

Gradient de matière et profondeur de prélèvement de terre en cas d'absence prolongée de labour

Émile RÉGNIEZ^{(1)*}, Claire AUMOND⁽²⁾, Alain BOUTHIER⁽³⁾, Pascal DENOROY⁽⁴⁾, Bruno FÉLIX-FAURE⁽⁵⁾, Sébastien KALT⁽⁶⁾, Jérôme LABREUCHE⁽⁷⁾, Christine LE SOUDER⁽⁷⁾, Pascal MATHIEU⁽⁸⁾, François SERVAIN⁽⁹⁾, Matthieu VALÉ⁽¹⁾, Bernard VERBEQUE⁽¹⁰⁾

⁽¹⁾ : AUREA Agrosociences - 270 avenue de la Pomme de Pin – 45160 ARDON

⁽²⁾ : INVIVO Agrosolution – 83 Avenue de la Grande Armée – 75782 Paris

⁽³⁾ : ARVALIS-Institut du végétal Domaine expérimental du Magneraud - 17700 SAINT PIERRE D'AMILLY

⁽⁴⁾ : INRA Département Environnement & Agronomie, UMR ISPA - 71 Avenue Edouard Bourlaux – 33883 Villenave d'Ornon

⁽⁵⁾ : GALYS Laboratoire – 14 rue André Boule – 41000 Blois

⁽⁶⁾ : AUREA Agrosociences - 1 Rue Samuel Champlain, 17000 La Rochelle

⁽⁷⁾ : ARVALIS-Institut du végétal, Station expérimental - 91720 Boigneville

⁽⁸⁾ : CESAR (Centre Scientifique Agroalimentaire Régional) - Les Soudanières, 01250 Ceyzériat

⁽⁹⁾ : LDAR (Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche) - 180 rue Pierre-Gilles de Genes Barenton-Bugny - 02007 LAON

⁽¹⁰⁾ : Chambre d'agriculture du Loiret - 13 Avenue des Droits de l'Homme - 45000 Orléans

Correspondant : contact@aurea.eu

1. Le développement des TCS et leur impact sur la fertilité des sols

L'agriculture se repose depuis plusieurs siècles sur une méthode de travail du sol : le labour. Toutefois, depuis les années 1930, de nouvelles techniques de travail du sol ont fait leur apparition en Amérique. Ces techniques de travail superficiel du sol présentent des avantages pour la diminution de l'érosion hydrique et éolienne des sols cultivés. Ces méthodes sans labour, aussi appelées Techniques Culturelles Simplifiées (TCS), se sont développées en France durant les 20 dernières années. En 2006, 34% des surfaces agricoles françaises étaient implantées en non labour (Agreste, 2008). Pour autant, l'absence de labour n'est pas systématique et un labour occasionnel peut être pratiqué dans un but, par exemple, de contrôle des adventices. Ainsi, en considérant une moyenne de l'ensemble des surfaces implantées en non labour entre 2001 et 2006, environ 11 % n'ont pas été labourées durant cette période (Agreste, 2008). Dans ce cadre d'arrêt durable du labour, la répartition verticale des paramètres physico-chimiques dans le sol est modifiée dans l'horizon auparavant homogénéisé par le labour. Les éléments nutritifs et autres paramètres ont alors une répartition « stratifiée » sur cet horizon, aussi appelée gradient.

La littérature montre une augmentation significative de la teneur en surface en Carbone (C), Phosphore (P) et Potassium (K) en TCS par rapport au labour (Neugshwandtner et al., 2014 ; Thomas et al., 2007). Selon les études, la teneur en profondeur en non labour n'est pas toujours significativement différente de celle du labour, mais l'est par rapport à la celle en surface.

La formation du gradient de teneur en non labour est liée à plusieurs facteurs explicatifs, comme la durée depuis l'arrêt du labour. Après 4 ans d'essai, Redel et al. (2007) ont montré des valeurs en P total et P Olsen significativement supérieures en Semis-Direct (SD) par rapport au labour sur l'horizon de surface (0-10 cm). Le carbone organique semble plus lent à s'accumuler en surface avec une durée supérieure à 5 ans avant de pouvoir observer un gradient (Labreuche et al., 2007).

Le régime de fertilisation a aussi un impact important dans la stratification des teneurs en P et K. En effet, les apports organiques et minéraux ont un effet sur l'enrichissement du sol au niveau des 10 premiers cm de sol (Abdi et al., 2014 ; Dorneles et al., 2014 ; Zhou et al., 2014).

Le pH peut également être affecté par l'arrêt du labour : une acidification de surface peut être observée en TCS par rapport au labour. Dans la littérature, les différences entre la strate à 0-5 cm et celle en profondeur vont de 0.1 à 1 unité de pH (Franzluebbbers et al., 1996 ; Liang et al., 2013). Ces variations de pH restent marginales et ne sont pas observées dans l'ensemble de la bibliographie.

2. Émergence de nouvelles problématiques

La modification dans la répartition des éléments du sol en TCS suscite plusieurs questionnements par les agriculteurs qui aimeraient pouvoir quantifier cet enrichissement de surface et évaluer son impact sur la modification de la fertilité des sols et la gestion de la fertilisation. En raison du développement des techniques sans labour, l'enjeu pour les laboratoires d'analyse de terre est de répondre à cette demande croissante de leurs clients agriculteurs. Pour cela, le Groupement d'Études Méthodologiques pour l'Analyse des Sols (GEMAS) en partenariat avec le Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER) ont constitué un groupe de réflexion et de travail afin d'améliorer la compréhension des différents phénomènes responsables de la stratification des paramètres analytiques et de ses conséquences sur l'interprétation agronomique de l'analyse de terre.

Plusieurs questions sont ressorties des réflexions du groupe. Les premières sont axées sur les facteurs qui concourent à la stratification. Quels sont ces facteurs ? Quels sont leur impact sur la formation du gradient ? À partir de quel moment peut-on considérer que le gradient de matière est significatif ? En d'autres termes, quand peut-on considérer que l'augmentation de teneur en surface par rapport à celle en profondeur est statistiquement significative ? Est-il possible de prévoir cet enrichissement à partir de quelques informations sur le contexte agropédologique ? En présence d'un gradient significatif, l'interprétation de l'analyse d'un prélèvement de terre en surface serait-il susceptible de modifier le conseil de dose ? Faudrait-il adapter les bases d'interprétations de la fertilisation raisonnée ?

Pour répondre à ces objectifs, deux jeux de données ont été mobilisés :

1- Un essai de longue durée à Boigneville (ARVALIS) : cet essai de comparaison de différents travaux du sol est utilisé afin de confirmer et évaluer l'importance relative des facteurs de stratification relevés dans la littérature. Il permet aussi, du fait de répétitions expérimentales, d'évaluer statistiquement la significativité des différences de teneurs relevées entre horizons.

2- Un réseau de parcelles sur le territoire français constitué en 2015. Ce réseau est employé afin de corroborer les connaissances acquises par la bibliographie et l'essai de Boigneville. Ayant évalué un seuil de significativité du gradient, ce réseau servira à formaliser un outil d'aide à l'identification de parcelles susceptibles de présenter un gradient de teneur significatif. Cet arbre d'identification des situations avec gradient doit être basé sur des informations aisément disponibles pour un préleveur.

Les analyses physico-chimiques réalisées sont les suivantes : Carbone organique (Corg), azote total, P Joret-Hébert (Boigneville) et Olsen (réseau 2015), cations échangeables (K, Calcium, Magnésium), CEC Metson, pH_{eau}, calcaire total, granulométrie décarbonatée (réseau 2015).

3. Essai travail du sol (Boigneville) : des premiers éléments de réponses

3.1. Conditions expérimentales

L'essai de longue durée mené à Boigneville par ARVALIS a débuté en 1970 et les données utilisées vont jusqu'en 2007. Les travaux du sol comparés sont : le labour (20 cm), le travail superficiel (TS) (10 puis 5 cm) et le semis-direct (SD), avec 4 répétitions par traitement. Dans le cadre de cette étude, parmi l'ensemble des rotations utilisées dans l'essai, celle choisie est une rotation maïs-blé. De 1970 à 1992, les parcelles ont reçu des apports annuels supérieurs aux exportations, et supérieurs ou égaux à 100 unités de P₂O₅ et de K₂O. La fertilisation a ensuite été raisonnée selon les tables de calculs proposées par le COMIFER.

Des prélèvements de terre ont été réalisés tous les 4 ans de 1970 à 1986. Ensuite, les prélèvements ont été moins réguliers. Pour des raisons ultérieures d'opérationnalité de prélèvement pour les acteurs de l'analyse, le groupe a choisi de considérer les horizons 0-10, 10-20 et 0-20 cm.

Dans le but de quantifier la formation d'une stratification des paramètres analytiques dans le sol, nous avons défini un indice de stratification (IS) obtenu par le quotient de la teneur en surface (0-10 cm) par rapport à celle en profondeur (10-20 cm).

3.2. Validation des facteurs explicatifs connus

La Figure 1 montre les variations dans le temps des teneurs relatives en P_2O_5 et en K_2O pour les traitements SD et TS par rapport au labour. Sur les 10 premiers centimètres, les teneurs en P_2O_5 et K_2O en SD et en TS sont nettement et statistiquement supérieures à celles en labour dès l'année 1974. De plus, les teneurs à 10-20 cm sont proches entre le labour et les deux TCS (TS + SD) notamment en P_2O_5 sur les 15 premières années. Il y a donc bien un effet du changement de travail du sol sur la répartition verticale dans le sol des éléments nutritifs P et K. L'enrichissement de surface, en TS et SD par rapport au labour, est maximal dès 4 ans après l'arrêt du labour pour le P et après 8 années pour le K. Cet effet est sans doute accentué par le régime de fertilisation excédentaire les premières années, comme l'indiquent les bilans annuels moyens en P_2O_5 et en K_2O . La diminution du bilan de 1975 à 1986 est liée à des impasses certaines années. Cela se répercute sur les teneurs en surface et en profondeur. Puis, le bilan est proche de l'équilibre à partir de 1996, date de commencement du raisonnement de la fertilisation selon la méthode COMIFER.

Sur ce site la fertilisation a donc un impact sur la stratification et notamment sur l'enrichissement de surface et l'appauvrissement en profondeur par rapport au labour en P_2O_5 et en K_2O . Un régime de fertilisation excédentaire ou puis d'entretien permettrait donc une formation rapide et un maintien du gradient.

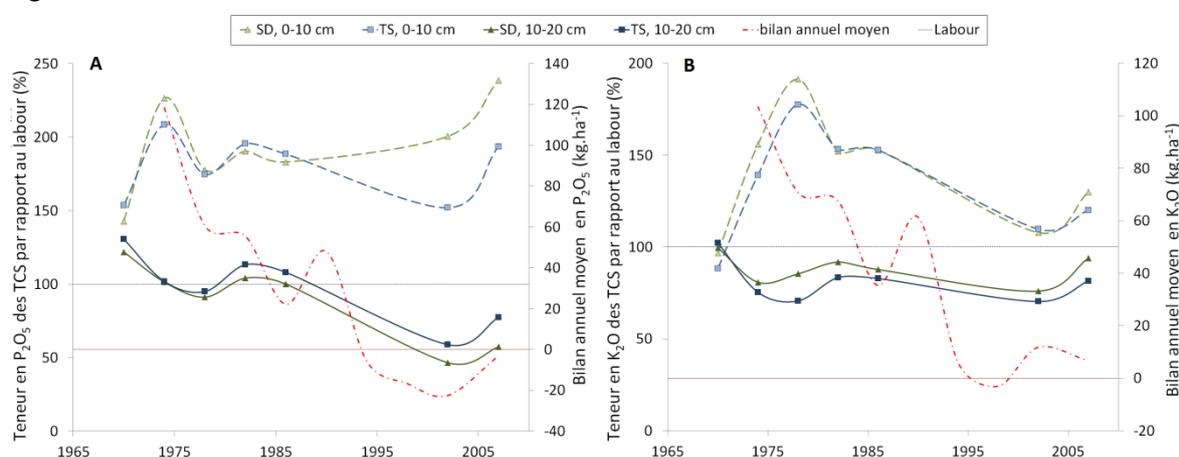


Figure 1 : Évolution dans le temps du bilan annuel moyen calculé par intervalle de 4 années et évolution des teneurs relatives en Semis-Direct (SD) et Travail Superficiel (TS) par rapport à celles en labour pour les horizons de profondeur 0-10 et 10-20 cm. A : P_2O_5 Joret-Hébert. B : K_2O échangeable.

3.3. Détermination d'un seuil de significativité du gradient

L'essai de Boigneville a permis de mettre en évidence les cas où le gradient était significatif par analyse de variances (ANOVA) entre les résultats des prélèvements à 0-10 et 10-20 cm (Tableau 1). Ainsi, d'une part, la valeur de l'IS la plus basse pour laquelle la différence est significative est de 184% et 152%, respectivement pour le P et le K. L'IS le plus grand pour lequel la différence n'est pas significative est de 114% et 110%, respectivement pour le P et le K. Toutefois, l'intervalle est grand entre ces valeurs qui encadrent celle du seuil d'IS à partir de laquelle la différence de teneur entre horizon est significative.

Tableau 1 : Indices de stratification obtenus pour le labour, le travail superficiel (TS) et le Semis-Direct (SD) par année pour le P_2O_5 Joret-Hébert et le K_2O échangeable. ***, ** : différence significative pour une *p-value* de 0.001, 0.01.

Année	Indice de stratification du P_2O_5			Indice de stratification du K_2O		
	Labour	TS	SD	Labour	TS	SD
1970	0,85	1,01	1,01	1,07	0,93	1,05
1974	0,88	1,84 ***	1,99 ***	0,98	1,80 ***	1,90 ***
1978	0,94	1,84 ***	1,91 ***	0,87	1,80 ***	1,98 ***
1982	1,01	1,86 ***	1,89 ***	0,92	1,72 ***	1,52 ***
2007	1,14	2,92 ***	4,85 ***	1,10	1,64 **	1,53 **

Sur la base de ces données, il n'est pas possible de proposer un seuil précis pour l'IS. Afin de pouvoir proposer un IS-seuil utilisable pour la suite du traitement des données, le groupe s'est basé sur la variabilité maximale (aléatoire) estimée par les laboratoires entre les résultats de deux échantillons issus d'une même parcelle. Celle-ci étant évaluée à un maximum de 10 % et s'agissant ici de s'assurer que deux échantillons n'apparaissent pas différents par hasard, nous avons donc fait l'hypothèse qu'une différence analytique de 20 % entre deux échantillons ne serait pas liée au hasard et serait donc significative. Pour la suite des travaux, nous avons posé l'hypothèse d'un gradient significatif pour un IS supérieur ou égal à 120%.

4. Le réseau de parcelles prélevées en France en 2015 : un cas concret pour les laboratoires d'analyses

4.1. Sélection des parcelles et protocole expérimental

Afin de constituer une base de données suffisante, chaque laboratoire partenaire de l'étude a échantillonné et analysé environ 10 parcelles, soit un total de 64. Le principal critère de sélection des parcelles est le nombre d'année depuis l'arrêt du labour qui doit être supérieur ou égal à 3 ans. Étant référencé comme facteur de la stratification dans la littérature, ce critère a été choisi afin de ne sélectionner que des parcelles susceptibles d'avoir un gradient. À la suite de ce critère principal, l'ensemble des autres critères étaient à faire varier afin d'avoir une large gamme de situation. Les TCS utilisées pouvaient varier du pseudo-labour au semis-direct, avec des outils de travail du sol différents, ainsi que les profondeurs de travail. Les parcelles pouvaient avoir des itinéraires techniques divers avec ou sans intercultures, ou présence ou non de prairies temporaires. Enfin, le groupe visait à prendre en compte un maximum de types de sols différents par région prélevée. Ces informations ont été collectées ainsi qu'un historique des quatre dernières cultures : rendements, fertilisations minérales P, K et organiques, chaulage.

Les prélèvements de terre ont été réalisés à une profondeur de 20 cm et doublés afin de garder une première carotte sur 0-20 et une seconde séparée en deux carottes : une à 0-10 cm, l'autre à 10-20 cm. Le choix de 10 cm d'épaisseur de prélèvement est basé sur des critères d'opérationnalité terrain par les acteurs du prélèvement. Un prélèvement de « routine » défini sur 5 cm d'épaisseur conduirait à augmenter fortement le pourcentage aléatoire d'erreur relative.

L'ensemble de ces résultats d'analyses et informations sur les parcelles nous a permis de disposer de plusieurs variables qualitatives explicatives :

- Régions prélevées par grands ensembles de territoire
- Classes texturales basées sur le classement GEPPA simplifié
- Richesse en P_2O_5 et en K_2O du sol selon les seuils d'impasse et de renforcement proposés par les tables du COMIFER
- Classe de Corg basée sur un classement des moyennes nationales en matière organique (voir légende de la figure 4)
- Régime de fertilisation

4.2. Descriptif du réseau de parcelles

Les parcelles ont été échantillonnées sur une grande partie du territoire Français ce qui a permis de balayer un grand nombre de contextes pédo-climatiques (diapo n°15 de la présentation oral). Relativement aux normes d'interprétation COMIFER, les sols étudiés sont plutôt riches en K, moyennement pourvus en P (Tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les teneurs en Corg sont dans la moyenne observée pour les sols Français, avec quelques parcelles très riches. Les sols ont des pH_{eau} en moyenne alcalins, ce qui peut être expliqué par la présence de calcaire pour 26 % de parcelles.

Tableau 2 : Résumé des statistiques descriptives sur les analyses des parcelles prélevées en 2015.

Paramètre analytique	valeur minimale	moyenne	médiane	valeur maximale
Corg (%)	0,65	1,51	1,25	3,94
P ₂ O ₅ (ppm)	12	61	49	220
K ₂ O (ppm)	61	281	232	834
pH _{eau}	5,0	7,5	7,6	8,6

Après calcul des IS, l'intégralité des parcelles prélevées ne présente pas un IS supérieur à 1.2, contrairement aux attentes par rapport aux critères de sélection. Ainsi, pour le C, le P et le K, environ 35 % des parcelles ne sont pas stratifiées (Tableau 3).

Tableau 3 : Résumé des statistiques descriptives sur les indices de stratifications du P et du K.

Indice de stratification	valeur minimale	moyenne	médiane	valeur maximale	% de parcelles stratifiées
C ₀₋₁₀ / C ₁₀₋₂₀	0,88	1,33	1,29	2,51	64
P ₀₋₁₀ / P ₁₀₋₂₀	0,60	1,50	1,32	6,25	62
K ₀₋₁₀ / K ₁₀₋₂₀	0,60	1,38	1,36	3,73	67
pH ₀₋₁₀ - pH ₀₋₂₀	-0,57	-0,05	-0,04	0,60	23

4.3. Évaluation des facteurs explicatifs

4.3.1. Étude de la stratification du P et du K

Les impacts sur la stratification des facteurs explicatifs identifiés à partir du réseau de parcelles ont confirmé les résultats issus de la littérature et ceux de Boigneville. Un autre facteur a pu être relevé grâce au réseau de parcelles : la richesse en P. Ainsi, dès 3 ans d'arrêt du labour, les parcelles ayant des teneurs en P₂O₅ < T_{imp}, pour une culture d'exigence faible en P, peuvent être stratifiées (Figure 2). En ce qui concerne les parcelles riches en P, la durée minimale depuis l'arrêt du labour est de 10 ans avant d'atteindre un IS supérieur ou égal à 120% sauf pour les rares cas fortement fertilisés. La formation du gradient semble donc être liée au nombre d'années en TCS et cette durée est variable selon la richesse du sol connue à la date de prélèvement de terre.

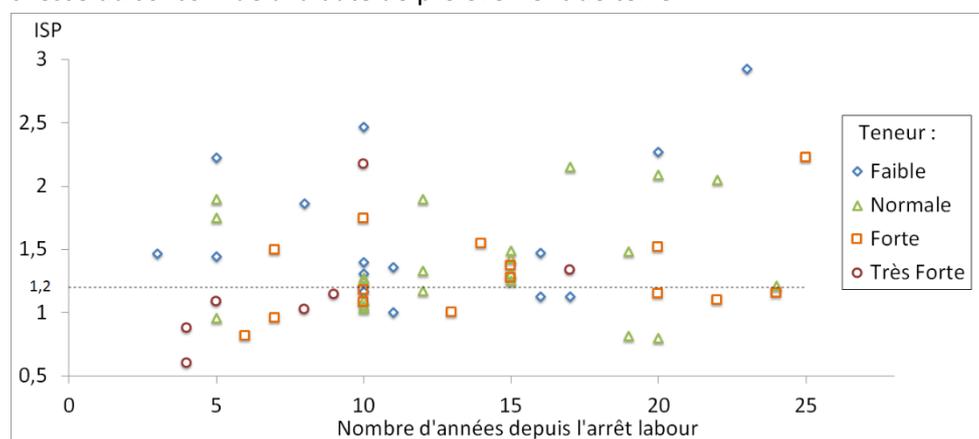


Figure 2 : Indice de stratification du P₂O₅ (ISP) en fonction du nombre d'année depuis l'arrêt du labour par classe de richesses en P₂O₅. Teneur à partir de l'analyse à 0-20 cm : Faible < T_{renf} < Normale < T_{imp} < Forte < 2x T_{imp} < Très forte (selon les tables du COMIFER pour une culture d'exigence faible en P).

Le régime de fertilisation semble impacter l'IS dans notre jeu de données. La Figure 3 met en évidence l'évolution de l'IS en fonction des apports potassiques et organiques moyennés sur les 5 dernières années. Une majorité de parcelles pauvres par rapport à une culture d'exigence forte en K ont un gradient significatif pour de faibles apports. En outre, ces parcelles semblent avoir un ISK qui augmente légèrement de concert avec les apports moyennés. À l'inverse, les parcelles plutôt riches semblent moins stratifiées. Au-delà d'un apport de 90 U de K₂O en moyenne par an, l'enrichissement de surface est significatif. Cependant, le nombre de parcelles ayant des apports supérieures à 90 U est

faible dans notre réseau d'essai. Pour le P, les apports ne semblent pas directement impacter la stratification (données non présentées). Toutefois, les parcelles sans gradient et avec de forts apports sont riches en P et leur nombre d'années depuis l'arrêt du labour est inférieur à 10 ans, ce qui expliquerait le fait qu'elles ne soient pas stratifiées (impact de la richesse du sol en P). Les apports organiques et minéraux semblent donc avoir un effet sur la stratification même si ce n'est pas le cas de toutes les parcelles. Le régime de fertilisation s'avère être un facteur explicatif de la rapidité et de l'intensité de la stratification en P et K, ce qui est bien en accord avec les résultats de la bibliographie (Abdi et al., 2014 ; Zhou et al., 2014). Pour autant, il est probablement en interaction avec d'autres critères de la fertilité des sols tel que la variabilité de la réponse d'un type de sol à un apport phosphaté ou potassique. En effet, certaines parcelles n'ont pas été fertilisées depuis au moins 5 ans, mais sont tout de même stratifiées. Or ces parcelles ont une durée en non labour supérieure à 15 années. L'ancienneté du système aurait donc probablement d'autres impacts que celles de la formation du gradient et pourrait, potentiellement, permettre un maintien d'un gradient déjà en place, même en l'absence d'apports depuis au moins 5 ans.

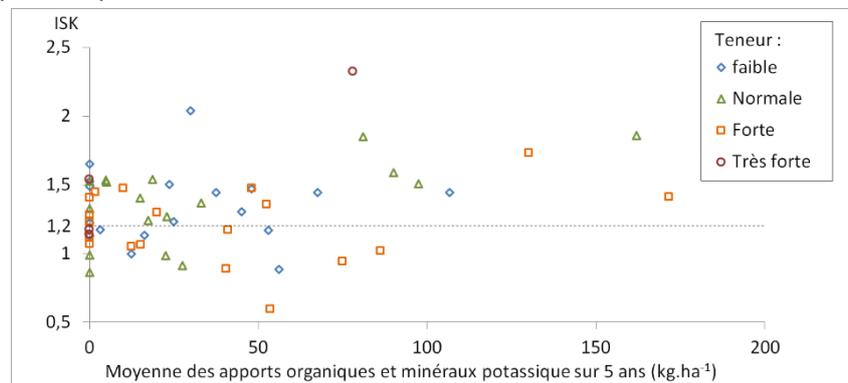


Figure 3 : Indice de stratification du K₂O (ISK) en fonction des apports organiques et minéraux moyennés sur les 5 dernières années par classe de richesses en K. Teneur à partir de l'analyse à 0-20 cm : Faible < T_{renf} < Normale < T_{imp} < Forte < 2x T_{imp} < Très forte (selon les tables du COMIFER pour une culture d'exigence forte).

4.3.2. Étude de la stratification du Corg

La stratification du Corg ne semble pas être directement liée au nombre d'années sans labour, bien que l'IS paraît augmenter légèrement pour des systèmes de plus en plus anciens en non labour (Figure 4). L'effet de la durée depuis l'arrêt du labour n'est pas autant visible sur le réseau de parcelle que dans la littérature (Labreuche et al., 2007). L'historique disponible des pratiques culturales ne permettant pas de calculer avec précision le bilan de carbone, nous n'avons pas pu étudier l'effet des apports organiques et des résidus de cultures sur l'accumulation du carbone organique.

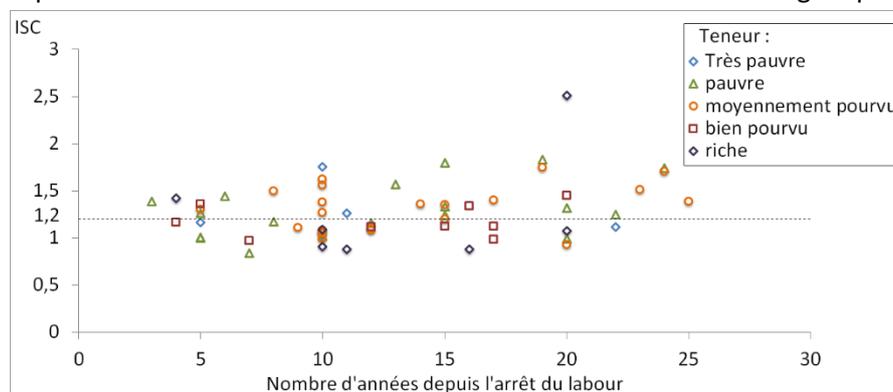


Figure 4 : Indice de stratification du Corg (ISC) en fonction du nombre d'années depuis l'arrêt du labour. Teneur à partir de l'analyse à 0-20 cm : Très pauvre < 0,8 < Pauvre < 1,2 < Moyennement pourvu < 1,7 < Bien pourvu < 2,3 < Riche (en % de Corg)

L'accumulation de Corg en surface reportée dans la littérature concerne les 5 premiers cm de sol (Wyngaard et al, 2012), tandis que notre étude porte sur les 10 premiers cm de profondeur, ce qui dilue probablement l'enrichissement de surface s'il a lieu.

4.3.3. Étude de l'acidification probable du sol de surface

Les résultats contradictoires de la bibliographie au sujet du pH nous ont amené à étudier ce paramètre sur le réseau de parcelle. La Figure 5 confronte les valeurs de pH_{eau} à 0-10cm et celles à 0-20cm pour un même point de prélèvement. Environ 17% des parcelles ont un pH_{eau} plus acide sur 0-10 cm par rapport au pH_{eau} à 0-20 et pour une marge d'erreur de 0.2 point de pH_{eau} . La variation de pH entre un prélèvement de surface et un sur une profondeur classique est donc faible et peut être négligée pour ce réseau de parcelles. Ces observations restent à confirmer dans le cadre de parcelles plus acides.

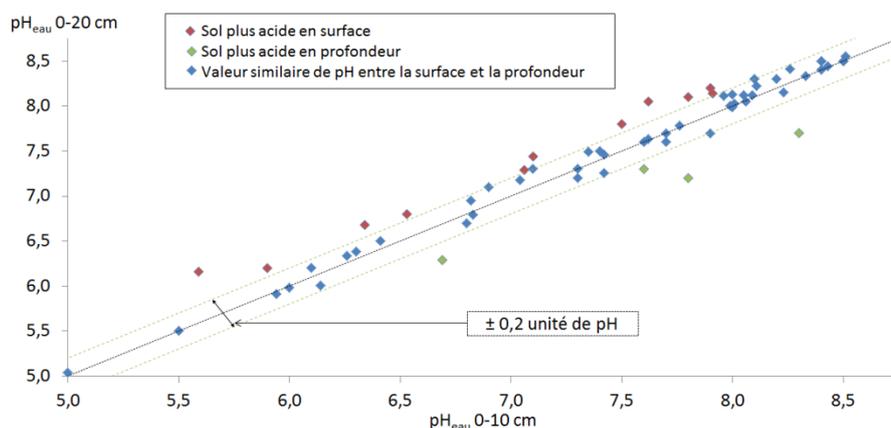


Figure 5 : pH_{eau} obtenu à partir de l'analyse du prélèvement à 0-20 cm en fonction du pH_{eau} obtenu par l'analyse du prélèvement à 0-10cm.

4.4. Formalisation d'un arbre d'identification des situations avec gradient

L'évaluation de différents facteurs intervenant dans la stratification de paramètres analytiques du sol nous permet de proposer un outil d'aide à l'identification des situations avec gradient (Figure 6).

Cet outil est un arbre dichotomique de questions successives qui aboutit à un diagnostic de la possibilité d'enrichissement ou non du P ou du K dans le sol sur les 10 premiers cm par rapport à l'horizon 10-20 cm.

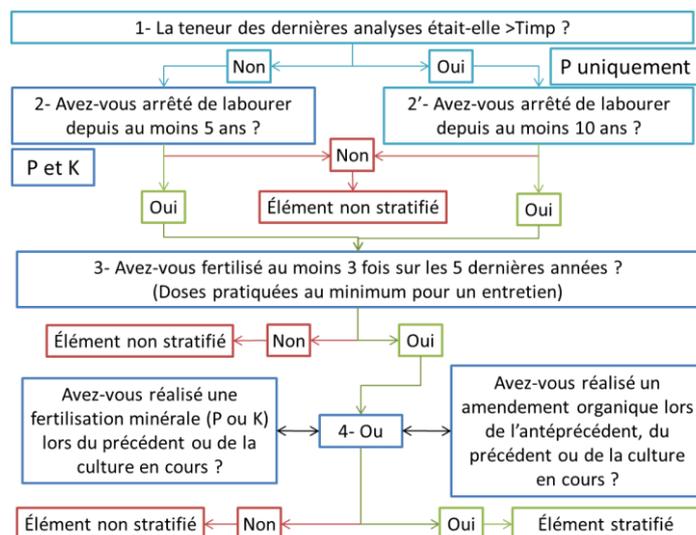


Figure 6 : Arbre d'identification des situations avec un gradient.

Les critères considérés ont été hiérarchisés selon leur ordre d'importance déterminé par nos premiers résultats. Ainsi, la première question est liée à la richesse du sol en P qui a un impact sur le laps de temps avant apparition d'un gradient après l'arrêt du labour. Le second critère est la durée depuis l'arrêt du labour, car si le labour n'a été arrêté que récemment, un régime élevé de fertilisation ne semble pas suffire à former un gradient. Le dernier concerne le régime de fertilisation qui impacte

la stratification des éléments P et K dans le sol.

Cet arbre d'identification a été testé avec les informations des parcelles prélevées. Il en résulte que 60% des prédictions sont bonnes. Pour autant, cet outil à destination des professionnels du prélèvement et de l'analyse doit être plus fiable. C'est pourquoi, il demande à être retravaillé et amélioré afin de réduire le taux d'erreur.

4.5. Effet d'un changement de profondeur de prélèvement sur l'interprétation agronomique

L'interprétation agronomique des analyses de terre est actuellement basée sur le raisonnement de la fertilisation proposé par le COMIFER. Or, ces références quantitatives ont été constituées à partir de résultats d'essais de longue durée en conditions labourées. La profondeur de prélèvement correspond donc à une profondeur de 20 à 30 cm.

Afin de faire une première évaluation des conséquences d'un prélèvement de terre limité à 10 cm, les préconisations résultant de l'analyse sur 0-20 cm ont été comparées à celles résultant de l'analyse des 10 cm superficiels. La Figure 7 représente les différences de doses conseillées en P_2O_5 et K_2O entre le prélèvement classique et le prélèvement de surface. Seulement une minorité des parcelles ont une différence de conseil supérieure à $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ces différences peuvent être importantes surtout pour les cultures d'exigence forte. Aussi, pour une culture d'exigence faible (Blé), plus de 80% des parcelles ont des conseils similaires à $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ près entre prélèvement classique et de surface (81 % pour P_2O_5 et 89% pour K_2O). Pour une culture d'exigence forte (Betterave), la proportion de conseils identiques est de, respectivement, 73 % pour P_2O_5 et 63 % pour K_2O . Donc, pour la majorité des cas du réseau de parcelles étudié, un changement de profondeur de prélèvement n'a pas impacté la dose conseillée. En revanche, pour la minorité restante, les écarts de doses peuvent parfois être importants et non négligeables (Tableau 4). Une grande partie des parcelles prélevées concernées par une différence de conseil a en moyenne une teneur inférieure à T_{imp} pour le P et le K.

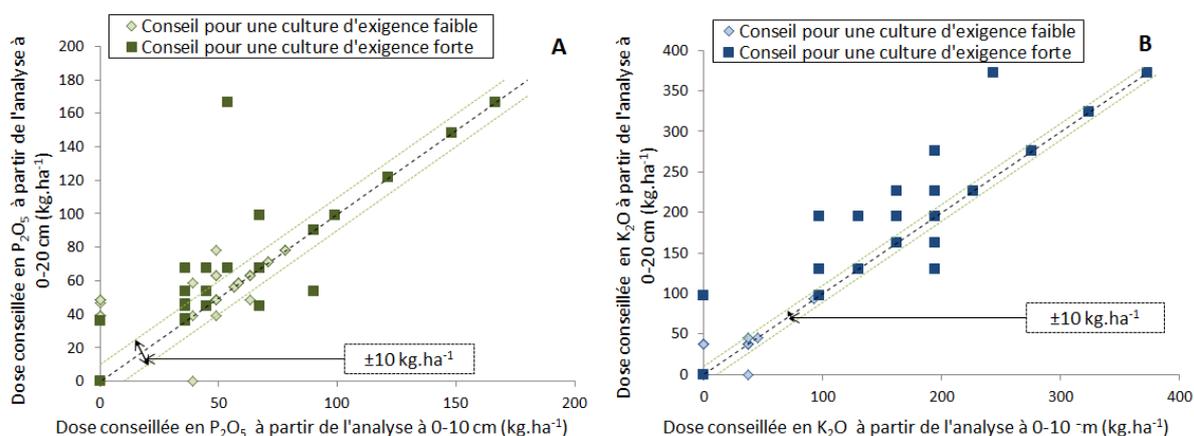


Figure 7 : Évolution de la dose conseillée (A : P_2O_5 ; B : K_2O) à partir de l'analyse à 0-20cm en fonction de celle à 0-10cm pour une culture d'exigence faible (Blé) et une d'exigence forte (Betterave).

Tableau 4 : Résumé des statistiques descriptives sur les différentes doses conseillées en P_2O_5 et en K_2O pour une culture d'exigence faible (Blé) et une d'exigence forte (Betterave). Statistiques réalisées pour des conseils supérieurs à partir de l'analyse 0-20 cm.

Différence de dose pour une	culture d'exigence faible ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)		culture d'exigence forte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	
	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O
Élément				
moyenne	33	33	27	60
min	15	8	1	32
max	49	38	113	130

5. Conclusions et perspectives

Cette étude constitue un premier travail de compréhension et d'estimation de la formation d'un gradient dans les systèmes de grande culture non labourés sur les sols et climats Français pour déboucher sur un outil pratique de prévision du risque de la stratification des paramètres de l'analyse de terre. L'essai travail du sol de Boigneville a permis un calcul de significativité d'un gradient entre horizon 0-10 et 10-20 cm, mais le manque de progressivité dans l'établissement du gradient n'a pas permis de définir un niveau seuil de début de significativité de cette stratification. Ce niveau seuil a donc été choisi sur la base de l'incertitude maximale évaluée par les laboratoires.

Le réseau d'observation de parcelles constitué avec les laboratoires du GEMAS participant à l'étude a permis d'élargir la gamme d'observations de paramètres déjà mis en évidence à Boigneville : durée de non-travail du sol et bilan élémentaire (fertilisation/exportation). Pour le P, la richesse du sol influence la durée de formation du gradient, plus longue pour un sol riche. La durée depuis l'arrêt du labour et le régime de fertilisation influencent la stratification du P et K. Le Corg semble être impacter seulement par la durée depuis l'arrêt du labour. Cependant, la faible cohérence de nos résultats avec ceux reportés dans la bibliographie est probablement liée à la profondeur de prélèvement dans notre réseau (0-10 cm au lieu de 0-5 cm dans la littérature).

Ces facteurs explicatifs ont été utilisés pour formaliser l'outil d'aide à l'identification des situations stratifiées. Aux États-Unis, des équipes universitaires ont aussi travaillé sur la question et proposent chacune un arbre pour la décision d'un prélèvement classique ou stratifié qui est proche de celui formalisé (Anderson et al. ; Hart et al., 2010). Cependant, l'arbre proposé dans l'étude doit être amélioré car la probabilité d'erreur est encore trop grande pour une utilisation systématique par les professionnels du prélèvement. Il est toutefois utile à titre indicatif et comme point de départ pour les travaux suivants.

Cette étude doit encore être poursuivie pour une analyse plus précise du poids des divers facteurs sur la stratification du sol. Pour cela, les informations sur les parcelles étudiées doivent être étendues à un historique plus ancien des apports minéraux et organiques, du chaulage, mais aussi des cultures pratiquées. De nouvelles parcelles pourraient être ajoutées à ce référentiel, particulièrement des parcelles non fertilisées ou encore riches en P afin de déterminer plus précisément l'impact des facteurs explicatifs (richesse du sol, durée sans labour, apports) sur la formation du gradient. Le réseau de parcelles doit aussi être élargi à des sols pauvres dans lesquels la stratification devrait être plus forte et rapide.

L'effet de la mise en place du gradient minéral dans le sol sur l'interprétation agronomique n'a pas encore fait l'objet d'une étude poussée. Dans un premier temps, l'impact du référentiel d'interprétation agronomique, normé pour des situations labourées, utilisé pour des échantillons prélevés sur 0-10 cm, doit encore être étudié afin d'identifier les situations à risque de préconisation erronée. Dans un second temps, un référentiel d'interprétation spécifique aux sols fortement stratifiés devra être développé. Pour cela, faute de pouvoir développer un fort réseau d'expérimentation, l'utilisation de modèles mécanistes de simulation sera requise afin d'étudier les effets de la distribution des nutriments dans le profil sur la réponse de la culture

Ce travail représente donc un début dans la prise en compte des systèmes non labourés dans les procédures de prélèvement d'échantillons et d'interprétation des analyses par les laboratoires d'analyse de terre. Ceci permettra d'améliorer les connaissances déjà acquises et d'adapter l'interprétation agronomique à la formation d'un gradient dans le sol afin d'assurer de bonnes pratiques de fertilisation par les agriculteurs.

6. Références

- Abdi, Dalel ; Cade-Menun, Barbara J. ; Ziadi, Noura ; Parent, Léon-Etienne. Long term impact of tillage practices and phosphorus fertilization on soil phosphorus forms as determined by ³¹P nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Environmental Quality*, juin 2014, vol. 43, n°4, pp. 1431-1441
- Agreste. Dans le sillon du non-labour. *Agreste Primeur*, février 2008, n°207
- Anderson, N. P., Hart, J. M., Horneck, D. A., Sullivan, D. M., Christensen, N. W. et Pirelli, G. J. 2010. Evaluating soil nutrients and pH by depth in situation of limited or no tillage in Western Oregon, EM 9014, 6 p.
- Dorneles, Evelyn Penedo ; Lisboa, Bruno Brito ; Abichequer, André Dabdab ; Bissani, Carlos Alberto ; Meurer, Egon José ; Varga, Luciano Kayser. Tillage, fertilization systems and chemical attributes of a Paleudult. *Scientia Agricola*, mars/avril 2015, vol. 72, no. 2, pp. 175-186
- Franzluebbers, A.J. ; Hons, F.M.. Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. *Soil & tillage research*, 1996, vol. 39, pp. 229-239
- Hart, J., Christensen, N., Horneck, D., Sullivan, D. et Pirelli, G.. Phosphorus and potassium soil test results and sampling depth, 2010, part 2, 3 p.
- Liang, Lei ; Tian, Sisi ; Wang, Fengyuan ; Zhang, Jianhi. Composition of soil exchangeable base cations as affected by conservation tillage. *Journal of food agriculture & environment*, septembre 2013, vol. 11, no. 3&4, pp. 1912-1915
- Neugshwandtner, R.W. ; Liebhard, P. ; Kaul, H.-P. ; Wagenstristl, H.. Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. *Plant soil environment*, 2014, vol. 60, n°2, pp. 57-62
- Thomas, G.A. ; Dalal, R.C. ; Standley, J.. No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil & tillage research*, 2007, vol. 94, pp. 295-304
- Wyngaard, Nicolás ; Echeverria, Hernán E. ; Sainz Rozas, Hernán R. ; Divito, Guillermo A.. Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudoll. *Soil and tillage research*, mars 2012, vol. 119, pp. 22-30
- Zhou, Guisu ; Yin, Xinhua ; Verbree, David A.. Residual effects of potassium to cotton on corn productivity under no-tillage. *Agronomy journal*, 2014, vol. 106, no. 3, pp. 893-903