0.005
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.540	0.026	1.832	0.037	-0.292	0.044
		IFT Protection herbicide chimique	1.543	0.026	1.974	0.037	-0.430	0.044
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.740	0.031	0.627	0.031	0.113	0.043
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.754	0.039	1.817	0.048	-0.062	0.058
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.489	0.032	0.781	0.040	-0.292	0.049
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.072	0.010	0.385	0.022	-0.312	0.024
		Nb. labour	1.005	0.002	0.000	0.000	1.005	0.002
		Nb. int. travail du sol	3.321	0.039	2.983	0.047	0.338	0.055

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Labour Occasionnel (1 à 2 labours sur 2012-2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 18.6%						
		LabSyst		LabOcca		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.092	0.004	-0.092	0.004
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.559	0.027	1.796	0.046	-0.237	0.052
		IFT Protection herbicide chimique	1.564	0.027	1.890	0.046	-0.326	0.052
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.679	0.031	0.603	0.027	0.076	0.040
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.677	0.041	1.699	0.045	-0.022	0.060
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.490	0.028	0.758	0.041	-0.268	0.050
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.075	0.012	0.312	0.022	-0.237	0.025
		Nb. labour	1.007	0.003	0.275	0.016	0.731	0.016
		Nb. int. travail du sol	3.249	0.043	3.044	0.049	0.205	0.063

Tableau G-2 : Effets moyens estimés sur les interventions de désherbage et de travail du sol: **scénario général « extrême » (2)**

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Labour Fréquent (3 à 5 labours sur 2012-2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 33.7%						
		LabSyst		LabFreq		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	<i>IFT Glyphosate</i>	0.000	0.000	0.043	0.002	-0.043	0.002
		<i>IFT Herbicides hors glyphosate</i>	1.599	0.024	1.732	0.032	-0.132	0.040
		<i>IFT Protection herbicide chimique</i>	1.602	0.024	1.774	0.033	-0.172	0.040
		<i>Nb. int. mécaniques sur couvert</i>	0.660	0.027	0.630	0.023	0.030	0.034
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	1.716	0.037	1.714	0.034	0.002	0.046
		<i>Nb. int. travail du sol superficiel</i>	0.495	0.023	0.699	0.025	-0.205	0.034
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	0.086	0.012	0.193	0.012	-0.107	0.017
		<i>Nb. labour</i>	1.006	0.002	0.586	0.014	0.421	0.015
		<i>Nb. int. travail du sol</i>	3.303	0.037	3.192	0.037	0.111	0.045

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Labour Systématique (6 labours sur 2012-2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 27.9%						
		LabSyst		LabSyst		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	<i>IFT Glyphosate</i>	0.000	0.000	0.027	0.001	-0.027	0.001
		<i>IFT Herbicides hors glyphosate</i>	1.569	0.027	1.583	0.028	-0.015	0.007
		<i>IFT Protection herbicide chimique</i>	1.568	0.027	1.610	0.028	-0.041	0.007
		<i>Nb. int. mécaniques sur couvert</i>	0.523	0.090	0.594	0.023	-0.071	0.090
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	1.862	0.103	1.679	0.029	0.184	0.103
		<i>Nb. int. travail du sol superficiel</i>	0.669	0.100	0.453	0.024	0.216	0.100
		<i>Nb. int. travail du sol très superficiel</i>	0.097	0.034	0.089	0.008	0.008	0.034
		<i>Nb. labour</i>	1.020	0.008	1.008	0.001	0.012	0.008
		<i>Nb. int. travail du sol</i>	3.648	0.107	3.229	0.037	0.419	0.108

Tableau G-3 : Effets moyens estimés sur les interventions de désherbage et de travail du sol: **scénario intermédiaire pour les stratégies de travail du sol sans labour**

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Semis Direct (0 labour sur 2012-2017 ; 0 travail du sol en 2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 1.7%						
		LabOcca		SD		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Occasionnel	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.365	0.040	-0.365	0.040
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.598	0.087	1.754	0.172	-0.156	0.158
		IFT Protection herbicide chimique	1.598	0.087	2.179	0.159	-0.581	0.151
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.684	0.087	0.622	0.083	0.062	0.109
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.963	0.153	0.000	0.000	1.963	0.153
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.683	0.112	0.000	0.000	0.683	0.112
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.272	0.063	0.000	0.000	0.272	0.063
		Nb. labour	0.449	0.065	0.000	0.000	0.449	0.065
		Nb. int. travail du sol	3.368	0.159	0.000	0.000	3.368	0.159

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible						
		Techniques Culturelles Simplifiées (0 labour sur 2012-2017 ; travail du sol en 2017)						
		Part dans la surface de grandes cultures 18.1%						
		LabOcca		TCS		Effet moyen		
		Gly=0	ET-Est	Gly=1,0	ET-Est	Diff: 0-1	ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Occasionnel	IFT Glyphosate	0.000	0.000	0.133	0.004	-0.133	0.004
		IFT Herbicides hors glyphosate	1.801	0.040	1.854	0.038	-0.053	0.053
		IFT Protection herbicide chimique	1.802	0.040	1.989	0.037	-0.187	0.053
		Nb. int. mécaniques sur couvert	0.665	0.038	0.645	0.031	0.020	0.049
		Nb. int. travail du sol très superficiel	1.806	0.042	1.818	0.049	-0.012	0.062
		Nb. int. travail du sol superficiel	0.761	0.035	0.774	0.039	-0.013	0.052
		Nb. int. travail du sol très superficiel	0.302	0.023	0.382	0.022	-0.080	0.031
		Nb. labour	0.320	0.018	0.000	0.000	0.320	0.018
		Nb. int. travail du sol	3.189	0.048	2.974	0.046	0.215	0.063

Tableau G-4 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: scénario général de référence (1)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Semis Direct																			
		Part dans la surface de grandes cultures																			
		1.7%																			
		Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)													Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est		
			Herbi-cides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est	Total					ET-Est	
Stratégie de travail du sol imposée sans glyphosate	Labour Fréquent	Traitements au glyphosate	-0.359	-11.93	1.47	-6.79	0.35	-1.65	0.07	-0.88	0.04	-2.32	0.13	-21.25	1.55	-23.57	1.62	-1.25	0.05	-0.14	0.01
		Interventions mécaniques sur couvert	0.194			0.58	0.82	0.20	0.61	-0.01	0.54	-0.22	0.83	0.76	1.94	0.54	2.68	-0.02	0.77	0.00	0.05
		Interventions de travail du sol très superficiel	1.839			11.86	0.56	6.09	0.25	6.44	0.24	7.23	0.37	24.39	1.02	31.62	1.36	9.20	0.34	0.43	0.02
		Interventions de travail du sol superficiel	0.702			5.16	0.68	3.38	0.39	3.62	0.41	4.55	0.55	12.17	1.46	16.72	2.00	5.18	0.58	0.29	0.04
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.140			2.17	0.61	1.09	0.29	1.09	0.28	1.19	0.31	4.35	1.14	5.54	1.44	1.55	0.40	0.07	0.02
		Labour	0.666			13.25	0.89	11.04	1.03	11.13	0.80	13.56	1.25	35.42	2.54	48.98	3.72	15.90	1.14	0.78	0.07
		Toutes interventions de travail du sol	3.347			32.44	1.19	21.61	1.11	22.28	0.80	26.53	1.56	76.33	2.82	102.86	4.31	31.82	1.14	1.57	0.09
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-13.90	1.49	25.11	1.34	19.88	1.27	21.24	0.96	23.61	1.64	52.33	3.27	75.94	4.73	30.35	1.37	1.41	0.10
		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Techniques Culturelles Simplifiées																			
		Part dans la surface de grandes cultures																			
		18.1%																			
		Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)													Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est		
			Herbi-cides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est	Total					ET-Est	
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	Traitements au glyphosate	-0.134	-4.98	0.38	-2.80	0.08	-0.69	0.02	-0.37	0.01	-0.98	0.03	-8.84	0.42	-9.81	0.43	-0.52	0.01	-0.06	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	0.078			-0.17	0.26	0.05	0.17	-0.10	0.15	0.04	0.23	-0.22	0.56	-0.19	0.77	-0.14	0.21	0.01	0.01
		Interventions de travail du sol très superficiel	0.035			0.58	0.28	0.31	0.13	0.23	0.13	0.59	0.15	1.12	0.52	1.71	0.67	0.33	0.19	0.04	0.01
		Interventions de travail du sol superficiel	-0.033			0.27	0.30	0.06	0.19	0.09	0.20	0.16	0.24	0.42	0.68	0.57	0.91	0.13	0.29	0.02	0.02
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.184			-2.82	0.38	-1.53	0.19	-1.55	0.19	-1.65	0.21	-5.90	0.73	-7.55	0.93	-2.21	0.27	-0.10	0.01
		Labour	0.553			11.36	0.36	9.14	0.28	9.21	0.28	11.30	0.34	29.71	0.89	41.02	1.22	13.15	0.39	0.65	0.02
		Toutes interventions de travail du sol	0.354			9.38	0.61	7.98	0.36	7.98	0.36	10.40	0.47	25.35	1.29	35.74	1.73	11.41	0.52	0.61	0.03
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-4.98	0.38	6.36	0.69	7.33	0.42	7.51	0.41	9.45	0.55	16.18	1.55	25.63	2.05	10.73	0.58	0.56	0.03

Tableau G-4 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: scénario général de référence (2)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Labour Occasionnel															ET-Est		ET-Est		
		Part dans la surface de grandes cultures																			
		18.6%																			
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)												Carburant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est			
			Herbicides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est					Total	ET-Est	
		Traitements au glyphosate	-0.091	-3.22	0.33	-1.71	0.04	-0.44	0.01	-0.24	0.01	-0.65	0.02	-5.61	0.32	-6.27	0.33	-0.34	0.01	-0.04	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	0.066			0.17	0.26	0.12	0.20	0.02	0.17	0.15	0.28	0.30	0.61	0.45	0.86	0.02	0.24	0.01	0.02
		Interventions de travail du sol très superficiel	0.109			0.75	0.31	0.36	0.14	0.35	0.14	0.52	0.17	1.46	0.57	1.98	0.74	0.49	0.20	0.03	0.01
		Interventions de travail du sol superficiel	-0.060			-0.50	0.31	-0.32	0.19	-0.35	0.20	-0.32	0.25	-1.16	0.70	-1.49	0.94	-0.49	0.29	-0.02	0.02
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.130			-1.74	0.38	-0.96	0.22	-0.97	0.21	-1.02	0.24	-3.67	0.79	-4.69	1.02	-1.38	0.30	-0.06	0.01
		Labour	0.306			5.22	0.45	4.68	0.34	4.74	0.33	4.81	0.47	14.65	1.09	19.46	1.55	6.78	0.47	0.27	0.03
		Toutes interventions de travail du sol	0.230			3.73	0.67	3.77	0.41	3.78	0.40	3.98	0.56	11.28	1.44	15.26	1.97	5.40	0.57	0.22	0.03
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-3.22	0.33	2.17	0.74	3.44	0.48	3.56	0.44	3.47	0.64	5.94	1.64	9.42	2.24	5.08	0.63	0.19	0.04

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Labour Fréquent															ET-Est		ET-Est		
		Part dans la surface de grandes cultures																			
		33.7%																			
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Fréquent	Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)												Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est			
			Herbicides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est					Total	ET-Est	
		Traitements au glyphosate	-0.044	-1.47	0.08	-0.90	0.02	-0.22	0.00	-0.12	0.00	-0.31	0.01	-2.70	0.09	-3.01	0.09	-0.17	0.00	-0.02	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	-0.021			-0.41	0.43	-0.23	0.27	-0.21	0.21	0.00	0.28	-0.85	0.89	-0.85	1.12	-0.29	0.30	-0.01	0.02
		Interventions de travail du sol très superficiel	0.158			0.26	0.48	0.25	0.20	0.27	0.20	0.33	0.25	0.78	0.85	1.11	1.09	0.39	0.28	0.02	0.01
		Interventions de travail du sol superficiel	0.126			-0.14	0.60	0.01	0.35	0.10	0.36	0.14	0.45	-0.03	1.29	0.11	1.74	0.14	0.51	-0.01	0.04
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.067			-1.20	0.54	-0.54	0.24	-0.54	0.26	-0.57	0.28	-2.28	1.00	-2.85	1.27	-0.77	0.37	-0.03	0.02
		Labour	0.144			3.50	0.87	2.48	0.65	2.59	0.65	3.46	0.77	8.57	2.12	12.03	2.87	3.69	0.93	0.20	0.04
		Toutes interventions de travail du sol	0.340			2.42	1.07	2.20	0.73	2.42	0.71	3.35	0.93	7.04	2.45	10.39	3.34	3.45	1.02	0.18	0.06
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.47	0.63	1.11	1.20	1.76	0.80	2.09	0.75	3.04	0.98	3.49	2.71	6.53	3.63	2.99	1.08	0.15	0.08

Tableau G-4 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: scénario général de référence (3)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Labour Systématique																			
		Part dans la surface de grandes cultures 27.9%																			
		Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)														Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est	
Herbi-cides	ET-Est		Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est	Total	ET-Est							
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	Traitements au glyphosate	-0.027	-1.08	0.08	-0.54	0.01	-0.14	0.00	-0.07	0.00	-0.21	0.01	-1.83	0.07	-2.03	0.08	-0.10	0.00	-0.01	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	-0.071			0.37	0.48	0.35	0.34	0.24	0.28	0.29	0.42	0.97	1.09	1.25	1.45	0.34	0.41	0.02	0.03
		Interventions de travail du sol très superficiel	0.184			-0.41	0.89	0.00	0.39	0.05	0.37	0.07	0.47	-0.35	1.62	-0.28	2.08	0.07	0.52	0.01	0.03
		Interventions de travail du sol superficiel	0.216			0.73	0.91	0.65	0.49	0.66	0.52	0.89	0.63	2.04	1.91	2.93	2.53	0.94	0.74	0.04	0.05
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.008			0.48	0.71	-0.18	0.32	-0.09	0.31	-0.15	0.35	0.20	1.25	0.06	1.59	-0.14	0.44	-0.01	0.02
		Labour	0.012			0.41	0.37	0.64	0.26	0.50	0.23	0.91	0.35	1.55	0.75	2.47	1.02	0.72	0.32	0.05	0.02
		Toutes interventions de travail du sol	0.348			1.21	1.02	1.11	0.65	1.12	0.61	1.73	0.77	3.44	2.15	5.17	2.86	1.60	0.87	0.09	0.05
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.08	0.92	1.04	1.14	1.33	0.74	1.29	0.68	1.81	0.83	2.58	2.50	4.38	3.20	1.84	0.97	0.10	0.06

Tableau G-5 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: scénario général « extrême » (1)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																		
		Semis Direct																		
		Part dans la surface de grandes cultures																		
		1.7%																		
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)												Carburant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est		
			Herbicides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est					Total	ET-Est
	Traitements au glyphosate	-0.340	-10.94	1.36	-6.50	0.42	-1.61	0.09	-0.85	0.05	-2.25	0.13	-19.90	1.51	-22.15	1.59	-1.22	0.07	-0.13	0.01
	Interventions mécaniques sur couvert	0.128			0.80	0.87	0.71	0.61	0.44	0.52	0.58	0.78	1.95	1.95	2.53	2.62	0.63	0.74	0.05	0.05
	Interventions de travail du sol très superficiel	1.865			11.60	0.61	5.88	0.26	6.26	0.25	7.02	0.33	23.74	1.09	30.76	1.41	8.95	0.36	0.42	0.02
	Interventions de travail du sol superficiel	0.522			4.48	0.75	2.77	0.45	2.91	0.46	3.61	0.59	10.17	1.65	13.78	2.22	4.16	0.66	0.24	0.05
	Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.055			1.06	0.42	0.51	0.18	0.52	0.21	0.55	0.23	2.08	0.81	2.64	1.03	0.74	0.31	0.03	0.01
	Labour	1.015			19.11	0.53	14.98	0.60	15.65	0.26	16.92	0.77	49.74	0.91	66.66	1.67	22.35	0.36	0.97	0.05
	Toutes interventions de travail du sol	3.457			36.25	1.12	24.15	0.80	25.34	0.58	28.10	1.14	85.73	2.14	113.83	3.22	36.20	0.83	1.66	0.07
	Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-12.75	1.38	29.48	1.35	22.98	0.89	24.79	0.70	26.06	1.30	64.50	3.08	90.56	4.12	35.41	1.00	1.55	0.08

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																		
		Techniques Culturelles Simplifiées																		
		Part dans la surface de grandes cultures																		
		18.1%																		
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)												Carburant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est		
			Herbicides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est					Total	ET-Est
	Traitements au glyphosate	-0.138	-5.09	0.42	-2.86	0.07	-0.70	0.01	-0.37	0.01	-1.00	0.03	-9.03	0.44	-10.03	0.45	-0.53	0.01	-0.06	0.00
	Interventions mécaniques sur couvert	0.113			0.15	0.29	0.43	0.20	0.28	0.17	0.69	0.26	0.86	0.63	1.55	0.86	0.40	0.24	0.05	0.02
	Interventions de travail du sol très superficiel	-0.062			1.32	0.31	0.62	0.14	0.48	0.14	1.01	0.17	2.43	0.57	3.44	0.73	0.69	0.20	0.06	0.01
	Interventions de travail du sol superficiel	-0.292			-1.01	0.34	-0.83	0.20	-0.93	0.21	-0.91	0.26	-2.77	0.74	-3.68	1.00	-1.33	0.31	-0.05	0.02
	Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.312			-4.70	0.36	-2.39	0.19	-2.52	0.19	-2.66	0.21	-9.61	0.71	-12.27	0.91	-3.59	0.27	-0.16	0.01
	Labour	1.005			19.42	0.17	15.16	0.17	15.72	0.09	17.41	0.29	50.30	0.34	67.71	0.62	22.46	0.13	1.00	0.02
	Toutes interventions de travail du sol	0.337			15.02	0.56	12.56	0.32	12.76	0.30	14.86	0.46	40.35	1.11	55.20	1.53	18.23	0.43	0.86	0.03
	Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-5.09	0.42	12.30	0.64	12.29	0.41	12.67	0.36	14.54	0.59	32.19	1.43	46.73	1.94	18.10	0.52	0.85	0.04

Tableau G-5 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: scénario général « extrême » (2)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Labour Occasionnel																			
		Part dans la surface de grandes cultures 18.6%																			
		Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)														Carburant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est	
Herbicides	ET-Est		Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est	Total	ET-Est							
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	Traitements au glyphosate	-0.092	-2.88	0.15	-1.73	0.04	-0.44	0.01	-0.24	0.00	-0.66	0.02	-5.29	0.17	-5.95	0.17	-0.34	0.01	-0.04	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	0.076			0.40	0.31	0.38	0.22	0.26	0.19	0.40	0.29	1.03	0.70	1.43	0.95	0.37	0.27	0.03	0.02
		Interventions de travail du sol très superficiel	-0.022			1.21	0.36	0.47	0.16	0.39	0.16	0.72	0.21	2.07	0.67	2.79	0.87	0.56	0.23	0.04	0.01
		Interventions de travail du sol superficiel	-0.268			-1.25	0.35	-0.88	0.22	-0.99	0.23	-0.95	0.29	-3.12	0.79	-4.07	1.07	-1.42	0.33	-0.07	0.02
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.237			-3.44	0.42	-1.88	0.24	-1.90	0.22	-2.05	0.25	-7.22	0.85	-9.26	1.10	-2.72	0.31	-0.12	0.01
		Labour	0.731			12.76	0.45	10.39	0.35	10.92	0.31	10.70	0.52	34.07	1.06	44.77	1.57	15.60	0.45	0.61	0.03
		Toutes interventions de travail du sol	0.215			9.29	0.72	8.10	0.48	8.41	0.43	8.43	0.67	25.80	1.56	34.23	2.18	12.02	0.61	0.47	0.04
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-2.88	0.15	8.00	0.80	8.05	0.55	8.44	0.49	8.19	0.75	21.72	1.79	29.91	2.49	12.05	0.70	0.46	0.05

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Labour Fréquent																			
		Part dans la surface de grandes cultures 33.7%																			
		Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)														Carburant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est	
Herbicides	ET-Est		Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est	Total	ET-Est							
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	Traitements au glyphosate	-0.043	-1.49	0.08	-0.89	0.02	-0.22	0.00	-0.12	0.00	-0.31	0.01	-2.72	0.08	-3.03	0.09	-0.17	0.00	-0.02	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	0.030			0.23	0.23	0.25	0.18	0.23	0.15	0.35	0.25	0.70	0.55	1.06	0.77	0.32	0.22	0.02	0.02
		Interventions de travail du sol très superficiel	0.002			0.75	0.30	0.28	0.14	0.21	0.14	0.42	0.18	1.24	0.56	1.66	0.73	0.30	0.19	0.03	0.01
		Interventions de travail du sol superficiel	-0.205			-0.96	0.32	-0.79	0.18	-0.85	0.19	-0.88	0.24	-2.59	0.68	-3.47	0.91	-1.21	0.27	-0.06	0.02
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.107			-1.66	0.28	-0.95	0.19	-0.99	0.17	-1.10	0.22	-3.60	0.62	-4.70	0.83	-1.41	0.24	-0.06	0.01
		Labour	0.421			7.36	0.34	5.92	0.29	6.21	0.26	6.09	0.37	19.48	0.86	25.57	1.22	8.86	0.37	0.35	0.02
		Toutes interventions de travail du sol	0.113			5.49	0.53	4.46	0.34	4.58	0.32	4.53	0.44	14.53	1.14	19.06	1.56	6.55	0.46	0.26	0.03
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.49	0.08	4.87	0.59	4.50	0.40	4.70	0.37	4.59	0.55	12.67	1.32	17.26	1.83	6.71	0.53	0.26	0.03

Tableau G-5 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: **scénario général « extrême » (3)**

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Labour Systématique																			
		Part dans la surface de grandes cultures 27.9%																			
		Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)														Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est	
Herbi-cides	ET-Est		Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est	Total	ET-Est							
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Systématique	Traitements au glyphosate	-0.027	-1.08	0.08	-0.54	0.01	-0.14	0.00	-0.07	0.00	-0.21	0.01	-1.83	0.07	-2.03	0.08	-0.10	0.00	-0.01	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	-0.071			0.37	0.48	0.35	0.34	0.24	0.28	0.29	0.42	0.97	1.09	1.25	1.45	0.34	0.41	0.02	0.03
		Interventions de travail du sol très superficiel	0.184			-0.41	0.89	0.00	0.39	0.05	0.37	0.07	0.47	-0.35	1.62	-0.28	2.08	0.07	0.52	0.01	0.03
		Interventions de travail du sol superficiel	0.216			0.73	0.91	0.65	0.49	0.66	0.52	0.89	0.63	2.04	1.91	2.93	2.53	0.94	0.74	0.04	0.05
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.008			0.48	0.71	-0.18	0.32	-0.09	0.31	-0.15	0.35	0.20	1.25	0.06	1.59	-0.14	0.44	-0.01	0.02
		Labour	0.012			0.41	0.37	0.64	0.26	0.50	0.23	0.91	0.35	1.55	0.75	2.47	1.02	0.72	0.32	0.05	0.02
		Toutes interventions de travail du sol	0.348			1.21	1.02	1.11	0.65	1.12	0.61	1.73	0.77	3.44	2.15	5.17	2.86	1.60	0.87	0.09	0.05
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-1.08	0.92	1.04	1.14	1.33	0.74	1.29	0.68	1.81	0.83	2.58	2.50	4.38	3.20	1.84	0.97	0.10	0.06

Tableau G-5 : Surcoûts moyens estimés pour les interventions de désherbage et de travail du sol: scénario intermédiaire pour les stratégies de travail du sol sans labour (3)

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Semis Direct																			
		Part dans la surface de grandes cultures																			
		1.7%																			
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Occasionnel	Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)												Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est			
			Herbi-cides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est					Total	ET-Est	
		Traitements au glyphosate	-0.365	-12.31	1.84	-7.33	0.41	-1.78	0.07	-0.94	0.04	-2.51	0.12	-22.37	1.95	-24.88	2.02	-1.35	0.05	-0.15	0.01
		Interventions mécaniques sur couvert	0.062			-0.25	0.93	-0.37	0.69	-0.36	0.58	-0.41	0.93	-0.98	2.15	-1.39	3.01	-0.51	0.82	-0.03	0.06
		Interventions de travail du sol très superficiel	1.963			11.43	0.52	5.97	0.25	6.38	0.23	7.11	0.36	23.78	0.95	30.89	1.27	9.11	0.33	0.42	0.02
		Interventions de travail du sol superficiel	0.683			5.56	0.94	3.69	0.57	3.88	0.60	4.98	0.86	13.13	2.10	18.11	2.96	5.54	0.86	0.31	0.06
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	0.272			4.00	0.85	1.95	0.40	2.00	0.39	2.08	0.40	7.95	1.61	10.03	1.99	2.85	0.56	0.12	0.02
		Labour	0.449			11.03	1.61	8.78	1.30	8.44	1.20	12.77	1.82	28.25	3.98	41.01	5.78	12.06	1.71	0.75	0.11
		Toutes interventions de travail du sol	3.368			32.02	2.51	20.40	1.57	20.69	1.56	26.94	2.19	73.11	5.51	100.05	7.65	29.56	2.23	1.60	0.13
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-14.35	1.86	23.23	2.42	17.95	1.51	19.24	1.57	23.60	2.09	46.07	5.13	69.67	7.09	27.48	2.25	1.41	0.13

		Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible																			
		Techniques Culturelles Simplifiées																			
		Part dans la surface de grandes cultures																			
		18.1%																			
Stratégie de travail du sol actuelle avec glyphosate disponible	Labour Occasionnel	Effet du scénario (EMT)	Coûts financiers (€/ha)												Carbu-rant (l/ha)	ET-Est	Main d'œuvre (h/ha)	ET-Est			
			Herbi-cides	ET-Est	Outils	ET-Est	Trac-teurs	ET-Est	Carbu-rant	ET-Est	Main d'œuvre	ET-Est	Total ss MO	ET-Est					Total	ET-Est	
		Traitements au glyphosate	-0.133	-5.26	0.42	-2.86	0.07	-0.71	0.01	-0.37	0.01	-1.00	0.03	-9.21	0.43	-10.21	0.44	-0.54	0.01	-0.06	0.00
		Interventions mécaniques sur couvert	0.020			-0.52	0.31	-0.17	0.22	-0.26	0.18	-0.28	0.28	-0.95	0.69	-1.23	0.93	-0.37	0.26	-0.01	0.02
		Interventions de travail du sol très superficiel	-0.012			0.30	0.29	0.13	0.13	0.10	0.13	0.26	0.16	0.52	0.54	0.77	0.69	0.14	0.19	0.02	0.01
		Interventions de travail du sol superficiel	-0.013			0.58	0.33	0.20	0.20	0.26	0.22	0.27	0.26	1.04	0.74	1.31	1.00	0.37	0.31	0.03	0.02
		Interventions de travail du sol profond, hors labour	-0.079			-1.32	0.48	-0.86	0.22	-0.79	0.23	-0.86	0.25	-2.97	0.89	-3.83	1.13	-1.13	0.33	-0.05	0.01
		Labour	0.320			7.74	0.43	6.15	0.35	5.98	0.33	8.93	0.50	19.87	1.10	28.80	1.59	8.54	0.47	0.52	0.03
		Toutes interventions de travail du sol	0.181			7.31	0.69	5.62	0.45	5.54	0.42	8.59	0.61	18.46	1.50	27.05	2.09	7.91	0.60	0.51	0.04
		Interventions mécaniques et traitements au glyphosate		-5.26	0.42	3.90	0.80	4.73	0.54	4.91	0.49	7.30	0.72	8.24	1.83	15.54	2.51	7.01	0.69	0.44	0.04

Annexe H

Écart entre les données de vente (BNV-D) et les données d'utilisation (enquêtes Pratiques Culturelles)

D'après la BNV-D, 8831 tonnes de glyphosate ont été vendues en 2017 (8712 tonnes en France métropolitaine). Ce chiffre est similaire à celui des années précédentes¹. Si on retire les 1200 tonnes vendues pour usages non agricoles², il en resterait 7631 tonnes pour l'agriculture³. Selon les données des enquêtes pratiques culturelles SSP-MAA publiées par le service de la statistique et de la prospective du MAA (viticulture, arboriculture, grandes cultures, légumes, horticulture, prairies), nous estimons l'utilisation totale à moins de 3000 tonnes pour les 26 millions d'hectares environ que couvre l'ensemble de la superficie agricole utile. Les forêts qui couvrent environ 16 millions d'ha ne reçoivent quasiment pas de glyphosate. L'écart ainsi constaté entre les données de vente et ce cadrage de nos estimations d'usage est important et mérite des investigations complémentaires.

Total glyphosate utilisé en agriculture

		Enquête PK			SAA 2017		
		Quantité	%	Superficie	Superficie France	Total	Total
		utilisée	surface	couverte	métropolitaine	glyphosate	glyphosate
		g/ha	traitée	par	(milliers d'ha)	utilisé en	utilisé en
				l'enquête		tonnes	tonnes
				(milliers		(surfaces	(extrapolé
				d'ha)		couvertes par	sur surfaces
						enquêtes PK)	totales
							(France)
Grandes cultures	PK 2017	832	19%	12800	13222	2013	2079
Prairies	PK 2017	442	0,5%	8600	11370	19	25
Arboriculture	PK 2015	1139	68%	73	179	59	143
Vigne	PK 2016	915	70%	729	788	467	505
Légumes	PK 2013	1185	4,1%	82	264	4	12
TOTAL					25828	2552	2764

Source : D'après nos calculs –source SSP enquêtes PK. L'extrapolation à la surface agricole totale (dernière colonne) est très approximative et n'est indiquée ici qu'à titre indicatif pour obtenir un ordre de grandeur

Documents de références

¹ **Plan de réduction des produits phytopharmaceutiques et sortie du glyphosate** : état des lieux des ventes et des achats en France – CGDD Avril 2019. Essentiel n° 172. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-04/datalab-essentiel-172-plan%20de%20reduction-avril2019.pdf>

² **Les quantités de glyphosate vendues en France**. Fiches thématiques. Rapport sur l'état de l'environnement. <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/pressions-exercees-par-les-modes-de-production-et-de-consommation/usages-de-matieres-potentiellement-polluantes/pesticides/article/les-quantites-de-glyphosate-vendues-en-france>

³ **Note de Suivi 2018-2019 du plan Ecophyto** – Janvier 2020.

<https://agriculture.gouv.fr/telecharger/106541?token=4f4ae92c2619dc6d9eec9dd0c3331f0d>

Ce travail d'expertise a été réalisé à la demande du Premier Ministre, et des Ministres en charge de l'Agriculture et l'Écologie, dans le cadre du plan de sortie du glyphosate. Il vise à fournir à l'Anses des éléments sur les impacts économiques du retrait du glyphosate.

Pour citer ce document :

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huyghe C., *Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique*. 2020, INRAE, 159 pages.

Disponible en ligne :

DOI : <https://doi.org/10.15454/9GV2-3904>