

Évolutions du pH et des teneurs en P K Mg dans les sols de France hexagonale entre 2003 et 2020 à partir de la Base de Données des Analyses de Terre

Blandine Lemerrier¹, Manon Caubet¹, Nolwenn Le Pioufle², Eva Rabot², Catherine Pasquier², Antonio Bispo², Nicolas Saby²

¹ Institut Agro, INRAE, SAS, 35000 Rennes, France

² INRAE, Info&Sols, 45075, Orléans, France

Contexte

Les statistiques départementales des ventes, produites par l'UNIFA (Union des Industries de la Fertilisation), mettent en évidence une réduction importante de la fertilisation phospho-potassique des parcelles agricoles au niveau national depuis 2010. Cette tendance peut s'expliquer en partie par l'amélioration du conseil agronomique, mais aussi par les contraintes économiques et notamment l'augmentation des prix de l'énergie qui affectent durablement ceux des fertilisants. Pour autant, il n'est pas possible de quantifier précisément la façon dont les évolutions des pratiques de fertilisation se répartissent selon les différents systèmes de culture. Parallèlement, on constate un fort recul des systèmes de polyculture-élevage dans plusieurs régions françaises, accompagné par une évolution de la composition des rations. Ces évolutions marquées pourraient *a priori* avoir des répercussions sur la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, et affecter la fertilité des sols.

En France, la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT Info&Sols, INRAE Orléans) regroupe depuis 1990 les résultats d'analyses agronomiques d'horizons de surface de sols cultivés, effectuées à la demande d'agriculteurs sur l'ensemble du territoire hexagonal, par des laboratoires agréés par le Ministère en charge de l'agriculture. Cette base de données rassemble ainsi, sur la période 1990–2020, plus de 3,6 millions de déterminations de pH (eau), 3,5 millions de déterminations de phosphore (P) extractible issues des trois méthodes d'analyses principales pratiquées en France (Joret-Hébert, Dyer et Olsen) et un nombre équivalent de déterminations de potassium (K) et magnésium (Mg) échangeables.

L'objectif de ce travail est de déterminer la variabilité spatiale du niveau de l'offre en P, K et Mg et du pH des sols agricoles et d'identifier s'ils ont significativement varié au cours de la période récente, et l'amplitude de cette variation.

Méthodologie

Le diagnostic spatio-temporel s'appuie sur l'analyse des valeurs brutes du pH et des teneurs en P, K et Mg mais également sur les résultats d'interprétations agronomiques pour évaluer la disponibilité des éléments pour les cultures. Les teneurs sont exprimées en P₂O₅ pour le phosphore assimilable, en K₂O pour le potassium échangeable et en MgO pour le magnésium échangeable.

Harmonisation des analyses de P extractible

Les informations sur le P extractible sont obtenues à partir des résultats de trois méthodes analytiques différentes, dont la répartition spatiale varie dans le temps (Figure 1). Pour pouvoir disposer d'une variable unique et analyser les évolutions, il est nécessaire d'harmoniser les informations sur cet élément. Pour cela, un indicateur appelé « P équivalent Olsen » a été calculé à l'aide d'une fonction de pédotransfert qui considère le pH et la valeur en P mesurée par la méthode Joret-Hébert ou la méthode Dyer (Hu *et al.*, 2021).

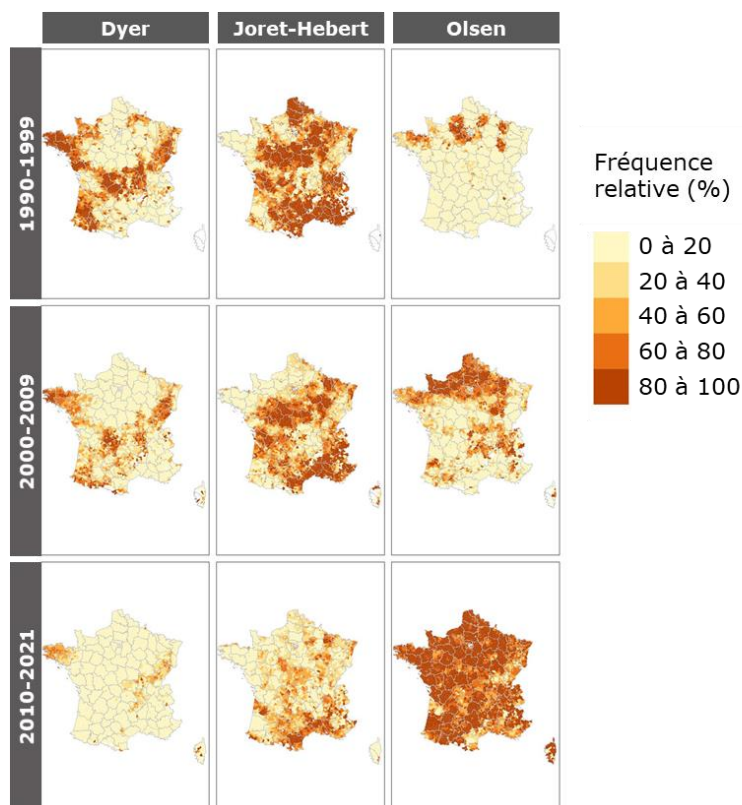


Figure 1– Répartition spatiale et temporelle des effectifs d’analyses de P_2O_5 extractible par canton selon les méthodes d’analyses Dyer, Joret-Hébert et Olsen. Les résultats sont exprimés en fréquence relative par rapport à l’effectif total d’analyses de la teneur en P_2O_5 extractible, toutes méthodes confondues.

Agrégation spatio-temporelle des résultats

Les données de la BDAT (version 8.0.1.0 du 24/10/2023) ont été agrégées en deux périodes d’une durée de 9 ans : de 2003 à 2011 et de 2012 à 2020.

Au niveau spatial, les traitements ont été menés à l’échelle des 714 Petites Régions Agricoles (PRA) de France hexagonale.

Procédure de rééchantillonnage

L’étude des évolutions des teneurs et des classes de fertilité nécessite que les populations d’analyses issues des deux périodes soient comparables dans le temps et l’espace. Or, les modalités d’échantillonnage des sols analysés sont variables dans le temps et l’espace au sein des PRA. Afin de limiter les biais liés à l’hétérogénéité des échantillons, une technique de rééchantillonnage a été appliquée aux données brutes, préalablement à la mise en œuvre de tests statistiques. L’objectif est de simuler un échantillonnage dans lequel le nombre d’analyses par unité de Surface Agricole Utile (SAU) est constant pour chaque PRA et pour chaque période. Pour cela, il a été vérifié qu’au moins 100 analyses exploitables soient présentes dans chaque PRA et qu’au moins 5 communes disposent de données pour les 2 périodes. Ensuite, un tirage aléatoire équivalent au nombre de données disponibles au sein de la période la moins bien pourvue est réalisé pour chaque PRA et répété 1 000 fois (avec remise).

Fertilité chimique : diagnostic et évolutions

La fertilité chimique des sols en P, K et Mg est évaluée par un diagnostic agronomique réalisé à partir du logiciel RegiFert® (Denoroy *et al.*, 2004), qui utilise les principes du Comifer (Comité français pour l’équilibre de la fertilisation) pour affecter une classe de fertilité à chaque analyse en fonction de la position de la valeur de l’analyse par rapport à deux seuils de référence nommés L1 et L2 dans

RegiFert®. L1 et L2 correspondent aux valeurs limites de l'analyse du sol au-delà desquelles la fertilisation n'est pas jugée indispensable pour atteindre le rendement potentiel, respectivement pour les cultures peu exigeantes et exigeantes. L'interprétation agronomique prend également en compte d'autres paramètres du sol qui influencent la mobilité des nutriments : la teneur en CaCO₃, le pH, et les teneurs en argile et en carbone organique. Ces informations sont également disponibles dans la BDAT. Si un des critères (notamment la teneur en argile) n'est pas disponible pour l'analyse considérée, alors on attribue à l'analyse la médiane cantonale. Ainsi, à partir de 2 seuils de référence, 3 classes de diagnostic sont définies et nommées ci-après « fertilité faible » pour les valeurs d'analyse du sol inférieures à L1, « fertilité moyenne » pour les valeurs d'analyse du sol comprises entre L1 et L2, et « fertilité forte » pour les valeurs d'analyse du sol supérieures à L2.

Mise en évidence d'évolutions significatives des teneurs et des classes de fertilité

Les évolutions des teneurs sont testées statistiquement à l'échelle des PRA par un test de Wilcoxon. Ce test permet de tester l'hypothèse H₀ : « Les médianes de l'élément pour chacune des deux périodes ne sont pas différentes ». Le test est appliqué à chaque tirage. La décision finale repose sur le calcul du pourcentage des 1 000 p-valeurs inférieures au seuil de risque α fixé à 0,05 (5%). Pour décider d'une évolution significative d'une PRA, on considère que ce pourcentage doit être supérieur à un seuil de 80%.

Cinq situations ont été distinguées après rééchantillonnage et application des tests statistiques :

- Augmentation $\geq 10\%$: au moins 80% des tirages aléatoires concluent à une augmentation statistiquement significative et la différence des médianes entre les 2 périodes est supérieure ou égale à 10% en valeur absolue (P, K, Mg) ou à 0,25 unité de pH ;
- Augmentation $< 10\%$: au moins 80% des tirages aléatoires concluent à une augmentation statistiquement significative et la différence des médianes entre les 2 périodes est inférieure à 10% en valeur absolue ou à 0,25 unité de pH ;
- Indéterminée : moins de 80% des tirages aléatoires concluent à une augmentation statistiquement significative et moins de 80% concluent à une diminution statistiquement significative ;
- Diminution $< 10\%$: au moins 80% des tirages aléatoires concluent à une diminution statistiquement significative et la différence des médianes entre les 2 périodes est inférieure à 10% en valeur absolue ou à 0,25 unité de pH ;
- Diminution $\geq 10\%$: au moins 80% des tirages aléatoires concluent à une diminution statistiquement significative et la différence des médianes entre les 2 périodes est supérieure ou égale à 10% en valeur absolue ou à 0,25 unité de pH ;
- Effectif insuffisant : l'une ou l'autre des périodes contient moins de 100 analyses et/ou moins de 5 communes disposent des analyses pour les 2 périodes.

Les évolutions des classes de fertilité sont évaluées en deux étapes. En premier lieu, la différence des fréquences de chaque classe aux deux périodes est testée statistiquement grâce à un test du χ^2 au seuil de significativité de 10%. Une évolution des fréquences est attribuée à une PRA si au moins 80% des tests issus des tirages aléatoires sont significatifs. En deuxième lieu, une interprétation par expertise est nécessaire pour décider du sens de l'évolution. Ainsi, si la classe « fertilité forte » passe de la fréquence dominante à celle minoritaire dans une PRA, l'évolution est jugée à la baisse. L'évolution des fréquences peut être statistiquement significative sans pour autant changer l'ordre d'apparition des différentes classes de fertilité. Ce cas est alors interprété comme une stabilité de la classe de fertilité. Avec 3 classes de fertilité, il est nécessaire d'interpréter 36 combinaisons différentes.

Résultats

Le pH eau

Les valeurs des médianes par PRA du pH eau des sols non calcaires les plus élevées de la France hexagonale entre 2003 et 2020 sont observées dans le centre nord de la France. Par opposition, les

valeurs les plus faibles se trouvent au niveau des massifs cristallins comme le Massif Central, le massif Armoricain et les Vosges, et des Landes, (Figures 2a et 2b). Les médianes du pH eau ont augmenté entre les périodes de 2003–2011 et 2012–2020 pour la quasi-totalité de la France (Figure 2c). Ces évolutions du pH eau des sols non calcaires sont significatives pour 54% de la SAU et mettent en évidence quasiment exclusivement des augmentations (Figure 3).

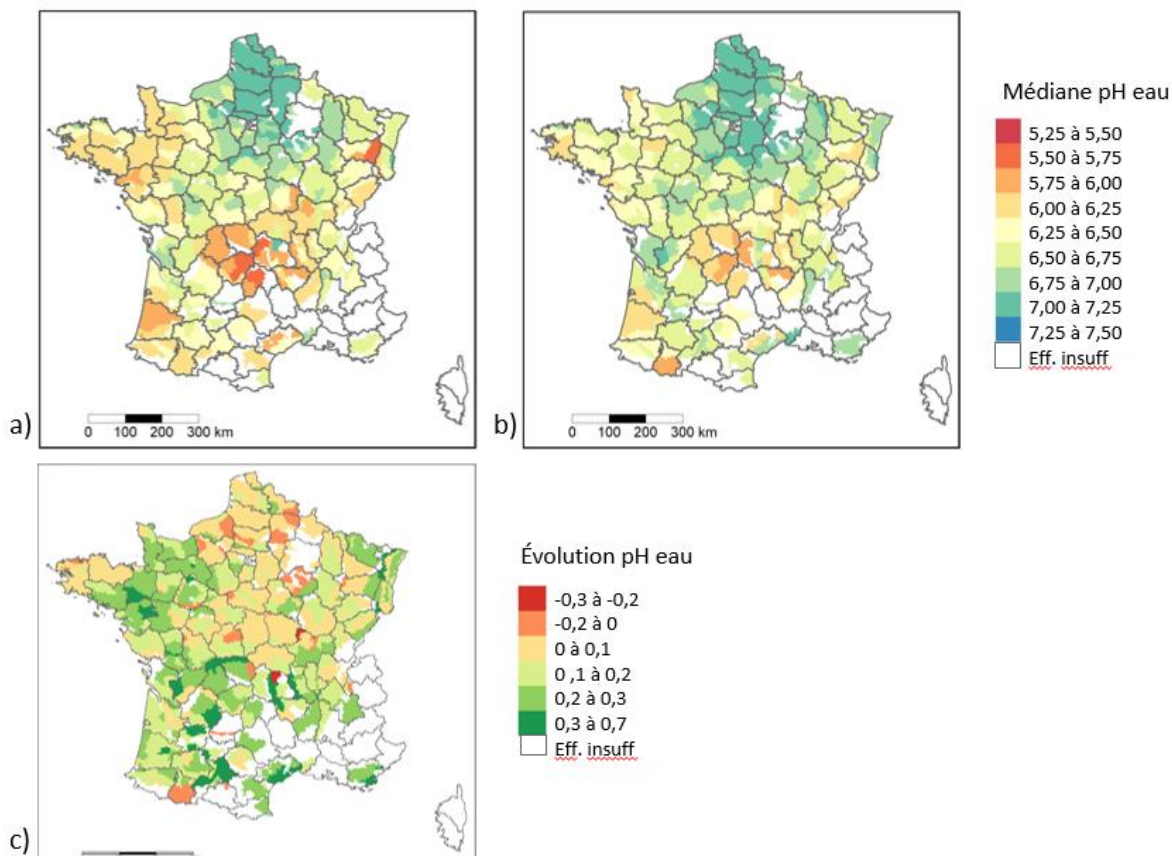


Figure 2 – Cartes des médianes des pH eau des sols non calcaires par Petites Régions Agricoles sur les périodes (a) 2003–2011 et (b) 2012–2020 et (c) l'évolution de ces médianes entre les deux périodes. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

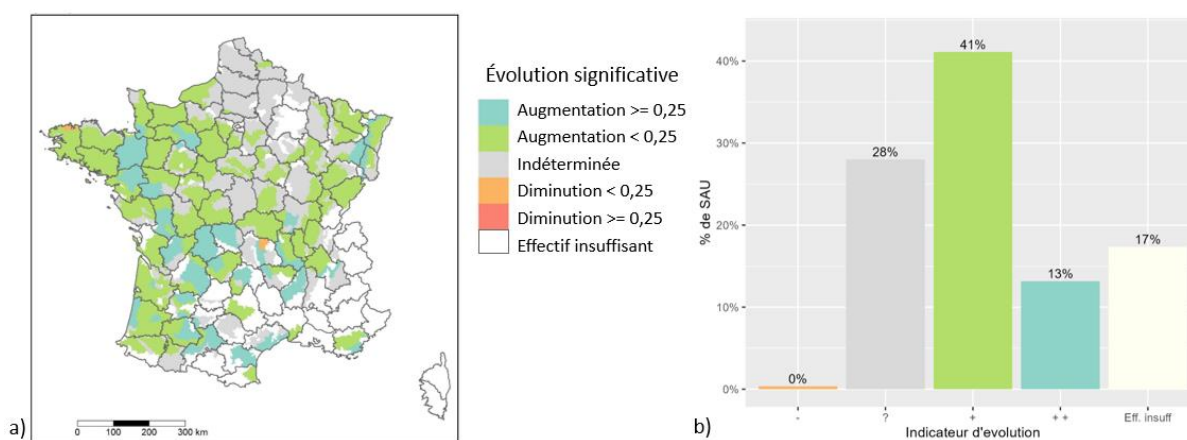


Figure 3 – (a) Carte des évolutions significatives des médianes de pH eau des sols non calcaires par Petites Régions Agricoles entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020 et (b) histogramme correspondant en termes de pourcentage de surface agricole utile (SAU) à l'échelle de la France hexagonale. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

Les teneurs et interprétations agronomiques de P, K et Mg

Concernant l'évolution des teneurs en P, en K et en Mg, les travaux précédents réalisés à partir des données de la BDAT ont montré une augmentation des teneurs en Mg, des teneurs relativement stables en K et une diminution générale des teneurs en P entre 1990–2004 et 2005–2014 (Saby et al., 2016). Les résultats présentés ci-dessous, incluant des données plus récentes, confirment ces tendances.

Le phosphore équivalent Olsen

Les médianes des teneurs en P équivalent Olsen sont plus élevées en Bretagne et dans les Hauts-de-France que dans le reste de la France, et les valeurs les plus faibles sont observées principalement sur la côte méditerranéenne (Figures 4a et 4b). Entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020, les médianes de ces teneurs ont eu tendance à diminuer dans la majorité des PRA (Figure 4c). La baisse des médianes des teneurs en P équivalent Olsen est significative pour 68% de la SAU, l'augmentation est significative pour 3% de la SAU et enfin l'évolution est non significative pour 21% de la SAU (Figure 5).

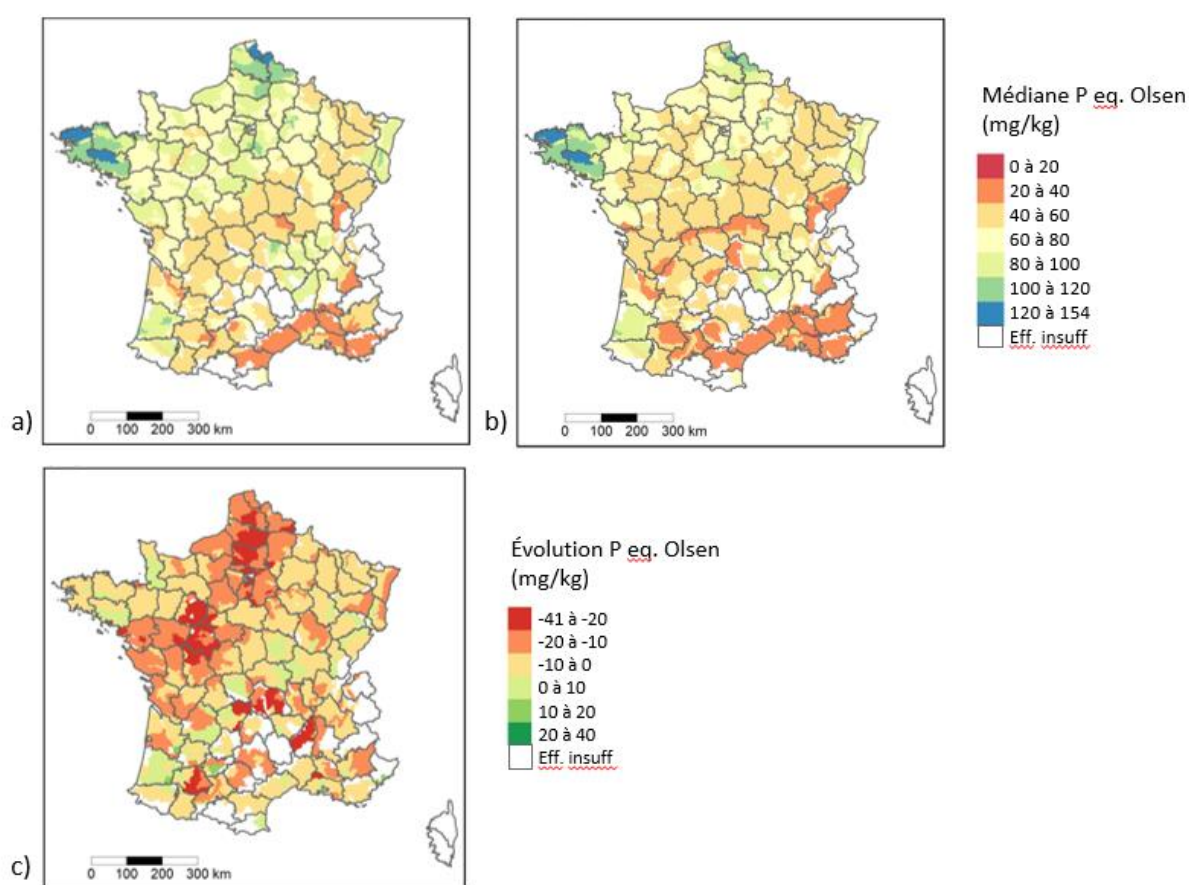


Figure 4 – Cartes des médianes des teneurs en P_2O_5 équivalent Olsen (P eq. Olsen) par Petites Régions Agricoles sur les périodes (a) 2003–2011 et (b) 2012–2020 et (c) l'évolution de ces médianes entre les deux périodes. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

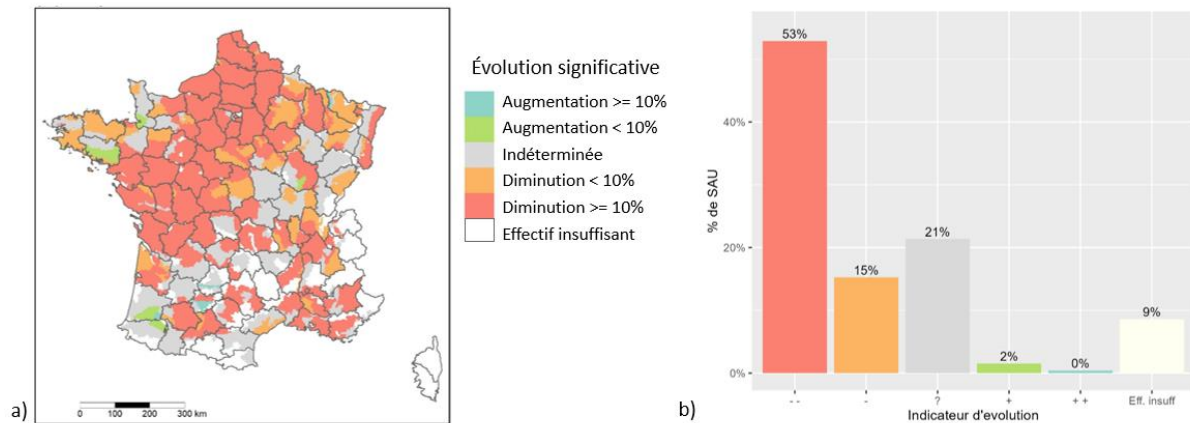


Figure 5 – (a) Carte des évolutions significatives des médianes des teneurs en P_2O_5 équivalent Olsen par Petites Régions Agricoles entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020 et (b) histogramme correspondant en termes de pourcentage de surface agricole utile (SAU) à l'échelle de la France hexagonale. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

Les évolutions constatées des médianes des teneurs en P équivalent Olsen ont une conséquence sur la répartition des classes dominantes d'interprétation agronomique pour 28% de la SAU (Figure 6b). Ainsi, près d'un quart (24%) de la SAU se trouve en classe de fertilité faible sur la dernière période 2012–2020 alors que ce chiffre s'élevait à 13% sur la période 2003–2011. À l'inverse, le pourcentage de la SAU avec une classe de fertilité forte est de 22% sur la période la plus récente alors qu'il était de 36% sur la première période (Figure 6c).

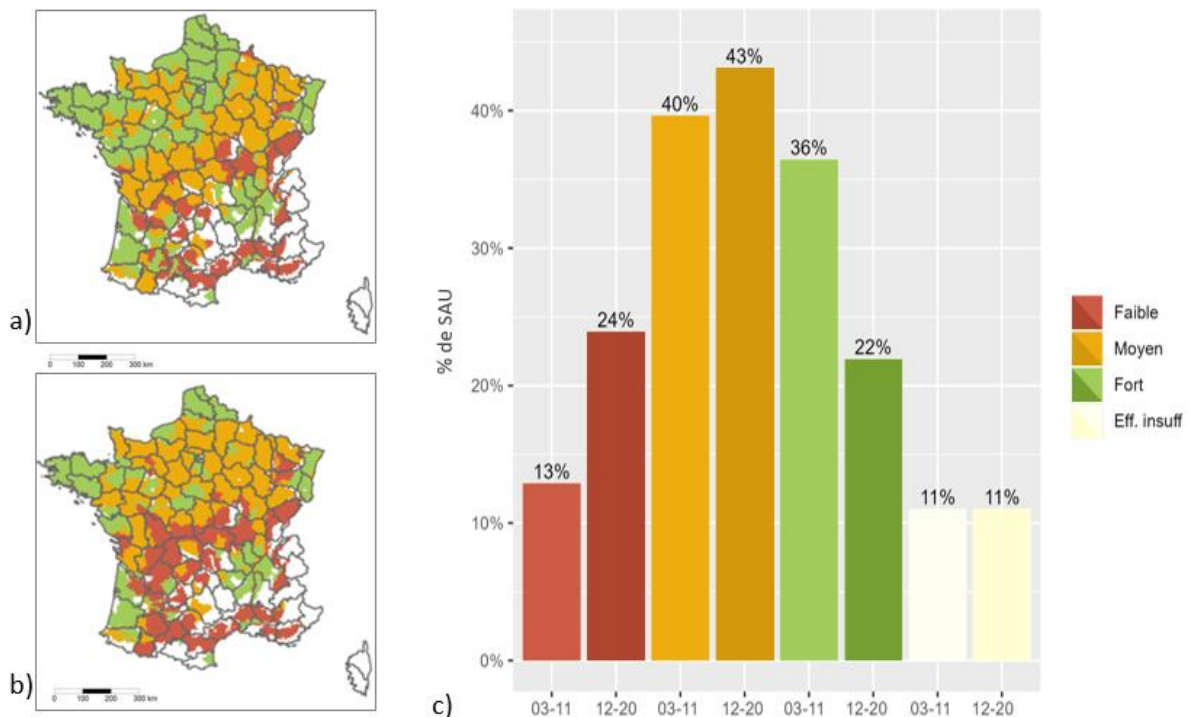


Figure 6 – Cartes de la classe dominante du diagnostic de fertilité RegiFert® pour les teneurs en P_2O_5 équivalent Olsen par Petites Régions Agricoles sur les périodes (a) 2003–2011 et (b) 2012–2020. (c) Histogramme des classes dominantes du diagnostic RegiFert® en pourcentage de surface agricole utile (SAU) pour les périodes 2003–2011 (teintes claires) et 2012–2020 (teintes foncées) à l'échelle de la France hexagonale. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

Ces changements de classe de fertilité dominante par PRA correspondent à une baisse significative de classe de fertilité basée sur le P équivalent Olsen dans une grande partie de la France alors que très peu de PRA présentent une augmentation significative de classe de fertilité et la classe de fertilité est significativement stable pour un nombre non négligeable de PRA (Figure 7).

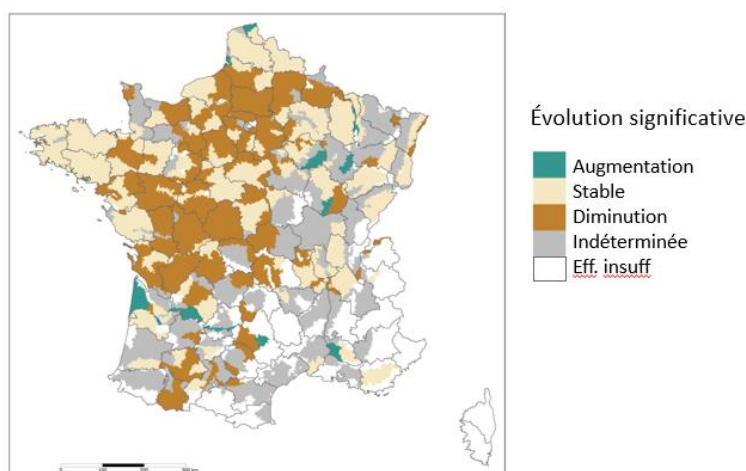


Figure 7 – Carte représentant les évolutions significatives des classes dominantes du diagnostic de fertilité RegiFert® pour le P₂O₅ équivalent Olsen par Petites Régions Agricoles entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

Le potassium échangeable

Les médianes des teneurs en K₂O par PRA observées en France hexagonale sur la période 2012–2020 varient majoritairement de 150 à 300 mg/kg (Figure 8a). Les valeurs les plus faibles sont observées dans les sols sableux des Landes de Gascogne (Figure 8a). Les valeurs les plus élevées sont observées sur les sols argileux développés sur l’arc des calcaires du Jurassique de la Lorraine à la Bourgogne et des Charentes et en Limagne dans le Massif Central (Figure 8a). Des évolutions significatives des teneurs en K concernent 52% de la SAU. Elles sont essentiellement des diminutions, pour 46% de la SAU, excepté dans des zones qui semblent correspondre à des zones viticoles (Figure 8b).

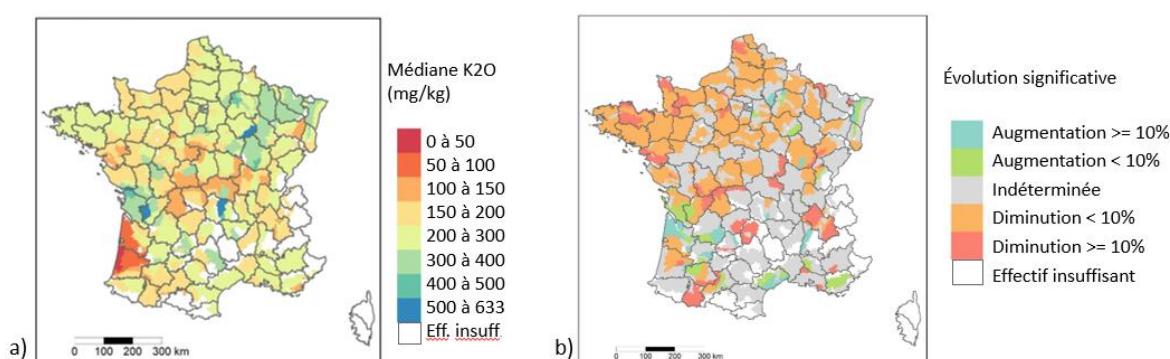


Figure 8 – Cartes (a) des médianes des teneurs en K₂O par Petites Régions Agricoles sur la période 2012–2020 et (b) des évolutions significatives de ces médianes par Petites Régions Agricoles entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

La carte de l’interprétation agronomique pour le K montre que presque toutes les PRA ont une classe dominante forte ou moyenne sur la période 2012–2020 (Figure 9a). Néanmoins, lorsque les classes d’interprétation agronomique sont comparées avec celles de la période précédente 2003–2011 en termes

de pourcentage de la SAU, on observe une diminution de la classe forte au profit de la classe moyenne, sans impact visible sur la classe faible (Figure 9b).

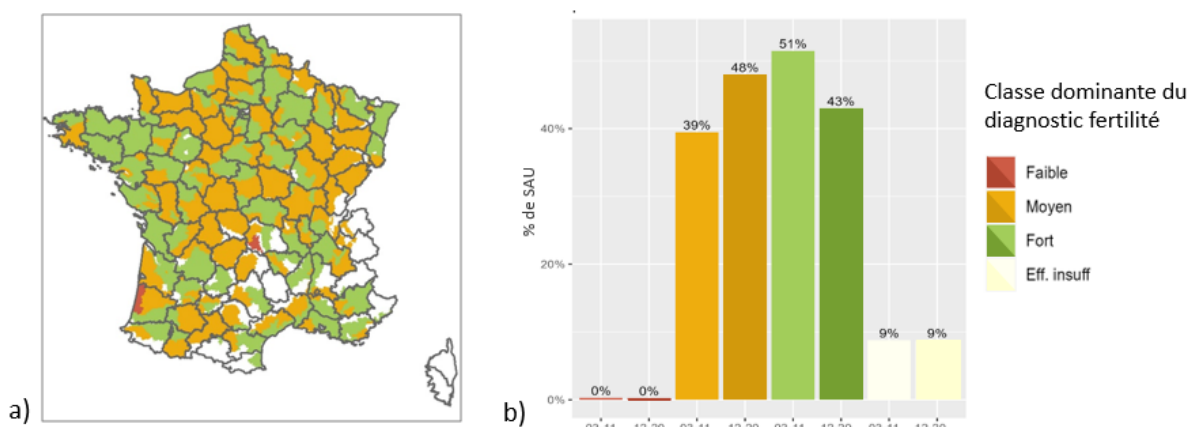


Figure 9 – (a) Carte de la classe dominante du diagnostic de fertilité RegiFert® pour le K₂O par Petites Régions Agricoles sur la période 2012–2020. (b) Histogramme des classes dominantes du diagnostic RegiFert® en pourcentage de surface agricole utile (SAU) pour les périodes 2003–2011 (teintes claires) et 2012–2020 (teintes foncées) à l'échelle de la France hexagonale. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

Le magnésium échangeable

Les médianes des teneurs en MgO par PRA sur la période 2012–2020 varient majoritairement entre 100 et 300 mg/kg avec des valeurs plus fortes dans les sols développés dans les matériaux issus d'alluvions marines ou fluvi-marines (Camargue, marais Poitevin), le long de la Garonne, dans les sols issus de roches dolomitiques (Moselle, causses du Massif Central, sud-est) et de matériaux volcaniques (Figure 10a). Ces teneurs sont très faibles pour les sols sableux et acides des Landes de Gascogne et de la Sologne. Une comparaison de ces médianes avec celles de la période précédente 2003–2011 montre une augmentation significative des teneurs dans la quasi-totalité de la France hexagonale (Figure 10b). Les diminutions significatives des teneurs en MgO sont observées dans des PRA où les teneurs sont les plus faibles de France hexagonale comme dans les Landes de Gascogne (Figure 10).

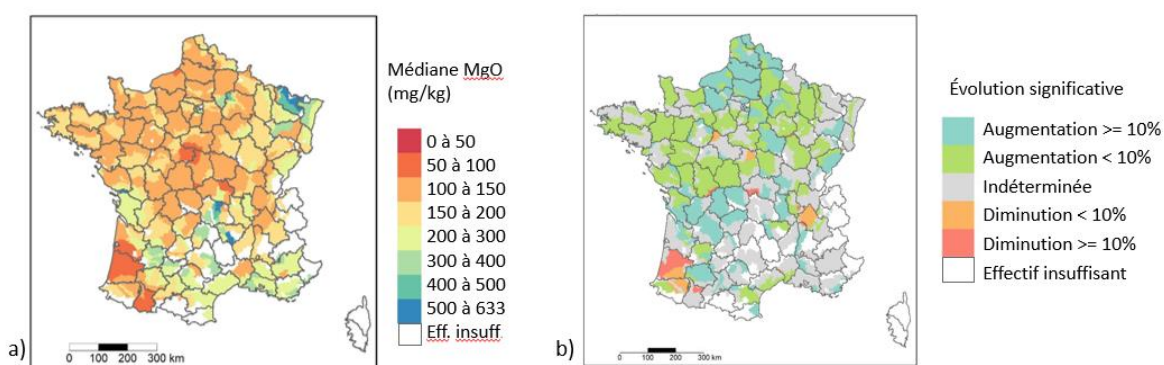


Figure 10 – Cartes représentant (a) les médianes des teneurs en MgO par Petites Régions Agricoles sur la période 2012–2020 et (b) l'évolution significative de ces médianes par Petites Régions Agricoles entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

L'interprétation agronomique des teneurs en MgO indique que la grande majorité des PRA a la classe de fertilité moyenne ou forte comme dominante (Figure 11a). Une comparaison de ces classes

dominantes avec celles de la période 2003–2011 indique une augmentation de classe de fertilité, avec un transfert de 3% de la SAU d’une classe dominante moyenne à une classe forte (Figure 11b). Il ne semble pas y avoir d’enjeu particulier sur le magnésium en terme de fertilité au niveau hexagonal.

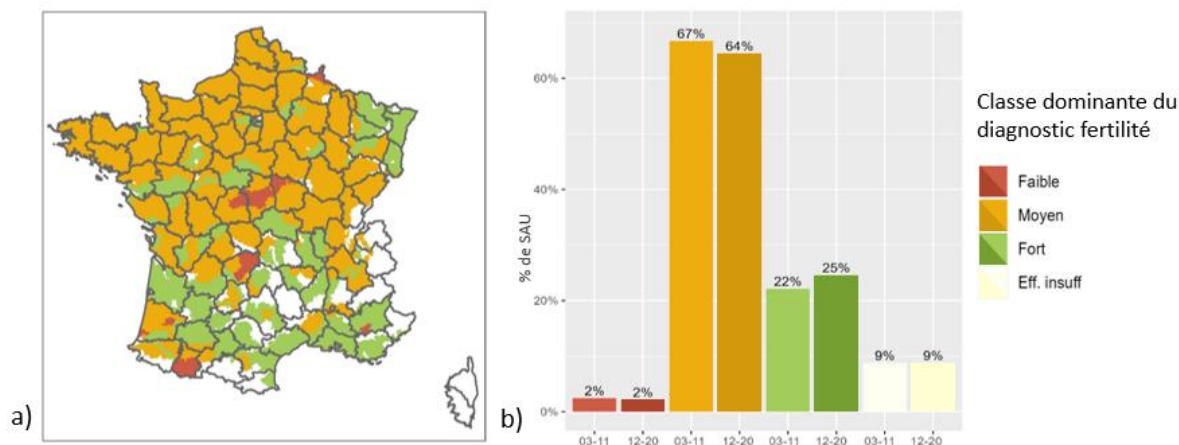


Figure 11 – (a) Carte de la classe dominante du diagnostic de fertilité RegiFert® pour le MgO par Petites Régions Agricoles sur la période 2012–2020. (b) Histogramme des classes dominantes du diagnostic RegiFert® en pourcentage de surface agricole utile (SAU) pour les périodes 2003–2011 (teintes claires) et 2012–2020 (teintes foncées) à l’échelle de la France hexagonale. Eff. insuff : effectif insuffisant pour caractériser la Petite Région Agricole.

Conclusion et recommandations

Les tendances générales d’évolution des sols agricoles de France hexagonale montrent une augmentation du pH et des teneurs en Mg et une diminution des teneurs en K, mais surtout en P. Les teneurs en P équivalent Olsen, K et Mg échangeables dans les sols semblent dépendre principalement des caractéristiques des sols (texture, nature minéralogique des matériaux parentaux). Les évolutions temporelles observées pour le P équivalent Olsen et le K échangeable semblent quant à elles dépendre de facteurs économiques (prix de l’énergie et des engrais en augmentation), de la présence plus ou moins importante d’élevage et de recommandations à la baisse pour les calculs de dose dans une démarche de fertilisation raisonnée. Les diagnostics agronomiques mettent en évidence une variation des effectifs des trois classes de fertilité, y compris pour le phosphore, mais qui reste limitée. Autrement dit, les évolutions constatées en éléments n’impactent pas fortement les préconisations de fertilisation, au niveau hexagonal. Cependant, les évolutions de la fertilité chimique mises en évidence sur les trente dernières années vont dans le même sens que les tendances observées sur les teneurs en éléments : diminution pour le P et le K, augmentation pour le Mg. Elles incitent donc à la vigilance pour P et K et justifient le suivi des bilans minéraux à la parcelle agricole et une politique de suivi analytique régulier et raisonné des terres.

Ces premiers résultats issus de la période la plus récente de la BDAT pourraient être complétés par une étude des équilibres entre les éléments, afin de fournir un état complet de la fertilité des sols agricoles en France hexagonale. En effet, au-delà des teneurs, l’absorption des éléments minéraux par les plantes dépend largement des équilibres cationiques. Par exemple, le fait que les teneurs en K et en Mg évoluent en sens inverse a des implications sur la stœchiométrie de ces éléments dont les conséquences devront être évaluées. L’étude de la variabilité des situations au sein des PRA est également une perspective d’étude. En effet, une situation médiane peut masquer une grande diversité de situations au sein des PRA, qui aura des implications en termes de diagnostic et éventuellement d’actions territoriales.

Ce travail financé par le Ministère en charge de l’Agriculture et coordonné par le Groupement scientifique Sol démontre l’importance de collecter et rassembler de façon continue ces informations produites dans un cadre individuel pour le pilotage des parcelles afin de les réutiliser dans un cadre

général et produire des résultats sur les distributions statistiques des indicateurs de la fertilité des sols agricoles. Cependant, ces résultats sont à manier avec précaution du fait que la répartition des échantillons analysés sur le territoire national ne résulte pas d'un échantillonnage probabiliste. Ce sont les agriculteurs qui décident des parcelles qu'ils font analyser. Ainsi, il n'est pas possible d'exclure des biais liés au mode de collecte des données, et ce malgré les procédures statistiques mises en œuvre. Par ailleurs, ces résultats montrent des tendances à l'échelle d'entités administratives relativement larges (PRA), et les résultats présentés à cette résolution n'autorisent pas une extrapolation à une échelle plus précise que le 1/250 000. Enfin, la méthodologie employée dans ce travail avait pour objectif de mettre en évidence des tendances d'évolution des teneurs et des classes de fertilité. Elle ne doit pas être utilisée pour une interprétation « locale », plus précise que le 1/250 000. En conséquence, ces résultats ne doivent pas être utilisés pour gérer la fertilisation spécifique des parcelles agricoles. L'analyse de terre par zone homogène au niveau parcellaire reste la seule source d'information valable pour raisonner la fertilisation dans le cadre de la méthode COMIFER.

Références bibliographiques

- Denoroy, P., Dubrulle, P., Villette, C., Colomb, B., Fayet, G., Shoenser, M., Pellerin, S., Pellerin, F., Boiffin, J., 2004. RegiFert, interpréter les résultats des analyses de terre, Techniques et pratiques. INRA, Paris.
- Follain, S., Schwartz, C., Denoroy, P., Villette, C., Saby, N.P., Arrouays, D., Lemercier, B., Walter, C., 2009. A method for assessing available phosphorus content in arable topsoils over large spatial scales. *Agronomy for sustainable development* 29, 371–379. <https://doi.org/10.1051/agro:2008046>
- Hu, B., Bourennane, H., Arrouays, D., Denoroy, P., Lemercier, B., Saby, N.P.A., 2021. Developing pedotransfer functions to harmonize extractable soil phosphorus content measured with different methods: A case study across the mainland of France. *Geoderma* 381, 114645. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114645>
- Saby, N., Gouny, L., Lemercier, B., Denoroy, P., Eveillard, P., 2016. Utilisation des données de la BDAT pour étudier l'évolution spatio-temporelle des teneurs en Magnésium échangeable, Potassium échangeable et Phosphore extractible dans les sols agricoles de France métropolitaine, 89 p.