

Les cultures d'automne et les sols argilo-calcaires sont favorables à la mise en œuvre de techniques culturales sans labour

N. Cavan^{*}(1, 2, 3), J. Labreuche⁽²⁾, A. Wissocq⁽²⁾, F. Angevin^(4, 1) et I. Cousin⁽³⁾

- 1) GIS GC HP2E, INRA Transfert, 28 rue du Docteur Finlay, 75015 Paris
- 2) ARVALIS - Institut du Végétal, Station expérimentale 91720 Boigneville - France
- 3) INRA, UR 0272 SOLS, 2163 av. de la Pomme de Pin, CS 40001 Ardon, 45075 Orléans Cedex 2
- 4) INRA, UAR 1240 ECO-INNOV, avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

* : Auteur correspondant : nicolas.cavan@inra.fr

RÉSUMÉ

Les opérations de travail du sol ont une place centrale dans les systèmes de culture, car elles modifient l'état des sols (structure, porosité, répartition des matières organiques, etc.), ce qui a des répercussions nombreuses sur la culture. Les sols ayant une bonne stabilité structurale et une forte capacité de régénération de la structure seraient propices à une conversion aux techniques culturales sans labour (TCSL), à l'inverse des sols dont la structure est plus fragile (texture de l'horizon travaillé sableuse et/ou teneur en matière organique faible), comme l'indiquent des revues bibliographiques ou des méta-analyses de résultats d'essais expérimentaux en Europe sur le travail du sol réduit et le semis direct. Pour vérifier cette hypothèse d'un effet dominant de la nature du sol sur le type de travail du sol adopté en dehors du contexte optimisé d'essais agronomiques et sur une gamme plus large de TCSL, nous avons analysé l'enquête Agreste - Pratiques culturales menée en 2011, qui recense toutes les opérations culturales de la campagne 2010-11. C'est la première de ce type à comporter une information pédologique assez exhaustive, puisqu'elle utilise la typologie de sols « BaseSol » développée par ARVALIS Institut du végétal et porte sur plus de 20.000 parcelles. En analysant les corrélations entre les variables pédologiques « texture de l'horizon travaillé », « hydromorphie », « pierrosité » et le type de travail du sol, nous montrons que la texture de l'horizon travaillé est la variable la plus corrélée au type de travail du sol : les sols de texture limono-argileuse sont corrélés à un usage plus fréquent des TCSL, à l'inverse des sols à texture sableuse ou sablo-limoneuse, plus corrélés à l'usage du labour. Ceci confirme les hypothèses issues de la littérature et nous

Comment citer cet article:

Cavan N., Labreuche J., Wissocq A., Angevin F., Cousin I. - 2018 - Les cultures d'automne et les sols argilo-calcaires sont favorables à la mise en œuvre de techniques culturales sans labour *Etude et Gestion des Sols*, 25, 9-28

Comment télécharger cet article:

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-25/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS : www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/

permet de proposer une typologie de sols uniquement basée sur la texture de l'horizon travaillé, en y incluant un type argilo-calcaire. Nous étudions ensuite la répartition des techniques de travail du sol en fonction des contextes agronomiques et pédologiques selon deux approches : les itinéraires de travail du sol (déterminés par l'opération de travail du sol la plus perturbatrice durant la campagne 2010-2011) et les systèmes de travail du sol (nombre d'années sans labour sur la période 2006-2011). La culture présente en 2010-2011 et la succession des cultures sur la période 2006-2011 sont les deux facteurs les plus corrélés respectivement à l'itinéraire de travail du sol et au système de travail du sol. Malgré la prépondérance du contexte agronomique pour expliquer le travail du sol mis en œuvre, on montre également que des effets pédoclimatiques sont notables : les sols argilo-calcaires sont corrélés à une pratique plus fréquente des TCSL (travail superficiel à très superficiel du sol en 2011, système avec TCSL en continu de 2006 à 2011). En revanche, les effets limitant de certains types de sol sur l'usage des TCSL ne sont pas clairement identifiés lorsque l'on prend en compte le contexte agronomique.

Mots-clés

Pratiques culturales, enquête, travail du sol, contexte pédoclimatique, typologie.

SUMMARY

FALL CROPS AND CALCAREOUS CLAY SOILS ARE SUITABLE FOR NO-PLOUGHING TILLAGE

Tillage operations are crucial in cropping systems, as they change soil properties (structure, porosity, organic matter repartition in soil profile, etc.), with several consequences on crops. Soils with good structural stability and a high capacity for structure regeneration would be suitable for conversion to no-ploughing tillage techniques (NPT), unlike soils whose structure is more fragile (sandy texture of the worked horizon and / or low organic matter content), as indicated by literature reviews or meta-analyses of experimental test results in Europe on reduced tillage and no-till. In order to confirm or withdraw these hypotheses, we analysed the survey led by the French Ministry of Agriculture: Agreste - Enquête pratiques culturales 2011, collecting every operation made during the 2010-2011 crop sequence on more than 20,000 fields. This survey is the first one including comprehensive soil information, collected according to the "BaseSol" soil typology, developed by ARVALIS - Institut du végétal. Correlations between types of tillage and pedological variables « tilled layer texture », « hydromorphic state » & « coarse elements content » were studied. We demonstrated that the highest correlation was found between texture and tillage type: clayey loam soils are correlated to greater use of TCSL, whereas sandy soils are correlated to extended use of ploughing. These results confirmed hypotheses found in literature reviews and meta-analyses and allowed the creation of a simplified typology of agronomic soils, including a calcareous clay soil type. Type of tillage repartition was studied as a function of agronomic and pedoclimatic contexts using two approaches: the tillage method (TM) - described by the most disruptive tillage operation in the 2010-2011 crop sequence - and the tillage system (TS) - determined by the number of years with use of NPT in the 2006-2011 period. The crop type and the crop sequence were respectively the most correlated factors to TM and TS. Although agronomic factors are more important for farmers' tillage choices, significant results were also found on pedoclimatic contexts: calcareous clay soils were correlated to a more frequent use of NPT. On the contrary, the limiting effects of certain soil types on the use of NPT were not clearly identified when agronomic factors are also considered.

Key-words

Agricultural practices, survey, tillage practices, pedoclimatic context, typology.

RESUMEN

LOS CULTIVOS DE OTOÑO Y LOS SUELOS ARCILLO-CALCÁREOS SON FAVORABLES A LA PUESTA EN PRÁCTICA DE TÉCNICAS CULTURALES SIN LABRANZA

Las operaciones de trabajo del suelo tienen un lugar central en los sistemas de cultivo, porque modifican el estado de los suelos (estructura, porosidad, repartición de las materias orgánicas, etc.), lo que condiciona repercusiones numerosas sobre el cultivo. Los suelos que tienen una buena estabilidad estructural y una fuerte capacidad de regeneración de la estructura serían propicios a una conversión a las técnicas de cultivo sin labranza (TCSL), en cambio suelos cuya estructura es más frágil (textura del horizonte arado arenosa y/o pequeño contenido en materia orgánica), como lo indican revisiones bibliográficas o meta-análisis de resultados de ensayos experimentales en Europa sobre el trabajo reducido y la siembra directa. Para averiguar esta hipótesis de un efecto dominante de la naturaleza del suelo sobre el tipo de trabajo del suelo adoptado aparte del contexto optimizado de ensayos agronómicos y sobre una gama más amplia de TCSL, analizamos la encuesta Agreste - Prácticas de cultivo hecha en 2011, que registra todas las operaciones de cultivo de la campaña 2010-11. Es la primera de este tipo que contiene una información pedológica bastante exhaustiva, porque usa la tipología de suelos "BaseSol" desarrollada por ARVALIS instituto del vegetal y incluye más de 20.000 parcelas. Analizando las correlaciones

entre les variables pédologiques “texture del horizonte arado”, “hidromorfia”, “pedregosidad” y el tipo de trabajo del suelo, mostramos que la textura del horizonte arado es la variable la más correlacionada al tipo de trabajo del suelo: los suelos de textura limono-arcillosa se correlacionan a un uso más frecuente de las TCSL, por el contrario de los suelos con textura arenosa o arenoso-limosa, mas correlacionados al uso del laboreo. Esto confirma las hipótesis procedentes de la literatura y nos permite proponer una tipología de suelos únicamente basada sobre la textura del horizonte arado, incluyendo un tipo arcillo-calcaéreo. Estudiamos luego la repartición de las técnicas de trabajo del suelo en función de los contextos agronómicos y pedológicos según dos enfoques: los itinerarios de trabajo de suelo (determinados por la operación de trabajo de suelo la más perturbadora durante la campaña 2010-2011) y los sistemas de trabajo de suelo (número de años sin labranza en el periodo 2006-2011). El cultivo presente en 2010-2011 y la sucesión de cultivos en el periodo 2006-2011 son los dos factores los más correlacionados respectivamente al itinerario de trabajo de suelo y al sistema de trabajo de suelo. A pesar de la preponderancia del contexto agronómico para explicar el trabajo de suelo aplicado, se muestra igualmente que los efectos pedoclimáticos son notables: los suelos arcillo-calcaéreos son correlacionados a una práctica más frecuente de las TCSL (trabajo superficial a muy superficial del suelo en 2011, sistema con TCSL en continuo de 2006 a 2011). En cambio, los efectos limitantes de algunos tipos de suelo sobre el uso de las TCSL no son claramente identificados cuando se toma en cuenta el contexto agronómico..

Palabras clave

Prácticas de cultivos, encuesta, trabajo del suelo, contexto agronómico, tipología.

1. INTRODUCTION

Afin d'être toujours plus performants sur les plans économique, social et environnemental (piliers de la durabilité), les agriculteurs innovent et créent ou adoptent de nouveaux systèmes de culture et de nouvelles pratiques. Le Ministère en charge de l'Agriculture a rendu possible le suivi de ces évolutions en mettant en place une enquête sur les pratiques culturales qui recense de manière exhaustive les itinéraires techniques pratiqués par un échantillon représentatif des agriculteurs de France pendant une campagne culturale, ainsi que les principaux éléments des campagnes précédentes. Après la première enquête pour les grandes cultures en 1994, la répétition de celle-ci tous les cinq ans environ permet de suivre l'évolution des pratiques culturales. L'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011 est la première à comporter également une information sur le type de sol de la parcelle enquêtée, grâce à un croisement avec la base de données pédologique « BaseSol » (ARVALIS - Institut du végétal).

Parmi les pratiques culturales composant un itinéraire technique, les opérations de travail du sol tiennent une place importante, car elles modifient la structure du sol (par fragmentation, déplacement et tassement), la circulation de l'air et l'eau dans celui-ci et la répartition verticale des matières organiques (MO), de la faune, des graines d'adventices, etc. (Roger-Estrade *et al.*, 2014). Ces opérations ont donc des effets sur l'implantation des cultures (notamment sur la qualité du lit de semences - Labreuche *et al.*, 2014) ou sur la minéralisation du carbone et de l'azote (modification des contacts sol-MO, de la disponibilité en eau et oxygène, de la température du sol, etc., Mary *et al.*, 2014). Enfin, le travail du sol est un levier important

pour la gestion de la pression adventice sur une parcelle, notamment par l'enfouissement des graines d'adventices ou la destruction mécanique des plantes levées (Colbach et Vacher, 2014).

Il existe une large gamme d'opérations de travail du sol. La plus commune est le labour, qui se caractérise par un retournement de la couche de sol travaillée. Les techniques sans retournement de la couche de sol travaillée sont regroupées sous le terme Techniques Culturales Sans Labour (TCSL). Ce vocable regroupe ainsi un grand nombre d'opérations, du pseudo-labour (travail profond avec mélange mais sans retournement) au semis direct (semis non précédé d'un travail du sol). Plusieurs opérations de travail du sol sont combinées lors des campagnes culturales : cette combinaison logique et ordonnée, forme un itinéraire de travail du sol. Roger-Estrade *et al.*, (2014) proposent de classer ces itinéraires en se basant sur l'opération de travail du sol la plus profonde. Ce classement permet de différencier les itinéraires de travail du sol d'un point de vue agronomique (dilution du carbone et des éléments minéraux dans le profil, localisation et mélange des MO dans le sol et fragmentation possible en profondeur ou non) et d'un point de vue économique (consommation de carburant et temps de travail pour l'agriculteur).

De nombreux agriculteurs diversifient les itinéraires de travail du sol au cours de leur succession culturale : Labreuche *et al.*, (2016) indiquent que 46 % des surfaces en grandes cultures ont été conduites avec une alternance entre labour et TCSL entre 2006 et 2011 (40 % de surfaces en labour systématique et 13 % en TCSL systématiques sur la même période). Ils adoptent ainsi des systèmes de travail du sol différents sur une période de six ans, ceux-ci pouvant avoir des effets à long

terme sur le système de culture. L'adoption en continu de TCSL, après une période de transition de quelques années, a un effet négatif ou nul sur la production des cultures : en se basant sur l'enquête Agreste - Pratiques Culturelles 2006, Chenu *et al.*, (2013) estiment une baisse de rendement de 0 à -5 % pour un passage du labour au semis direct. Van den Putte *et al.*, (2010) obtiennent des résultats similaires (-4,5 %) en faisant une méta-analyse de résultats d'essais sur les TCSL (travail du sol réduit et semis direct) à l'échelle européenne. Dans ces deux études (pratiques d'agriculteurs ou résultats d'essais expérimentaux), la perte de rendement lors d'un passage aux TCSL varie fortement selon les cultures. Elle dépend également des conditions pédoclimatiques. Van den Putte *et al.*, (2010) observent une perte de rendement de 15 % sur les sols « sableux » (sol avec un horizon travaillé de texture « sand », « loamy sand » et « sandy loam » de la classification USDA). Boizard *et al.*, (2014) indiquent que la stabilité structurale de ces sols est plus faible, du fait de la faible quantité de ciments minéraux qu'ils contiennent (argile, oxydes, calcium). Un sol hydromorphe peut également limiter les performances d'un système de culture avec un travail du sol très superficiel (Labreuche *et al.*, 2014) ou en semis direct (Soane *et al.*, 2012). A l'inverse, Soane *et al.*, (2012) indiquent que les sols argilo-calcaires, caractérisés par une forte capacité de restructuration par fissuration due au climat (« self-mulching ») seraient favorables à la pratique du semis direct. Peigné *et al.*, (2007) indiquent néanmoins que les diminutions de rendement en TCSL diminuent avec la profondeur du travail du sol, et que l'usage de TCSL profondes peut permettre de ne pas recourir au labour en limitant les pertes de rendement sur des sols *a priori* défavorables à ces techniques.

Tableau 1 - Variables et modalités de ces dernières utilisées pour distinguer les sols de la base BaseSol. Source : ARVALIS - Institut du végétal. A : argile (granulométrique). S : sable (granulométrique). EG : éléments grossiers. Calcaire : teneur en calcaire (CaCO₂) totale. A ces variables s'ajoute le nom vernaculaire du sol dans chaque région, ce qui a notamment permis de distinguer la classe des sols argilo-calcaires.

Table 1 - Variables and categories used to define the soils from the BaseSol. Source: ARVALIS – Institut du vegetal.

A: clay (granulometry). S: sand (granulometry). EG: coarse elements. Calcaire: lime content (CaCO₃). A usual name of each soil (defined for each administrative region) is added as the last qualitative variable describing a soil, allowing us to create a type of soil for "calcareous clay".

Variables	Modalités	Seuils
profondeur	<i>superficiel</i>	< 40 cm
	<i>moyen</i>	40 cm < sol < 80 cm
	<i>profond</i>	> 80 cm
texture de l'horizon travaillé	<i>argileux</i>	> 30 % A ou > 25 % A et > 55 % S
	<i>limono-argileux</i>	< 55 % S et 18 % < A < 35 %
	<i>limoneux</i>	< 55 % S et < 18 % A
	<i>limono-sableux</i>	15 % < S < 55 % et < 18 % A
	<i>sablo-limoneux</i>	> 55 % S et < 15 % A
	<i>sableux</i>	> 55 % S et < 25 % A
pierrosité	<i>non caillouteux</i>	volume EG < 5 %
	<i>peu caillouteux</i>	5 % < volume EG < 15 %
	<i>caillouteux</i>	volume EG > 15 %
hydromorphie	<i>non hydromorphe</i>	aucune trace ou > 60 cm prof.
	<i>hydromorphe</i>	traces < 60 cm prof.
classification calcaire	<i>non calcaire</i>	calcaire < 5 % masse sol
	<i>calcaire</i>	calcaire > 5 % masse sol

Dans ce contexte, le travail présenté dans cet article a pour objectif d'analyser les pratiques de travail du sol en fonction du contexte agronomique et pédoclimatique, et notamment de tester les hypothèses suivantes : i) les sols argilo-calcaires seraient favorables au développement des TCSL ; ii) les sols peu riches en matières organiques et présentant une faible stabilité structurale ainsi que les sols hydromorphes seraient défavorables au développement des TCSL. Cette analyse s'appuie sur l'enquête Agreste-Pratiques culturelles 2011.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Données disponibles dans l'enquête Agreste - Pratiques culturelles 2011

L'enquête Agreste - Pratiques culturelles 2011 portait sur 20 827 parcelles de grandes cultures (hors prairies). Parmi les informations collectées sur ces dernières, nous utilisons les suivantes :

- la localisation géographique, renseignée à l'échelle de la commune dans l'enquête.
- le type de sol, décrit selon la typologie agronomique en vigueur dans BaseSol - ARVALIS - Institut du végétal. Cette base comprend la description de 175 types de sols présents sous grandes cultures et elle est régionalisée : 5 à 40 types de sols

1 <https://plateforme.api-agro.fr/explore/dataset/referentiel-sol-arvalis-2017/>, consulté le 21/08/2017. Cette typologie agronomique de sols est également décrite brièvement dans Bouthier *et al.*, (2017).

sont définis par région administrative, permettant d'identifier plus facilement un type de sol lors d'enquêtes. Les types de sol sont qualifiés par un nom vernaculaire et cinq variables discrètes (*texture de l'horizon de surface, profondeur, pierrosité, hydromorphie, classification calcaire*) dont les modalités sont présentées dans le *tableau 1*. Concernant la variable *texture de l'horizon de surface*, sa définition en six classes est issue d'un regroupement des classes du triangle de texture de l'Aisne 15 classes (A. Bouthier, communication personnelle).

- La culture implantée, parmi lesquelles nous étudions les principales grandes cultures en France : blé tendre, maïs grain, colza, orges d'hiver et de printemps, maïs fourrage, tournesol, blé dur, triticale, betterave sucrière, pomme de terre, pois d'hiver et de printemps.
- Une information sur le type de travail du sol. Pour la campagne culturale 2010-2011, cette information est complète et permet de définir des itinéraires de travail du sol (partie 2.3). Pour les cinq campagnes culturales dans la période 2006-2010, cette information est synthétique: labour ou TCSL.

2.2. Conditions d'utilisation des données de l'enquête Agreste -Pratiques Culturelles

L'accès aux données de l'enquête Agreste-Pratiques Culturelles 2011 est soumis au secret statistique. De ce fait, les résultats sur un groupe de parcelles enquêtées sont disponibles si,

et seulement si : i) le groupe comporte au moins trois parcelles enquêtées ; ii) la surface d'une parcelle ne représente pas 85 % ou plus de la surface totale du groupe, après redressement statistique. Ce redressement statistique est nécessaire pour extrapoler les résultats sur les surfaces françaises en grandes cultures à partir de la surface des parcelles enquêtées (Agreste, 2014). En raison de ce redressement, il est de plus recommandé de ne prendre en compte que les résultats concernant des groupes de 30 parcelles ou plus. Pour analyser nos résultats, nous avons défini des typologies de travail du sol (les itinéraires et les systèmes de travail du sol - partie 2.3) et des typologies des facteurs décrivant, avec la culture implantée, le contexte agronomique et pédoclimatique de chaque parcelle (précédent cultural, succession, type de sol, localisation géographique - partie 2.4). La répartition des surfaces par itinéraires et systèmes de travail du sol a été étudiée en fonction de ces deux typologies de facteurs.

2.3. Objets de l'étude

Afin d'étudier la répartition des surfaces en grandes cultures en fonction du type de travail du sol, nous analysons deux objets :

- Les **itinéraires de travail du sol**. Ils décrivent la succession des opérations de travail du sol au cours de l'année culturale et sont déterminés par l'opération de travail du sol la plus perturbatrice et profonde, selon la typologie définie par Roger-Estrade et

Figure 1 - Définition des opérations de travail du sol à partir des données de l'enquête Agreste – Pratiques culturales 2011 (d'après Roger-Estrade et al., 2014). Ces opérations seront utilisées pour définir les types d'itinéraires de travail du sol (sur la campagne culturale 2010-2011).

Figure 1 - Definition of tillage operations with data from the survey "Agreste – Pratiques culturales 2011" (based on Roger-Estrade et al., 2014). These tillage operations are used to define tillage methods for the 2010-2011 cultural campaign.

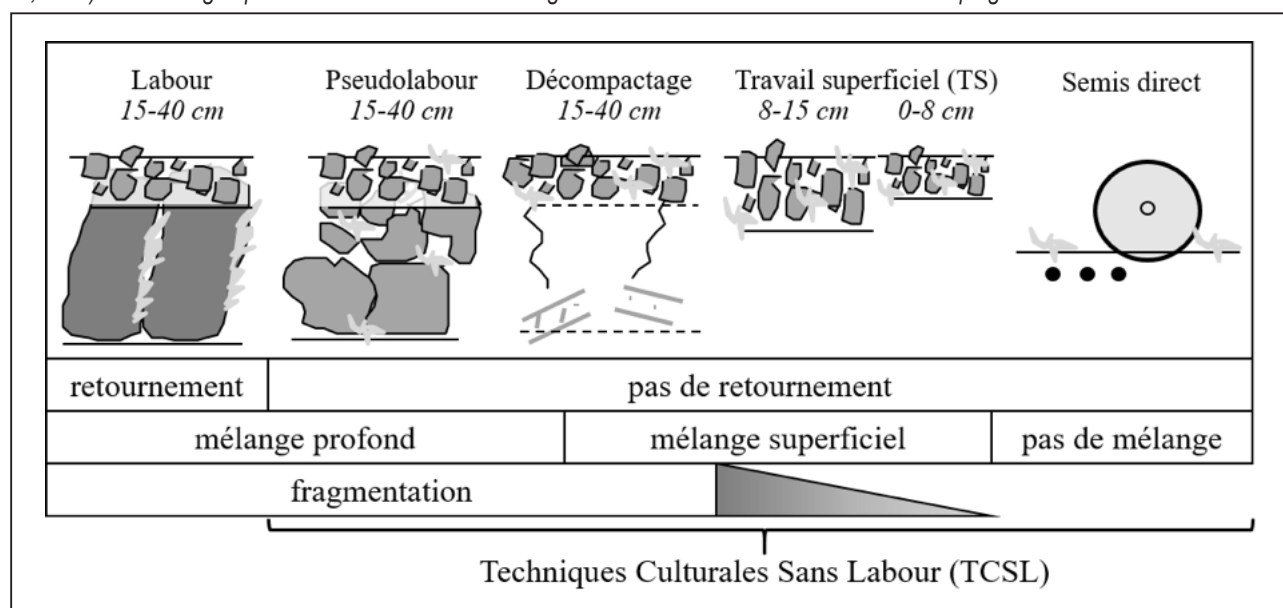
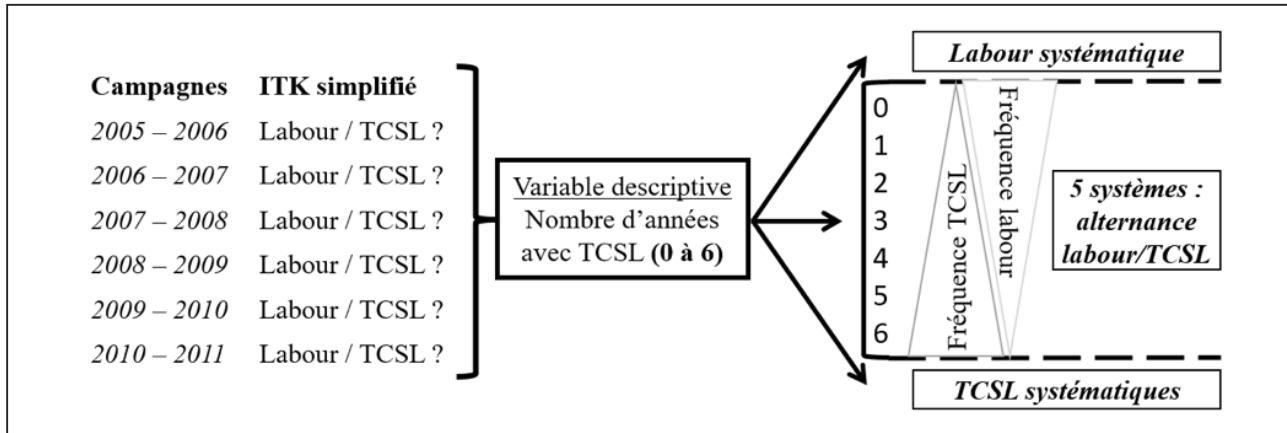


Figure 2 - Définition des systèmes de travail du sol, à l'aide d'une variable: le nombre d'années avec TCSL sur la période 2006-2011 (six campagnes culturales). Sept systèmes sont définis : le labour systématique, cinq systèmes d'alternance entre labour et TCSL, et l'usage de TCSL systématique. ITK : itinéraire de travail du sol.

Figure 2 - Definition of tillage systems, using one variable: the number of years with no-ploughing tillage (NPT) during the 2006-2011 period (six cultural campaigns). Seven systems are defined: all-ploughing system, five systems mixing ploughing and no-ploughing, and all-NPT system. ITK simplifié: simplified typology of tillage methods (ploughing or NPT).

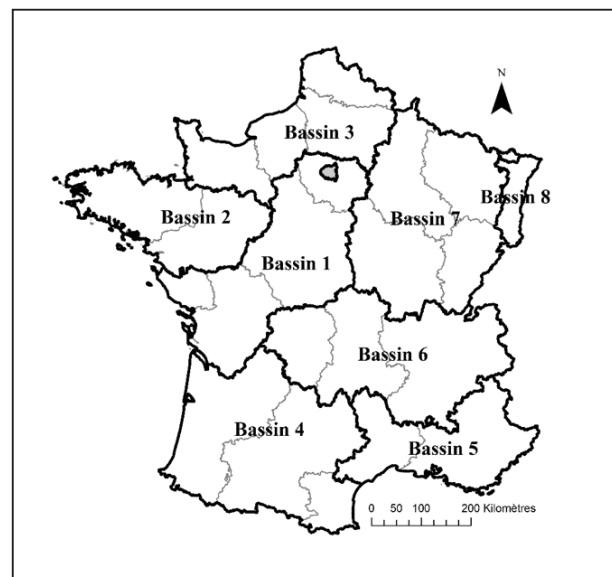


al., (2014) (figure 1). Les itinéraires avec labour incluent au moins un passage de charrue à versoir pendant l'année (retournement de l'horizon de sol travaillé). Les autres itinéraires font partie des TCSL, même si les opérations les plus perturbatrices permettant la description des itinéraires sont très différentes entre elles (cf. figure 1). Pour les opérations de travail superficiel, l'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011 distingue deux classes, selon la profondeur de travail du sol : une classe pour un travail sur la couche 0-8 cm, et une classe pour un travail sur la couche 8-15 cm. En revanche, il n'y a pas suffisamment de parcelles dans cette enquête avec une pratique d'un travail du sol en bandes (strip-till) pour étudier un itinéraire où cette opération serait la plus perturbatrice.

- Les **systèmes de travail du sol**, déterminés par l'historique de travail du sol entre 2006 et 2011. Pour chacune des années de cette période, deux itinéraires synthétiques ont été définis : labour ou TCSL (l'information disponible dans l'enquête Agreste - Pratiques Culturales 2011 étant limitée - cf. paragraphe précédent). En y ajoutant l'année 2011, on obtient comme variable descriptive le nombre d'années en TCSL sur la période 2006-2011 (de 0 à 6 années). Il y a ainsi trois types de systèmes de travail du sol : le labour continu (tous les ans pendant six ans), l'alternance entre labour et TCSL (de 1 à 5 années sur six avec un labour) et les TCSL systématiques (aucun labour en six ans).

Figure 3 - Carte des bassins de production en France métropolitaine. Sources: ARVALIS – Institut du végétal & IGN. Bassins définis par regroupement de régions administratives (avant la réforme de 2015). Trois départements sont dans un bassin différent de celui contenant leur région d'origine: la Vendée, les Pyrénées Orientales et l'Aude.

Figure 3 - Map of production areas in metropolitan France. Sources: ARVALIS – Institut du végétal et IGN. Production areas are groups of administrative regions (before 2015 territorial reform). Three departments are in a different production area than their original region: Vendée, Pyrénées Orientales and Aude.



2.4. Création et utilisation de typologies d'analyse

2.4.1. Définition des contextes pédoclimatiques

Il est défini par le croisement du type de sol et du climat. La typologie des types de sol sera présentée au paragraphe 3.1. Pour qualifier le climat, nous utilisons le **découpage géographique en huit bassins de production** développé par ARVALIS - Institut du végétal pour interpréter de précédentes enquêtes (figure 3). Ce découpage géographique a été réalisé principalement selon l'orientation technico-économique majoritaire des exploitations dans ces bassins, les cultures majoritairement présentes et les cultures minoritaires complétant les successions. Les bassins sont majoritairement des regroupements de régions (telles que définies avant 2015), à quelques exceptions près (Vendée, Pyrénées-Orientales et Aude).

2.4.2. Définition des contextes agronomiques

Pour définir le contexte agronomique, nous retenons comme information la culture enquêtée, le précédent cultural et la succession culturale. La liste des cultures enquêtées dans l'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011 n'a pas été simplifiée.

Le **précédent cultural** peut jouer sur le choix de la technique de travail du sol employée avant le semis pour trois raisons principales : i) l'impact du précédent sur la structure du sol (certains précédents à récolte tardive peuvent amener une structure du sol très dégradée); ii) la nature des résidus (en fonction de leur quantité et/ou vitesse de dégradation l'encombrement

de la surface du sol gêne plus ou moins l'implantation) ; iii) la date de récolte (une récolte tardive peut impliquer un semis de la culture suivante dans des conditions moins bonnes, humides par exemple et justifier un travail du sol plus profond pour favoriser le ressuyage du sol).

Une typologie simplifiée de ces précédents a été réalisée par expertise selon les deux derniers critères, permettant de passer de plus de 40 à seulement 10 types de précédents, dont voici la liste : *céréales à paille, maïs grain, maïs fourrage, colza, protéagineux, betterave, pomme de terre, tournesol, prairie, autres*.

La succession culturale est une des composantes du système de culture déterminante pour le type de travail du sol choisi (essentiellement le système de travail du sol). En effet, les plages disponibles pour une opération de travail du sol dépendent de la durée des périodes d'interculture d'une part et, d'autre part, la succession de cultures constitue avec le travail du sol un levier de lutte contre les adventices et les bio-agresseurs. La diversité des périodes de semis et des familles de cultures semées (Atoumani-Ronceux *et al.*, 2011) ainsi que l'insertion de prairies temporaires (Munier-Jolain *et al.*, 2012) favorisent l'effet levier de la succession sur les bio-agresseurs. Les types de succession sont définis à partir de ces éléments, en prenant en compte la culture enquêtée et les cinq cultures précédentes (période 2006-2011). On définit ainsi six types de succession (tableau 2) : prairies, automne - céréales, automne/printemps - céréales, printemps - céréales, automne - céréales/dicotylédones, automne/printemps - céréales dicotylédones.

Pour environ 3500 parcelles (représentant 13 % des surfaces enquêtées), aucun type de succession n'a été déterminé : lors de

Tableau 2 - Définition des types de successions culturales (sur la période 2006-2011) et nombre de parcelles enquêtées par succession. Pour définir la typologie des successions, les céréales comprennent les céréales à paille, le maïs grain et le maïs fourrage. Les successions à dominante dicotylédones (colza, tournesol, pois, pomme de terre, betterave) sont très peu nombreuses (6 parcelles enquêtées uniquement) et n'ont pas été retenues pour la typologie des successions. Il en est de même pour le type de succession avec une dominante printemps avec alternance céréales / dicotylédones (effectif en gris). Lorsqu'une succession contient deux cultures ou plus non renseignées dans l'enquête et/ou qui ne sont ni des grandes cultures, ni de la prairie / jachère, celle-ci est considérée comme non déterminée (3.530 parcelles). Selon Agreste (2014), les précédents des années 2006 et 2007 sont inconnus pour 8 % des surfaces enquêtées.

Table 2 - Definition of the types of crop succession (2006-11 period) and number of surveyed fields for each type of crop succession. In order to define the typology of crop successions, cereals ("céréales") includes straw cereal, maize and forage corn. Crop successions with a majority of dicotyledonous crops (rapeseed, sunflower, peas, potato, sugarbeet) are very rare (only 6 surveyed fields) and were not used in this study. The same decision was applied to type of crop successions with spring crops mixing cereals and dicotyledonous crops (in grey). A crop succession is considered unknown if it includes two unknown crops or more and/or two crops or more that are not tillage crops or grassland (3.530 fields). According to Agreste (2014), 2006 and 2007 crops are unknown for 8% of total surveyed area.

	Dominante céréales (C) 5 à 6 céréales	Alternance C / Dicotylédones (D) 2 à 4 céréales
Dominante automne (A) 5 à 6 semis en automne	1.514	2.785
Alternance A / P 2 à 4 semis en automne	3.831	4.634
Dominante printemps (P) 0 à 1 semis en automne	1.358	188
Dominante prairies/jachères 3 à 6 années prairies/jachère	2.981	

ces enquêtes, au moins deux précédents sur six n'ont pas été renseignés et/ou sont des précédents autres que des grandes cultures (vignes, vergers, légumes, productions horticoles essentiellement). Selon Agreste (2014), les parcelles avec au moins les précédents 2006 et 2007 inconnus représentent 8 % des surfaces enquêtées. Pour cette raison, commenter les éventuels résultats sur ce type de succession nous a semblé trop hasardeux.

2.4.3. Conditions d'utilisation des typologies agro-pédo-climatiques

Pour analyser nos données, nous avons respecté les critères décrits au paragraphe 2.2. Cependant, pour étudier la répartition des itinéraires de travail du sol en fonction de quatre facteurs qualitatifs (culture enquêtée, type de précédent, type de sol et bassin de production), nous avons abaissé le seuil de 30 parcelles enquêtées pour constituer un groupe à 26 parcelles seulement, afin d'augmenter le nombre de groupes et donc de parcelles pour l'étude de la répartition des itinéraires (777 parcelles supplémentaires, réparties en 28 groupes). Malgré cela, la perte d'information reste importante pour cette partie de l'analyse : elle représente 44 % des parcelles enquêtées (tableau 3).

De plus, le redressement statistique effectué par Agreste sur les surfaces des parcelles ayant été réalisé pour chaque culture (cf. paragraphe 2.2), il est nécessaire d'utiliser la culture enquêtée comme facteur pour constituer les groupes de parcelles. Si l'effet de la culture doit être exclu de l'analyse, une normalisation des données est réalisée selon ce facteur, avec le calcul suivant :

$$V = v - m_{\text{culture}}$$

(V : variable normalisée ; v : variable d'origine ; m_{culture} : moyenne de la variable pour une culture enquêtée donnée) ; chaque groupe contient toutes les parcelles définies par la même combinaison de modalités des facteurs qualitatifs étudiés.

Par exemple, pour l'étude des corrélations entre variables pédologiques et itinéraire de travail du sol, les facteurs qualitatifs sont la culture enquêtée, la texture de l'horizon travaillé (quatre classes), la pierrosité et l'hydromorphie. Ainsi, toutes les parcelles de blé tendre d'hiver enquêtées avec un type de sol décrit par une texture de l'horizon travaillé « limono-argileuse », une pierrosité « faible » et considéré comme « non hydromorphe » sont placées dans un même groupe. Les variables quantitatives pour décrire le groupe sont la part de la surface agricole utile du groupe où chaque itinéraire de travail du sol a été utilisé pour l'implantation de la culture enquêtée (cf. paragraphe 2.1). Il y a donc quatre variables qualitatives (facteurs) et six variables quantitatives pour décrire chaque groupe de parcelles. Pour cette analyse, comme l'effet de la culture doit être écarté afin d'étudier les corrélations uniquement avec les variables pédologiques, chaque variable quantitative est normalisée par culture enquêtée, selon la méthodologie décrite dans le paragraphe précédent.

2.5. Analyses statistiques

Les résultats présentés ici sont principalement obtenus par Analyses en Composantes Principales (ACP), en association avec la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), en utilisant le logiciel R et le package FactoMineR (version 1.28, publiée le 26/09/2014. Référence : Lê et al., 2008).

Chaque variable quantitative utilisée dans une ACP est préalablement centrée et réduite. La réduction permet d'accorder une importance identique à chaque variable quantitative dans l'étude d'une part, et de sélectionner les composantes d'intérêt de l'ACP pour réaliser la CAH d'autre part. En effet, si la variance d'une composante est supérieure à 1 - i.e. supérieure à la variance d'une variable centrée réduite - alors cette composante apporte plus d'information que cette variable : elle est d'intérêt.

Tableau 3 - Effectifs en nombre de groupes et en nombre de parcelles et perte d'information pour chaque étude réalisée par ACP et CAH. Un groupe de parcelles contient toutes celles ayant la même combinaison de modalités des facteurs qualitatifs étudiés. Il constitue un individu de l'ACP. La perte d'information est exprimée en pourcentage du nombre de parcelles total.

Table 3 - Number of surveyed fields & groups of fields and data loss for each performed PCA and AHC. A field group is made of all surveyed fields with identical category for each one of qualitative variables. It represents one individual in the PCA. Data loss is expressed as a percentage of the total number of surveyed fields.

Etude réalisée	Facteurs qualitatifs	Nombre groupes	Nombre parcelles	Perte d'information
Surfaces par itinéraire de travail du sol en fonction des variables pédologiques	Texture de l'horizon travaillé (en 6 classes), pierrosité, hydromorphie	94	15.124	28 %
Surfaces par itinéraires de travail du sol en fonction des variables pédologiques	Texture de l'horizon travaillé (en 4 classes), pierrosité, hydromorphie	100	19.023	9 %
Surfaces par itinéraires de travail du sol	Culture, précédent, type de sol, bassin	194	11.718	44 %
Surfaces par systèmes de travail du sol	Succession, type de sol, bassin	127	14.304	31 %

La description des composantes de l'ACP est utilisée et repose sur les éléments suivants :

- Un coefficient de corrélation (Pearson) est calculé entre chaque variable et les composantes de l'ACP.
- Chaque individu est décrit par une coordonnée sur toutes les composantes de l'ACP. A partir de cette donnée, deux éléments sont déterminés : i) la contribution d'un individu à la formation d'une composante ; ii) l'effet d'un facteur qualitatif sur les coordonnées des individus sur une composante (utilisation de la statistique F de Fisher) ;

Pour la CAH, le nombre de classes pour décrire la variabilité des individus est fixé automatiquement (FactoMineR, documentation v 1.28), entre un minimum fixé à 3, et un maximum entre 5 et 8, en fonction du nombre d'individus (les groupes de parcelles).

Chaque classe formée est décrite selon deux tests statistiques (FactoMineR, documentation v 1.28) :

- Le premier indique une sur-représentativité ou sous-représentativité significative d'une modalité d'un facteur qualitatif au sein de la classe ;
- Le second indique si la valeur des variables quantitatives est significativement différente dans la classe de la valeur moyenne pour l'ensemble des individus étudiés (test t de Student).

En complément à ces deux tests, l'utilisation d'un troisième test suivant une loi du χ^2 permet d'identifier les cas où un facteur qualitatif et la répartition en classes (qui est une variable qualitative) sont liés.

3. RÉSULTATS

3.1. Détermination des type de sols à partir de la BaseSol (ARVALIS - Institut du végétal)

La base de données BaseSol d'ARVALIS - Institut du végétal comprend la description de 175 sols de grandes cultures, décrits sur la base des caractéristiques suivantes : profondeur (trois classes), texture de l'horizon travaillé (6 classes), pierrosité (trois classes), hydromorphie (deux classes), état calcaire ou non (deux classes) (*tableau 1*). En raison des conditions d'utilisation des données d'enquête évoquées précédemment (partie 2.4.3), il est nécessaire de définir une typologie de sols afin de regrouper les sols décrits dans la BaseSol d'ARVALIS - Institut du végétal.

Choix des variables d'intérêt - La méta-analyse de Van den Putte *et al.*, (2010) indique que les sols sableux ou sablo-limoneux sont *a priori* peu propices aux TCSL (travail du sol réduit ou semis direct - cf. *figure 1*) car la perte de rendement y est plus élevée. Van den Putte *et al.*, (2010) indiquent également

que les pertes de rendement sont réduites pour des contextes climatiques plus secs (l'Espagne notamment), en comparaison au Nord-Ouest de l'Europe avec un climat plus humide. Soane *et al.*, (2012) font le même constat pour le semis direct, et précisent que les sols hydromorphes sont *a priori* peu propices au semis direct. Les variables texture de l'horizon travaillé et hydromorphie semblent ainsi *a priori* être les plus importantes pour créer une liste de type de sols. Par ailleurs, la pierrosité (définie en deux classes : sols non / peu caillouteux et sols caillouteux) a été prise en compte car elle représente une contrainte pour les opérations de travail du sol lorsque le pourcentage d'éléments grossiers est élevé (Gras, 1994). Cette contrainte peut conduire à limiter voire arrêter le travail du sol : Soane *et al.*, (2012) indiquent comme avantage possible du semis direct l'absence de remontée d'éléments grossiers en surface. La variable profondeur n'a pas été retenue afin de limiter le nombre de types de sol, ce qui est nécessaire pour pouvoir exploiter les données de l'enquête. Cette variable présente une certaine redondance avec la pierrosité (les sols profonds sont très majoritairement non caillouteux, quand les sols superficiels le sont). Les exceptions à ce constat représentent un peu moins de 5 % des surfaces enquêtées par Agreste en 2011.

Corrélations entre variables texture, pierrosité et hydromorphie et l'itinéraire de travail du sol - Ces corrélations ont été étudiées par Analyse en Composante Principale (ACP) puis Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) en deux étapes.

- Une première ACP (non montrée ici) indique uniquement une corrélation entre itinéraires de travail du sol et texture (en 6 classes) de l'horizon travaillé. Elle s'appuie sur un échantillon de 15.124 parcelles regroupées en 94 groupes, chaque groupe constituant un individu de l'ACP (*tableau 3*). On constate que la texture de l'horizon de surface (en six classes) explique 16 % de la variabilité de la première composante de l'ACP : les textures limono-argileuses et limono-sableuses sont corrélées à une plus grande pratique des TCSL (tous itinéraires confondus). La CAH indique quant à elle une proportion plus importante de labour pour les parcelles avec un horizon travaillé sablo-limoneux.

- Une deuxième ACP a été réalisée avec une texture définie en quatre classes (regroupement des textures limoneuses et limono-sableuses, ainsi que des textures sableuses et sablo-limoneuses), afin d'augmenter le nombre de parcelles enquêtées utilisables, et éventuellement d'obtenir une corrélation entre travail du sol et les deux autres facteurs (pierrosité et hydromorphie). On obtient ainsi un échantillon de 19023 parcelles regroupées en 99 groupes (*tableau 3*). Si la variable texture reste la variable la plus corrélée aux itinéraires de travail du sol (15 % de variabilité expliquée sur la première composante - cf. *figures 4*), les variables pierrosité et hydromorphie sont également corrélées aux itinéraires de travail du sol, mais uniquement sur la troisième composante de l'ACP. La pierrosité et l'hydromorphie expliquent

respectivement 7 et 8 % de la variabilité de cette composante (tableau 4). Les modalités « caillouteux » et « non hydromorphe » (tableau 1) sont corrélées à l'usage du semis direct ou de TCSL très superficielles (0-8 cm). A l'inverse, les modalités « non ou peu caillouteux » et « hydromorphes » sont corrélées à l'usage de TCSL profondes (pseudolabour et décompactage), mais pas au labour.

Création d'une typologie de sols et caractérisation de cette typologie - La texture de l'horizon travaillé est le principal facteur conservé pour la description des types de sol, avec quatre classes de texture : argileuse, limono-argileuse, limoneuse ou limono-sableuse, sableuse ou sablo-limoneuse. Pour les textures limoneuses et limono-sableuses, le nombre de parcelles enquêtées avec un sol hydromorphe est suffisamment important *a priori* pour pouvoir prendre en compte l'hydromorphie dans la description des types de sol. Enfin, le caractère argilo-calcaire d'un sol est quant à lui identifié par expertise en utilisant le nom vernaculaire renseigné dans la BaseSol. Les sols ainsi identifiés ont un horizon travaillé de texture limono-argileuse ou argileuse et sont quasiment tous classés comme « calcaire » (selon la définition utilisée dans la BaseSol - cf. tableau 1).

L'ensemble des types de sol déterminés et de leurs caractéristiques est regroupé dans le tableau 4 : on obtient donc 6 types de sol dont un sol calcaire, de texture limono-argileuse ou argileuse, (ci-après appelé « type de sol argilo-calcaire ») et un sol hydromorphe, de texture limoneuse ou limono-sableuse (ci-après appelé « type de sol limoneux-sableux hydromorphe »).

La répartition des surfaces de chaque bassin de production (à l'exception du bassin 5 présentant des surfaces en grandes cultures trop faibles) par type de sol est présentée dans la figure 5. Si chaque type de sol est présent dans tous les bassins de production, les proportions peuvent fortement différer entre bassins. Ainsi, les bassins 4 et 7 présentent une forte proportion de types de sol argilo-calcaires (plus de 40 % de leurs surfaces) alors que les bassins 2 et 3 sont plus caractérisés par des sols avec un horizon travaillé de texture limono-argileuse ou limoneuse (60 à 80 % de leurs surfaces respectives). Les types de sol limoneux-sableux hydromorphes sont présents dans tous les bassins, mais très peu représentés dans le bassin 3 et le bassin 7. Le bassin 1, qui a la SAU la plus importante, semble le plus « équilibré » en termes de surfaces par types de sol.

3.2. Proportion des surfaces en TCSL en 2011

Le tableau 5 présente la part des surfaces en TCSL en 2011 pour chaque contexte pédo-climatique (type de sol * bassin de production). On peut constater que les sols argilo-calcaires sont ceux où les TCSL sont le plus fréquemment pratiquées (47 % des surfaces, contre 32 % tous sols confondus), à l'inverse des sols avec un horizon travaillé sableux ou sablo-limoneux où les TCSL sont les moins fréquentes (17 % de TCSL). Les autres types de sol (textures de l'horizon travaillé argileuse, limono-argileuse, ou limoneuse et limono-sableuse avec

Figure 4a et 4b - Analyse en Composantes Principales selon la texture de l'horizon travaillé (4 classes), la pierrosité et le caractère hydromorphe des sols. Normalisation par l'espèce cultivée.

a : cercle des corrélations de l'ACP. Le labour (respectivement les TCSL) est corrélé négativement (respectivement positivement) à la première composante de l'ACP - b : corrélations entre les composantes de l'ACP et les variables pédologiques de la BaseSol retenues (texture de l'horizon travaillé, hydromorphie, pierrosité (2 classes)). ** : p-value < 0,01; * : p-value < 0,05.

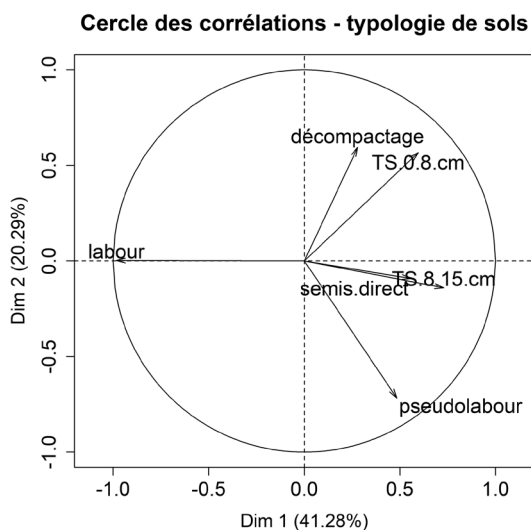


Figure 4a and 4b - Principal Components Analysis with tilled layer texture (4 classes), coarse elements content and hydromorphic state. Crop effects removed from the dataset. a. correlations circle of the PCA. Ploughing (resp. NPT) is negatively (resp. positively) correlated to the first component of the PCA. b: correlations between PCA components and chosen pedological variables of the BaseSol typology (tilled layer texture, hydromorphic state, coarse elements content (2 classes)).

** : p-value < 0.01; * : p-value < 0.05.

Variables	Comp 1	Comp 2	Comp 3
texture	0,15 **		
pierrosité			0,07 *
hydromorphie			0,08 *

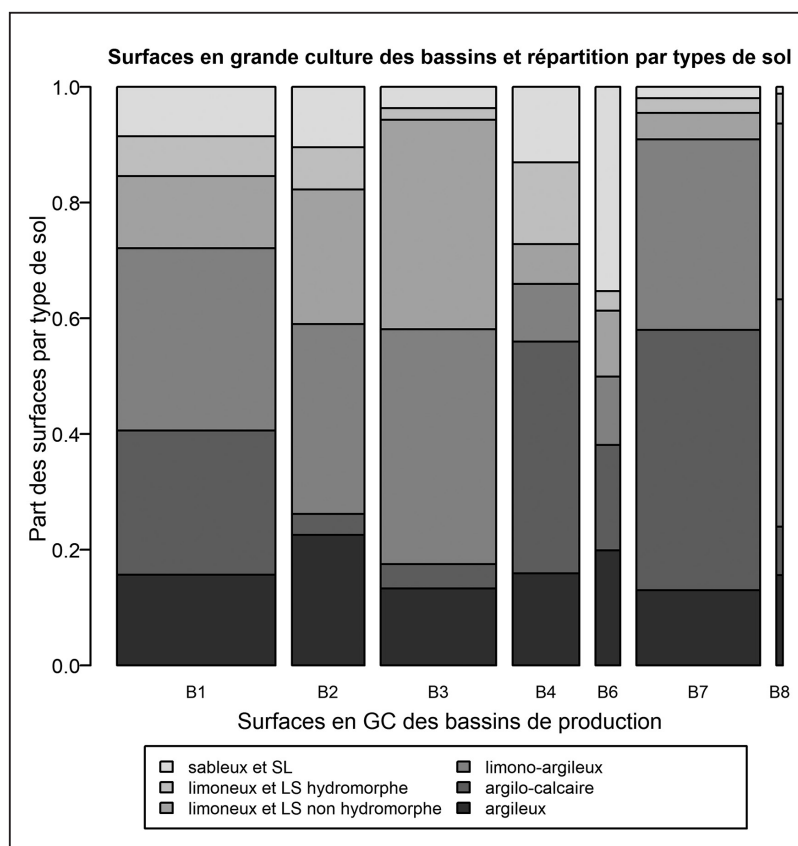
Tableau 4 - Types de sols définis pour le traitement de l'enquête Agreste – Pratiques culturales 2011. Ces types seront désignés dans la suite de l'étude par leurs propriétés, sauf pour le type n°2, qui sera nommé par la suite « argilo-calcaire ».

Table 4 - Soil typology used for the survey "Agreste – Pratiques culturales 2011" data analysis. Types of soil are called by their properties in this article, except for the n°2 type, which will be called calcareous clay ("argilo-calcaire").

Type de sol	Nom du type de sol	Texture de l'horizon travaillé	Hydromorphie	Classification calcaire
1	argileux	argileuse	-	-
2	argilo-calcaire	limono-argileuse ou argileuse	-	calcaire
3	limono-argileux	limono-argileuse	-	-
4	limoneux ou LS non hydromorphe	limoneuse ou limono-sableuse	non	-
5	limoneux ou LS hydromorphe	limoneuse ou limono-sableuse	oui	-
6	sableux ou SL	sableuse ou sablo-limoneuse	-	-

Figure 5 - Répartition des surfaces agricoles utiles de chaque bassin de production en fonction des types de sol. Source: Agreste – Enquête pratiques culturales 2011. Résultats présentés avec les données sur 93 % des surfaces enquêtées. La largeur des colonnes représente la part de la SAU totale enquêtée par un bassin de production. Le bassin 5 n'est pas représenté, les surfaces en grande culture y étant trop faibles. Tous les types de sol sont présents dans chaque bassin. B1 : Centre-Ouest. B2 : Ouest. B3 : Nord. B4 : Sud-Ouest. B6 : Rhône-Alpes & Auvergne. B7 : Nord-Est. B8 : Alsace.

Figure 5 - Repartition of tillage crop surfaces in each production area according to soil typology. Source: Agreste – Enquête pratiques culturales 2011. Results based on 93% of surveyed area. Column width represents percentage of French tillage crop surfaces in each production area. Production area n°5 is not represented because of too few tillage crop surfaces. All types of soil exist in each production area. B1: Center-West. B2: West. B3: North. B4: South-West. B6: Rhône-Alpes and Auvergne regions. B7: North-East. B8: Alsace.



et sans hydromorphie) présentent une part des surfaces en TCSL légèrement inférieure à la moyenne nationale (entre 27 et 30 %). Enfin, pour le type de sol limono-sableux hydromorphe identifié dans la typologie, la part de TCSL est un peu plus faible : 25 % en moyenne, mais avec de fortes disparités entre les bassins de production. En effet, pour trois des quatre bassins de production pour lesquels l'information est disponible pour les types de sol limono-sableux sains et hydromorphes,

la proportion de surfaces en TCSL est plus faible lorsque le type de sol est hydromorphe (entre 0 et 15 % des surfaces) que lorsqu'il est sain (31 à 36 %), ce qui indiquerait un effet rédhitoire de l'hydromorphie sur l'adoption des TCSL. Cependant, un bassin de production (4 - Sud-Ouest) fait exception : 44 % des surfaces avec le type de sol limoneux-sableux hydromorphe sont en TCSL, contre 20 % des surfaces représentées par un type de sol limoneux ou limono-sableux sain.

Tableau 5 - Part des surfaces implantées en Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) par contexte pédoclimatique (type de sol* bassin de production). Source: Agreste – Enquête Pratiques culturales 2011. Résultats sur 87 % des surfaces enquêtées (les 13 % restant représentant les pertes par secret statistique). En prenant en compte l'ensemble des surfaces représentées par l'enquête, la part des TCSL en 2011 est de 35 %. Le bassin 5 (Sud Est) n'est pas renseigné, car il comporte très peu de surfaces enquêtées en grande culture. s: application du secret statistique. B1: Centre Ouest; B2: Ouest; B3: Nord; B4: Sud-Ouest; B6: Rhône-Alpes Auvergne; B7: Nord Est; B8: Alsace.

Table 5 - Part of surfaces in No-ploughing Tillage (NPT) for each pedoclimatical context (soil type * production area). Source: Agreste – Enquête Pratiques culturales 2011. Results based on 87% of surveyed areas (the remaining 13% represents data loss because of statistical secret). On all surveyed fields in France, NPT represented 35% of tillage crop surfaces in 2011. Production area n°5 is not included, because of too few tillage crop surfaces. s: application of statistical secret. B1: Center-West. B2: West. B3: North. B4: South-West. B6: Rhône-Alpes and Auvergne. B7: North-East. B8: Alsace.

Type de sol	B1	B2	B3	B4	B6	B7	B8	France
argileux	17 %	25 %	21 %	39 %	11 %	44 %	s	27 %
argilo-calcaire	41 %	s	45 %	62 %	18 %	47 %	s	47 %
limono-argileux	35 %	22 %	20 %	23 %	9 %	43 %	7 %	30 %
limoneux ou LS non hydro.	36 %	31%	28 %	20 %	3%	32%	0%	29%
limoneux ou LS hydromorphe	15 %	4 %	s	44 %	s	0 %	s	25 %
sableux ou SL	24 %	21 %	s	10 %	13 %	11 %	s	17 %
Tous types de sol	32 %	24 %	24 %	43 %	12 %	44 %	5 %	32 %

Figure 6a et 6b - Répartition des itinéraires de travail du sol en 2011 en fonction de l'espèce implantée, du précédent cultural, du bassin de production et du type de sol. a : cercle des corrélations de l'ACP. b : corrélations entre les composantes de l'ACP et les facteurs qualitatifs. ACP + CAH réalisées sur 11.597 parcelles enquêtées, réparties en 192 groupes. TS : travail superficiel. Suppression d'un groupe : Blé dur d'hiver, précédent tournesol, sol argilo-calcaire, dans le Sud-Ouest (bassin 4), 15 % des surfaces en semis direct.

*** : p-value < 0,001 ; ** : p-value < 0,01.

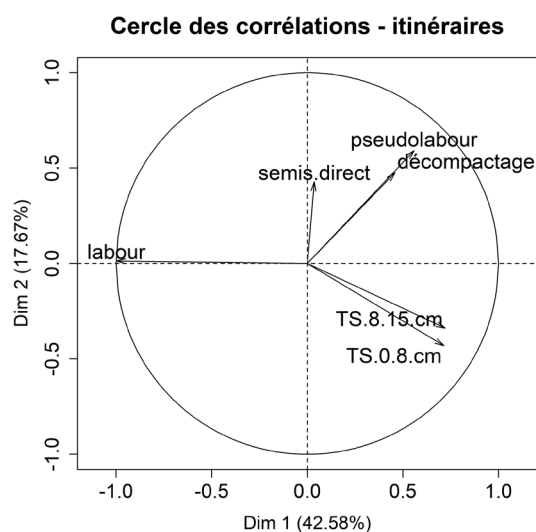


Figure 6a and 6b - Repartition of tillage methods in 2011 as a function of the crop, the previous crop, the production area and the type of soil. a: correlation circle of the PCA. b: correlations between the components of the PCA and qualitative variables. PCA+AHC performed on 11,597 surveyed fields, placed in 192 groups. TS : shallow tillage. One individual was deleted - durum wheat, previous crop sunflower, calcareous clay soil, in the South-West of France (production area 4) - because of a very high proportion of direct drilling (15% of surfaces). ***: p-value < 0.001; **: p-value < 0.01.

Facteur qualitatif	Comp 1	Comp 2
Espèce implantée	0,52 ***	
Précédent	0,16 ***	
Bassin de prod.	0,11 ***	0,13 ***
Type de sol	0,09 **	

Pour un même type de sol, l'adoption des TCSL est donc très dépendante du bassin de production. Cette variabilité est partiellement due aux conditions climatiques spécifiques de ces bassins, mais également à des systèmes de culture différents entre bassins, notamment avec des successions culturales (et donc des espèces cultivées et types de précédent) différentes.

3.3. Analyse des itinéraires de travail du sol en 2011

La répartition des itinéraires de travail du sol a été étudiée en fonction des facteurs suivants : espèce cultivée, précédent-type, ainsi que bassin de production et type de sol. Les données sont disponibles pour 11 178 parcelles, représentant 194 contextes différents (*tableau 3*). Sur l'ACP réalisée, les deux premières composantes sont d'intérêt, l'espèce cultivée expliquant le plus de variabilité sur la composante 1 (52 %) (*figure 6*). Viennent ensuite le type de précédent cultural, le bassin de production et le type de sol. Concernant les types de sol (9 % de variabilité expliquée), les sols argilo-calcaires sont corrélés à la pratique des TCSL.

L'espèce cultivée est le principal facteur corrélé au choix de l'itinéraire de travail du sol, avec un labour privilégié avant les cultures de printemps (maïs et tournesol) et les TCSL pratiquées plus fréquemment avant l'implantation d'une culture d'automne (blé dur, pois d'hiver, colza et blé tendre) (*voir tableau de la CAH en annexe*). Ceci est cohérent avec les résultats généraux de l'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011 : respectivement 18 % et 28 % des surfaces en TCSL pour le maïs et le tournesol, alors que la part de TCSL varie entre 44 % et 58 % pour les cultures d'automne citées. Concernant le précédent cultural, la CAH montre que le colza est corrélé à l'usage de TCSL superficielles (0-8 cm et 8-15 cm), tandis que les précédents céréales à paille sont corrélés à l'usage de TCSL profondes (pseudolabour et décompactage) (*cf. Annexe 1*). Les précédents maïs grain et maïs fourrage sont quant à eux corrélés à l'usage du labour (d'après les corrélations entre les composantes de l'ACP et les modalités des facteurs qualitatifs, non montrées ici).

Concernant les sols, le travail du sol superficiel (0-8 ou 8-15 cm) est plus corrélé aux types de sol argilo-calcaires. Une autre classe déterminée par la CAH est caractérisée par un usage des TCSL avec un travail du sol profond (pseudolabour ou décompactage). Les types de sol limono-sableux hydromorphes y sont surreprésentés. Ce type de sol est représenté uniquement par trois groupes de parcelles, tous situés dans le bassin 4 (Sud-Ouest de la France), où la pratique des TCSL sur ces types de sol est beaucoup plus répandue que dans les autres bassins de production (*cf. tableau 6*).

Enfin, la pratique du semis direct étant peu répandue nationalement, une classe constituée de quatre groupes de parcelles

regroupe les individus avec les plus grandes surfaces en semis direct. Vu le faible nombre de groupes dans la classe, le test statistique utilisé ne permet pas de faire ressortir de facteur sur ou sous-représenté dans cette classe. Par ailleurs, la somme des surfaces en semis direct de ces quatre groupes représente 0,1 % des surfaces nationales, soit presque 20 fois moins que la part réelle du semis direct en France en 2011 (1,7 % selon Labreuche *et al.*, 2016). Cela indique une forte perte d'information par l'application du secret statistique (*cf. paragraphe 2.2*), qui empêche de tirer des conclusions sur les facteurs corrélés positivement ou négativement à l'usage du semis direct.

3.4. Analyse des systèmes de travail du sol (sur la période 2006-2011)

La répartition des systèmes de travail du sol, c'est-à-dire de la succession des itinéraires simplifiés « labour » « TCSL » entre 2006 et 2011, a été étudiée en fonction du type de succession, du type de sol et du bassin de production. L'étude se fait sur 14 304 parcelles, formant 127 groupes, représentant des combinaisons succession * type de sol * bassin de production (*tableau 3*). Les deux premières composantes de l'ACP contiennent toute l'information (*figure 7*). 81 % de la variabilité de la première composante est expliquée par le type de succession, les conditions pédoclimatiques (bassin de production et type de sol) expliquant respectivement 12 et 10 % de la variabilité sur la seconde composante.

La CAH montre qu'il existe une corrélation positive entre les successions à dominante céréales (céréales à paille + maïs) et la pratique du labour systématique (Classe 1 de la CAH) (*tableau 6*).

Les successions à dominante céréales représentent 85 % des groupes de parcelles dans la classe 1 de la CAH. Parmi celles-ci, les successions alternant cultures d'automne et de printemps sont majoritaires (43 % des groupes - par exemple : succession maïs/blé), devant les successions avec dominance des cultures de printemps (26 % des groupes - par exemple la monoculture de maïs) et les successions avec dominance de cultures d'automne (16 % des groupes). La seconde classe déterminée par CAH contient quant à elle des groupes de parcelles où le recours aux TCSL systématiques représente des surfaces deux fois plus importantes qu'en moyenne sur l'ensemble des groupes. Le type de succession majoritaire est une alternance céréales / dicotylédones avec une dominance des semis d'automne : cette succession caractérise 32 % des groupes de la classe 2. Si les successions alternant céréales / dicotylédones et semis d'automne et de printemps tendent à être surreprésentées également (elles représentent 26 % des groupes de la classe, contre 16 % de l'ensemble des groupes de parcelles), ce résultat n'est pas statistiquement significatif. Enfin, les successions de types prairies sont regroupées dans la classe 3, où l'alternance entre labour et TCSL prédomine

Figure 7a et 7b - Répartition des systèmes de travail du sol en fonction du type de succession culturale, du bassin de production et du type de sol. a: cercle des corrélations de l'ACP - b: corrélations entre les composantes de l'ACP et les facteurs qualitatifs. ACP + CAH réalisées sur 14.225 parcelles enquêtées, réparties en 125 groupes. Labour.TCSL : systèmes d'alternance entre labour et TCSL. Suppression d'un individu : succession de type cultures d'automne avec alternance céréales/dicotylédones, sur type de sol argilo-calcaire, dans le Sud-Ouest de la France (bassin 4) : 79 % des surfaces en TCSL systématiques, 21 % en alternance labour/TCSL. *** : p-value < 0,001 ; * : p-value < 0,05.

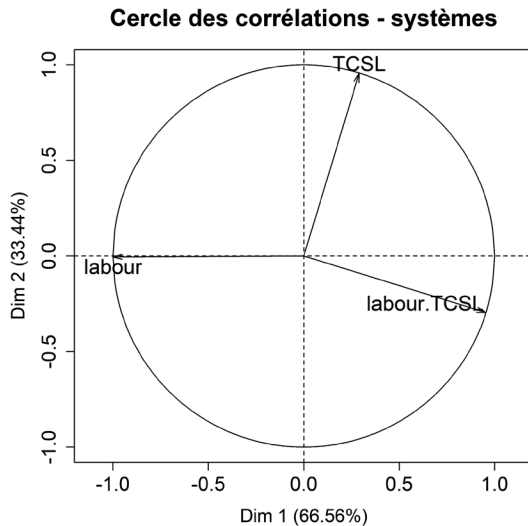


Figure 7a and 7b - Repartition of tillage systems in 2011 as a function of the type of crop succession, the production area and the type of soil. a: correlation circle of the PCA. b: correlations between the components of the PCA and qualitative variables. PCA+AHC performed on 14,225 surveyed fields, placed in 125 groups. Labour.TCSL: all tillage systems mixing ploughing and NPT. One individual was deleted - fall crops with mixed cereal/dicotyledonous crops, calcareous clay soil, in the South-West of France (production area 4) - because of a very high proportion of all-NPT system: 79% of surfaces (remaining 21% are mixing ploughing and NPT). ***: p-value < 0.001; *: p-value < 0.05.

Facteur	Comp 1	Comp 2
succession	0,81 ***	
bassin de prod.		0,12 *
type de sol		0,10 *

fortement (91 % des surfaces des groupes de parcelles en moyenne).

Concernant les sols, les systèmes de travail du sol de type TCSL systématiques (respectivement labour systématique) sont corrélés positivement (respectivement négativement) aux types de sol argilo-calcaires. La CAH indique également que les types de sol argileux sont moins corrélés à l'usage d'un système de travail du sol en TCSL systématique.

Enfin, même si le test de χ^2 entre les classes formées par CAH et le facteur bassin de production n'est pas significatif, certains bassins sont corrélés à un système de travail du sol : le bassin 4 (Sud-Ouest de la France) est corrélé à une pratique accrue des TCSL, à l'inverse du bassin 6 (Rhône-Alpes et Auvergne) où le système des TCSL systématique est moins pratiqué. Une corrélation est également identifiée sur la seconde composante de l'ACP entre la pratique des TCSL systématiques et le bassin 7 (Nord-Est de la France).

4. DISCUSSION

Les pourcentages de surfaces par itinéraires et systèmes de travail du sol de chaque classe formée par ACP et CAH ne peuvent être utilisés que pour des comparaisons qualitatives. En effet, les parcelles non présentes dans ces deux volets de l'étude représentent respectivement 43 et 29 % des effectifs de départ, et ne sont pas supprimées de manière égale entre les

différents itinéraires et systèmes. Les parcelles avec l'itinéraire ou le système de travail du sol majoritaire sont ainsi surreprésentées: pour les itinéraires, le labour représente 77 % des surfaces (contre 64,9 % en moyenne nationale) ; pour les systèmes, l'alternance entre labour et TCSL représente 52 % des surfaces (contre 46 % avec l'ensemble des données de l'enquête).

4.1. Corrélations entre variables pédologiques et itinéraire de travail du sol. Définition des types de sol

L'étude de l'effet des variables qualitatives décrivant les sols de la BaseSol a permis d'indiquer que la texture de l'horizon travaillé est la principale variable corrélée au type de travail du sol², même si cette corrélation reste faible. Les sols de textures sableuse ou sablo-limoneuse sont corrélés à un usage plus important du labour, à l'inverse des sols limono-argileux corrélés aux TCSL (qui contiennent les types de sols argilo-calcaires, supposés favorables à la pratique des TCSL par Labreuche et al, 2007 et à celle du semis direct par Soane et al, 2012).

Nous montrons, en outre, que le caractère hydromorphe d'un sol est corrélé à l'usage de TCSL profondes, à l'inverse des sols sains (non hydromorphes), qui s'avèrent être corrélés à un

² Ici, on rappelle que les données ont été normalisées par la culture observée lors de l'enquête (cf partie 2.4.3).

Tableau 6a et 6b - Répartition des systèmes de travail du sol : description des classes identifiées par la CAH.

a : part des surfaces par système de travail du sol. Moyenne : valeur pour l'ensemble des groupes de parcelles. Classe 1 : valeur moyenne pour les groupes de parcelles de la première classe identifiée. Seules les valeurs significativement différentes de la moyenne sont indiquées. TS : travail superficiel.

b : modalités significativement surreprésentées (et sous-représentées pour les types de sol) dans les classes. Test X^2 : p. value d'un test du X^2 effectué entre le facteur qualitatif étudié et la classification. C/D : céréales/dicotylédones. < sol argileux : le type de sol argileux est sous-représenté dans la classe considérée. argilo-calcaire : le type de sol argilo-calcaire est sur-représenté dans la classe considérée.

Table 6a and 6b - Repartition of tillage systems: description of the clusters identified by AHC.

a: proportion of surfaces by used tillage system. Moyenne: value for all individuals of the PCA+AHC. Classe 1: average value for individuals (groups of fields) belonging to the first cluster ("classe"). Average value for a cluster is shown only if difference between it and average for all individuals is statistically significant.

b: categories overrepresented (and underrepresented for some types of soil) in clusters, with statistical significance. Test X^2 : p-value of the X^2 test performed between qualitative factors and clusters. C/D: cereal/dicotyledonous crops. < sol argileux: the clayey type of soil ("sol argileux") is underrepresented in the considered cluster. argilo-calcaire: the calcareous clay soils ("argilo-calcaire") are overrepresented in the considered cluster.

a. Système	Moyenne	Classe 1	Classe 2	Classe 3
labour systématique	0,39	0,79	0,19	0,07
alternance labour/TCSL	0,52	0,19		0,91
TCSL systématique	0,09	0,03	0,25	0,02

b. Facteur qualitatif	Test X^2	Classe 1	Classe 2	Classe 3
type de succession	3,52E-20	dominante C	automne - C/D	Prairies
type de sol	3,72E-02	< argilo-calcaire	argilo-calcaire < sol argileux	

travail du sol très superficiel ou au semis direct. Ceci est cohérent avec les observations de Soane *et al.*, (2012) pour le semis direct et Labreuche *et al.*, (2014) pour le travail du sol très simplifié. Rappelons cependant que la prise en compte de l'hydromorphie a été privilégiée à la pierrosité, mais n'a pu être étudiée que sur les types de sol dont l'horizon de surface avait une texture limoneuse ou limono-sableuse, car le nombre de parcelles semblait suffisant pour distinguer un type de sol non hydromorphe et un type de sol hydromorphe. Cependant, avec seulement 1 000 parcelles enquêtées présentant un type de sol limoneux ou limono-sableux hydromorphe, très peu de groupes de parcelles ont pu être retenus dans les ACP réalisées (6 groupes sur 194 pour l'analyse sur les itinéraires de travail du sol ; 5 groupes sur 127 pour les systèmes de travail du sol). Concernant les sols à textures sableuses et sablo-limoneuses, les textures sableuses semblaient très faiblement corrélées à un usage accru du pseudo-labour (TCSL profond) à l'inverse des textures sablo-limoneuses corrélées par la CAH à un labour plus présent (données non montrées). Le regroupement de ces deux textures a peut-être limité les corrélations observables entre la nouvelle texture regroupée et les pratiques de travail du sol.

4.2. La répartition des itinéraires de travail du sol est essentiellement corrélée à la culture observée lors de l'enquête

La culture de la campagne 2010-2011 est le principal facteur corrélé aux **itinéraires de travail du sol** pratiqués lors de cette campagne (labour ou TCSL). Les TCSL sont plus fréquemment pratiquées avant des cultures d'automne (particulièrement les céréales à pailles). Ceci est dû à leur développement moins influencé par la qualité de la structure du sol lors du semis, ou par des mécanismes lors de leur développement compensant les pertes à la levée (Labreuche *et al.*, 2014). La corrélation entre l'itinéraire de travail du sol et le précédent cultural est plus faible que celle avec la culture semée ou implantée. On observe en effet que le précédent colza est corrélé aux TCSL et que les précédents maïs grain et maïs fourrage sont corrélés au labour, constats similaires à ceux indiqués par Labreuche *et al.*, (2007). Il faut néanmoins nuancer ce constat en prenant en compte les interactions entre culture observée lors de l'enquête et précédent cultural, ces interactions étant amplifiées par le secret statistique : (i) le colza précède uniquement des cultures de blé tendre

d'hiver et blé dur d'hiver, corrélées positivement à l'usage des TCSL et (ii) 80 % des groupes de parcelles avec un précédent maïs grain ou maïs fourrage sont en monoculture de maïs. En revanche, les précédents céréales à pailles (CAP) ne sont pas corrélés au labour, alors que ces précédents limitent généralement la pratique des TCSL par les résidus laissés (Labreuche et al., 2014). L'absence de résultats concernant ces précédents CAP pourrait être due aux données utilisées : en effet, le précédent CAP représentant le plus de surfaces en France, le secret statistique provoque probablement une surreprésentation de ce dernier (148 groupes de parcelles sur les 194 utilisés pour l'analyse), au détriment de types de précédent moins fréquents. Cependant, les inconvénients imputés aux résidus de culture (réchauffement tardif du sol et retard de semis, propagation de maladies et/ou contact sol-graine difficile au semis) sont dépendants du contexte climatique (notamment des conditions d'humidité au moment du semis), ce qui pourrait expliquer qu'il soit difficile d'établir une corrélation entre type de précédent et itinéraire de travail du sol, toutes conditions climatiques confondues (Morris et al., 2010 ; Soane et al., 2012).

Concernant les conditions pédoclimatiques, les sols argilo-calcaires sont corrélés à un usage plus important des TCSL (plus spécifiquement un travail du sol réduit, superficiel à très superficiel), ce qui confirme l'hypothèse évoquée par Labreuche et al., (2007) sur ces sols qui seraient propices aux TCSL. En effet, leur fort potentiel de rétablissement structural par alternance gel-dégel et humectation-dessiccation (*self-mulching*, indiqué par Soane et al., 2012) en font des sols propices à la mise en place de systèmes de culture en TCSL, jusqu'à un semis direct continu. Néanmoins, cette corrélation positive entre TCSL superficielles et type de sol argilo-calcaire est également partiellement liée à la corrélation positive entre cultures d'automne et TCSL. En effet, les quatre cultures enquêtées avec la part de surface en TCSL la plus importante (dans l'ordre : le blé dur d'hiver, le pois d'hiver, le colza et le blé tendre d'hiver) représentent 57 % des surfaces de ce type de sol, contre 52 % des surfaces en grandes cultures de l'enquête (et 35 % des surfaces de type de sol à texture sableuse ou sablo-limoneuse). En revanche, aucune corrélation négative n'est observée entre les sols à texture sableuse ou sablo-limoneuse et l'usage des TCSL. Cela peut être dû à la définition des types de sol ayant ces textures (cf. paragraphe précédent), à la corrélation plus faible entre travail du sol et contexte pédoclimatique par rapport au contexte agronomique, ou bien à la forte variabilité des effets négatifs attendus d'une conversion aux TCSL sur ces types de sol en fonction des conditions climatiques évoquée plus tôt (Morris et al., 2010 ; Soane et al., 2012). Enfin, l'effet est même inverse à celui attendu pour le type de sol limono-sableux hydromorphe. Cependant, les groupes définis par ce type de sol étaient dans le bassin 4 (Sud-Ouest de la France), dans lequel les TCSL sont plus

pratiquées sur le type de sol limono-sableux hydromorphe que sur son équivalent type de sol sain (*tableau 6*). Plusieurs réserves peuvent être émises quant à ce résultat. i) Seuls 5 groupes de parcelles permettent de décrire les types de sol limono-sableux (hydromorphes ou non) du Sud-Ouest de la France. ii) Dans ce bassin 4, les types de sol limono-sableux hydromorphes sont environ trois fois plus nombreux que les types de sol sains (les sols limoneux étant concentrés dans les grandes vallées alluviales de la Garonne en région Midi-Pyrénées - Guisresse et al., 2011). Ainsi, la perte d'information liée au secret statistique risque d'affecter prioritairement les types de sol limono-sableux sains, spécialement pour les itinéraires de travail du sol les moins répandus (généralement les TCSL). iii) 32 % des surfaces des trois groupes de parcelles avec un type de sol hydromorphe sont semées avec des cultures d'automne, contre 15 % des surfaces des 2 groupes de parcelles avec un type de sol sain, expliquant partiellement la différence observée entre ces deux types de sol par une corrélation avec la culture enquêtée. Néanmoins, le contexte du Sud-Ouest de la France est particulier. En effet, le climat plutôt sec contribue à la limitation des pertes de rendement dues à l'usage des TCSL d'une part (Morris et al., 2010 ; Van den Putte et al., 2010 ; Soane et al., 2012), et d'autre part l'érosion due au travail du sol (principalement au labour avec un sillon dans le sens de la pente) est un problème identifié depuis plus de 20 ans (Guisresse et Revel, 1995), qui a pu favoriser l'adoption des TCSL dans cette région. Malgré les réserves émises, cela indiquerait qu'un sol *a priori* défavorable aux TCSL peut être non labouré, même si l'usage des TCSL dans ces cas précis est souvent ponctuel (le système d'alternance labour / TCSL représente 58 % des surfaces du bassin 4, cette proportion allant jusqu'à 71 % pour les types de sol limoneux et limono-sableux hydromorphes du bassin).

Par ailleurs, la prépondérance de sols de texture limono-argileuse ou argileuse dans le bassin Sud-Ouest (56 % des surfaces en grande culture), avec peu de précipitations entre la récolte et le semis d'une culture d'automne (interculture courte) peut conduire les agriculteurs à ne pas labourer. En effet, en l'absence d'une succession suffisante de cycles humectation/dessiccation, les mottes produites par un labour n'évoluent pas assez rapidement pour un semis d'automne sur des sols dont la teneur en argile est supérieure à 20 % (Labreuche et al., 2014). Cela se traduit par un développement des TCSL important dès 2001, essentiellement pour les cultures semées en automne (85 % des surfaces en blé dur d'hiver en TCSL en Midi-Pyrénées - Chapelle-Barry, 2008) et dans une moindre mesure pour les cultures de printemps (remplacement par un travail du sol profond sans retournement). Cette exception a été observable dans l'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011, sur les types de sol argilo-calcaires : un groupe de parcelles a dû être retiré de l'ACP car sa contribution à la formation des composantes de

l'ACP était trop forte : il s'agit des parcelles blé dur après tournesol dans le bassin 4, avec 100 % des surfaces implantées en TCSL, dont 15 % de semis direct.

Ces éléments (contexte érosif et désagrégation trop lente des mottes produites par le labour) pourraient également expliquer pourquoi un type de précédent *a priori* défavorable pour les TCSL (les CAP) sont corrélés dans cette étude à l'usage du pseudolabour ou du décompactage (*cf.* paragraphe précédent). En effet, dans la classe de la CAH où les TCSL profondes et les précédents CAP sont surreprésentés, les groupes de parcelles dans le bassin 4 ont 37 % de leurs surfaces en TCSL profondes (contre 24 % en moyenne dans cette classe).

4.3. Les systèmes de travail du sol sont fortement corrélés aux successions.

Selon Labreuche *et al.*, (2016), les **systèmes de travail du sol** basés sur une alternance entre labour et TCSL entre 2006 et 2011 représentent le plus de surface (46,8 %). Ainsi, relativement peu d'agriculteurs abandonnent complètement le labour pour passer aux TCSL (13 % des surfaces en TCSL continues sur la même période). Ce dernier constat est similaire à celui de la précédente enquête Agreste - Pratiques culturales 2006 (Chapelle-Barry, 2008). La facilité d'usage des TCSL étant très variable selon les conditions (pédoclimat, culture, précédent, etc.), Labreuche *et al.*, (2014) (et Soane *et al.*, (2012) pour le semis direct) soulignent qu'un abandon complet du labour nécessite des méthodes d'adaptation et une plus grande technicité de la part des agriculteurs. Le principal facteur testé corrélé au système de travail du sol employé est la succession : les successions à dominante céréales à paille et maïs sont corrélées à un recours au labour systématique. Cela est cohérent avec l'effet limitant des précédents céréales à pailles et maïs sur les TCSL évoqué auparavant (Labreuche *et al.*, 2007), et avec la perte de rendement plus élevée constatée dans la méta-analyse de Van den Putte *et al.*, (2010) pour les essais TCSL longue durée avec une succession contenant uniquement des céréales à pailles et du maïs. L'alternance entre céréales et dicotylédones est corrélée à un usage accru des TCSL, la corrélation n'étant significative que pour les successions de ce type et à dominante semis d'automne. Chapelle-Barry (2008) indique que les périodes d'interculture courtes semblent favoriser les TCSL, (ces dernières étant fréquentes dans des successions avec beaucoup de cultures d'automne) : le premier critère pour l'adoption des TCSL (en termes de surfaces converties) serait ainsi une réduction du temps de travail lors des pics d'activité. En se basant sur une enquête auprès d'agriculteurs européens ayant adopté le semis direct, Soane *et al.*, (2012) indiquent que la réduction du temps de travail et la baisse des charges économiques sont les deux raisons principalement évoquées pour justifier l'adoption du semis direct. Néanmoins, comme évoqué précédemment, un labour au début d'une interculture courte peut éga-

lement conduire à un sol trop motteux pour des conditions de semis optimales, et au choix des TCSL (Labreuche *et al.*, 2014). Cependant, l'utilisation du levier que représente la succession culturale pour la gestion des adventices et bio-agresseurs nécessite une succession diversifiée : alternance céréales / dicotylédones, mais également alternance semis d'automne / semis de printemps (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011). Sans avoir recours à ce levier, l'usage d'herbicides pour le contrôle des adventices peut augmenter. C'est le constat fait par Labreuche *et al.*, (2016), qui établissent une corrélation entre le recours aux TCSL et une utilisation accrue d'herbicides pour la lutte contre les adventices (+ 0,37 pour l'Indice de Fréquence de Traitement en moyenne, tous contextes agronomiques et pédoclimatiques confondus). De plus, Soane *et al.*, (2012) considèrent l'usage d'herbicides comme une condition nécessaire pour l'adoption du semis direct à plus grande échelle, tout en indiquant que seule une succession diversifiée permet de tirer tous les bénéfices possibles du passage au semis direct.

Enfin, les systèmes d'alternance entre labour et TCSL sont positivement corrélés aux types de succession contenant des prairies (avec deux années de culture autre que grandes cultures et prairie).

Concernant les contextes pédoclimatiques, l'usage systématique des TCSL est corrélé avec les types de sol argilo-calcaires, et le Sud-Ouest de la France (bassin 4). Le Nord-Est de la France (bassin 7), est également bien représenté (10 groupes de parcelles sur les 34 identifiés avec une forte proportion de TCSL), mais la corrélation n'est pas significative. Il existe probablement une forte interaction entre ces deux résultats, car ces deux bassins de production ont une très forte proportion de surfaces en types de sol argilo-calcaire. En revanche, il n'y a pas de corrélation négative entre les systèmes d'alternance labour - TCSL et les systèmes en TCSL systématiques et les types de sol *a priori* défavorables (type de sol hydromorphe, et type de sol de texture sableuse ou sablo-limoneuse). Plusieurs éléments peuvent permettre d'expliquer ces résultats. Peigné *et al.*, (2007) indiquent qu'augmenter la profondeur de travail en TCSL permettrait d'avoir recours (au moins partiellement) aux TCSL dans tous les systèmes de culture, ce qu'illustre la méta-analyse de Van den Putte *et al.*, (2010). En effet, les pertes de rendement (tous sols confondus) sont en moyenne de 2,8 % en TCSL profondes (≥ 15 cm), contre 8,5 % en semis direct (Van den Putte *et al.*, 2010). De plus, ces pertes de rendement seraient plus faibles dans un contexte climatique plus sec (Sud de l'Europe) pour les TCSL (Van den Putte *et al.*, 2010) et le semis direct (Soane *et al.*, 2012). Enfin, une teneur en matière organique élevée (Schjøning & Thomsen, 2013) ou des règles de décision strictes limitant les passages d'engin pouvant causer une dégradation de la structure du sol par compaction (Boizard *et al.*, 2013) permettent dans certains cas de limiter les effets négatifs de la réduction du travail du sol sur la structure de ce dernier.

5. CONCLUSION

L'utilisation de l'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011 a permis d'établir des corrélations supposées entre types de sols et choix de travail du sol par les agriculteurs : i) une corrélation positive entre les sols argilo-calcaires, et le travail du sol réduit (< 15 cm de profondeur) ; ii) une corrélation positive entre la pratique du labour et les sols dont l'horizon de surface est de texture sableuse ou sablo-limoneuse ; iii) un recours à des pratiques de travail du sol très simplifiées (moins de 8 cm de profondeur) sur des sols sains et/ou caillouteux, plutôt que sur des sols hydromorphes ou non caillouteux. Néanmoins, le type de sol n'est pas le premier facteur expliquant le choix d'un itinéraire de travail du sol ou d'un système de travail du sol et seule la première corrélation citée (entre sol argilo-calcaires et travail du sol réduit) est significative lorsque l'on étudie le choix du type de travail du sol en fonction de tous les éléments de contexte (culture, précédent cultural, succession de cultures et bassin de production). Les inconvénients issus de la pratique de TCSL sur les types de sols *a priori* défavorables à ces techniques varient fortement en fonction des conditions climatiques (notamment le contexte sec ou humide d'une campagne culturale), diminuent avec la profondeur de travail du sol et peuvent être limitées par certaines pratiques des agriculteurs (enrichissement du sol en matière organique, prévention du tassement). Ces éléments pourraient expliquer que l'on ne retrouve pas les corrélations établies sur les sols de texture sableuse ou sablo-limoneuses et sur les sols hydromorphes.

L'espèce cultivée est le principal facteur corrélé au choix de l'itinéraire de travail du sol : les cultures d'automne sont plus propices aux TCSL, de par la présence d'intercultures courtes, limitant le temps disponible pour les opérations de travail du sol et la fissuration des mottes produites, et les mécanismes de compensation de ces cultures lorsque les conditions de semis sont peu favorables. Les successions de cultures d'automne, alternant céréales et dicotylédones sont quant à elles corrélées à l'usage systématique des TCSL comme système de travail du sol de 2006 à 2011.

Les adaptations et la technicité nécessaires au passage d'un système de culture en TCSL continu sont plus importantes que pour un usage ponctuel de ces TCSL, alternées avec le labour. De plus, la variabilité des conséquences d'un passage au TCSL est élevée, en raison des conditions climatiques de chaque campagne culturale. Ainsi, étudier la répartition pluriannuelle des techniques de travail du sol (donc à l'échelle de la succession culturale) semble plus prometteur pour affiner les corrélations entre contexte pédologique et choix de techniques de travail du sol, avec les prochaines enquêtes Pratiques culturales. Par ailleurs, l'accès, à plus long terme, à une typologie agronomique

des sols spatialisée, comme la typologie Typterres³ développée par le RMT Sols et Territoires permettrait d'affiner ces résultats en améliorant les typologies et en spatialisant plus finement les contextes agronomiques et pédoclimatiques. Une information spatialisée pourrait également permettre d'identifier des contextes très particuliers de manière plus fine, tels les sols argilo-calcaires dans le Sud-Ouest de la France, où les TCSL sont pratiquées sur 100 % des parcelles enquêtées pour le blé tendre d'hiver.

REMERCIEMENTS

Les données de l'enquête Agreste - Pratiques culturales 2011 ont été fournies par le Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD), dans le cadre du projet CAITTEC (Caractérisation des itinéraires techniques mis en œuvre par les agriculteurs : analyse des facteurs explicatifs et évaluation des trajectoires d'adaptation) porté par ARVALIS - Institut du végétal. Les auteurs remercient Jean Roger-Estrade pour sa relecture et les conseils apportés, qui ont permis d'améliorer significativement cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Agreste, 2014 - Méthodologie. Enquête pratiques culturales grandes cultures et prairie 2011.
- Attoumani-Ronceux A., Aubertot J.-N., Guichard L., Jouy L., Mischler P., Omon B., Petit M.-S., Plyber E., Reau R. et Seiler A., 2011 - Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Application aux systèmes de polyculture. 116 p.
- Boizard H., Chenu C., Labreuche J. et Roger-Estrade J., 2014 - Dynamique de la structure du sol en travail et non travail du sol. Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable. Editions Quae, ARVALIS - Institut du végétal, 2014, 191 p.
- Boizard H., Yoon S. W., Leonard J., Lheureux S., Cousin I., Roger-Estrade J. et Richard G. 2013 - Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. *Soil Till. Res.*, 127, pp. 34-44.
- Bouthier A., Fort J.-L. et Sauter J., 2017 - Référencement des sols : une typologie harmonisée et simplifiée. *Perspectives Agricoles*, 444, pp. 80-82.
- Chapelle-Barry C., 2008 - Dans le sillon du non-labour. *Agreste Primeur*, n°207 (février 2008).
- Chenu C., Butault J.-P., Metay A., Colenne C., Angers D., 2013 - Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans les sols, Analyse du potentiel agricole pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre en France, Inra-ADEME-Maaf-MED, pp. 159-193.
- Colbach N., Vacher C. 2014 - Travail du sol et gestion de la flore adventice. Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable. Editions Quae, ARVALIS - Institut du végétal, 2014, 191 p.
- Gras R., 1994 - Incidences directes des cailloux sur la culture des plantes. Sols caillouteux et production végétale. Editions INRA, 1994, 175 p.

³ <http://www.sols-et-territoires.org/produits-du-reseau/projets-affilies-au-rmt-st/typterres/> ; consulté le 25/08/2017

- Guirese M., Revel J.C., 1995 - Erosion due to cultivation of calcareous clay soils on hillsides in south-ouest France. II. Effect of ploughing down the steepest slope. *Soil Till. Res.*, 35, pp. 157-166.
- Guirese M., Cambou E., Collin Bellier C., Denjean A., Falba P., Guigues E., Mouclier M., Muller N., Mesling E., Party J.P., Rigou L., Schneider A., Toiser A., Vauthier Q., Yken E., Revel J.C., 2014 - Les Pêdo-paysages des plaines centrales de Midi-Pyrénées. *EGS*, 21, pp. 77-84
- Labreuche J., Wissocq A., Cavan N., 2016 - Implantation durable du non labour occasionnel. *Perspectives Agricoles*, 437, pp. 8-11.
- Labreuche J., Lecomte V., Sauzet G., Leclech N., Longueval C., Martin C., Eschenbrenner G., Roger-Estrade J., 2014 - Travail du sol et rendement des cultures : conditions et modalités de mise en œuvre pour les principales espèces de grande culture. Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable. Editions Quae, ARVALIS - Institut du végétal, 2014, 191 p.
- Labreuche J., Viloingt T., Caboulet D., Daouze J.P., Duval R., Ganteil A., Jouy L., Quere L., Boizard H., Roger-Estrade J., 2007 - La pratique des Techniques Culturelles Sans Labour en France. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France. Rapport de contrat ADEME, 400 p.
- Lê S., Josse J. and Husson F., 2008 - FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1, pp. 1-18.
- Mary B., Cohan J-P., Dimassi B., Recous S. et Laurent F., 2014 - Effets du travail du sol sur les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone : compréhension des mécanismes et conséquences pour la gestion des pratiques agricoles. Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable. Editions Quae, ARVALIS - Institut du végétal, 2014, 191 p.
- Morris N.L., Miller P.C.H., Orson J.H. and Froud-Williams R.J., 2010 - The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment-a review. *Soil Till. Res.*, 108, pp. 1-15.
- Munier-Jolain N., Médiène S., Meiss H., Boissinot F., Rainer W., Jacques C. et Bretagnolle V., 2012 - Rôle des prairies temporaires pour la gestion de la flore adventice dans les systèmes céréaliers. *Innov. Agro.*, 22, pp. 71-84
- Peigné J., Ball B. C., Roger-Estrade J., David C. et 2007 - Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23 (2), pp. 129-144.
- Roger-Estrade J., Labreuche J. et Boizard H., 2014 - Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en œuvre et effets sur le rendement des cultures. Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable. Editions Quae, ARVALIS - Institut du végétal, 2014, 191 p.
- Soane B.D., Ball, B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F. and Roger-Estrade J., 2012 - No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil & Till. Res.*, 118, pp. 66-87.
- Schjønning, P. and Thomsen, I. K., 2013 - Shallow tillage effects on soil properties for temperate-region hard-setting soils. *Soil and Till. Res.*, 132, pp. 12-20.
- Van den Putte A., Govers G., Diels J., Gillijns K. and Demuzere M., 2010 - Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*, 33 (3), pp. 231-241.

Annexe - Répartition des itinéraires de travail du sol : description des classes identifiées par la CAH.

a : part des surfaces par itinéraire de travail du sol. Moyenne : valeur pour l'ensemble des groupes de parcelles.

Classe 1 : valeur moyenne pour les groupes de parcelles de cette classe. Seules les valeurs significativement différentes sont indiquées. TS : travail superficiel.

b : modalités significativement surreprésentées dans les classes. Test X^2 : p-value d'un test du X^2 effectué entre le facteur qualitatif étudié et la classification. CAP : céréales à paille. MF : maïs fourrage. MG : maïs grain. PH : pois d'hiver. BTH : blé tendre d'hiver.

BDH : blé dur d'hiver. sol-type 5 : limoneux ou limono-sableux hydromorphe. sol-type 2 : argilo-calcaire.

Annexe - Repartition of tillage methods: description of the clusters identified by AHC.

a : proportion of surfaces by used tillage method. Moyenne : value for all individuals of the PCA+AHC. Classe 1 : average value for individuals (groups of fields) belonging to the first cluster ("classe"). Average value for a cluster is shown only if difference between it and average for all individuals is statistically significant. TS : shallow tillage.

b : categories overrepresented (and underrepresented) in clusters, with statistical significance. Test X^2 : p-value of the X^2 test performed between qualitative factors and clusters. CAP: straw cereal crop. MF: forage corn. MG: maize. PH: winter pea. BTH: winter wheat. < sol argileux: the clayey type of soil ("sol argileux") is underrepresented in the considered cluster. argilo-calcaire: the calcareous clay soils ("argilo-calcaire") are overrepresented in the considered cluster.

a. Itinéraire	Moyenne	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
labour	0,78	0,89		0,55	0,46
pseudolabour	0,06	0,05		0,12	
décompactage	0,02	0,01		0,12	
TS 8 - 15 cm	0,07	0,03			0,22
TS 0 - 8 cm	0,07	0,03			0,23
semis direct	0	0	0,03		

b. Facteur	test X^2	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Espèce implantée	3,40E-10	MF, MG, Tournesol		Colza	Colza, PH, BTH, BDH
Précédent	1,08E-03			CAP	Colza
Type de sol	3,44E-02			sol-type 5	sol-type 2