



HAL
open science

**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**

Nicolas Saby, Laëtitia Gouny, Blandine Lemerrier, Pascal Denoroy, Philippe
Eveillard

► **To cite this version:**

Nicolas Saby, Laëtitia Gouny, Blandine Lemerrier, Pascal Denoroy, Philippe Eveillard. 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. [Contrat] auto-saisine. 2016. hal-01581567

HAL Id: hal-01581567

<https://hal.science/hal-01581567>

Submitted on 4 Sep 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**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**



Juillet 2016

Rapport final

Convention de recherche 32000742 INRA UNIFA

Nicolas Saby et Laëtitia Gouny

Avec la collaboration de

Blandine Lemerrier, Pascal Denoroy et Philippe Eveillard

TABLE DES MATIERES

Acronymes, définitions et sigles.....	4
Résumé.....	6
Résumé étendu	7
I. Introduction.....	22
II. Matériel et méthodes.....	25
A. Le groupe projet	25
B. La BDAT.....	25
1. La collecte sous l'égide du GIS Sol.....	25
2. Description des jeux de données pour les différents éléments et diagnostic des effectifs..	26
C. Calcul d'un indicateur P équivalent Olsen.....	32
1. Méthode.....	32
2. Règle de calcul de l'équivalent P Olsen	32
D. Interprétation agronomique des teneurs en P, K et Mg	39
1. L'interprétation agronomique.....	39
2. Mise en œuvre de la méthode Regifert	40
3. Application aux données de la BDAT	41
E. Outils d'analyses spatiale et temporelle	41
1. Principe.....	41
2. Algorithme de simulation d'échantillonnage non biaisé.....	41
3. Inférence statistique et calcul d'indicateurs	43
F. Synthèse nationale	44
G. Démarche générale	46
III. Résultats	48
A. Statistiques sommaires nationales par période temporelle	48
B. Analyse spatiotemporelle des données du potassium échangeable K_2O	50
1. Evolution des teneurs.....	50
2. Interprétation agronomique par RegiFert®	52
C. Analyse spatiotemporelle des données du magnésium échangeable : MgO	54
1. Evolution des teneurs.....	54
2. Interprétation agronomique par RegiFert®	56
D. Analyse spatiotemporelle des données du phosphore assimilable	58
1. Analyse pour les 3 méthodes prises indépendamment.....	58

2.	Analyse à partir du Phosphore dit équivalent Olsen.....	60
	Evolution des teneurs.....	60
1.	Interprétation agronomique par RegiFert®.....	62
E.	Synthèse Régionale	64
1.	K ₂ O.....	64
2.	MgO.....	66
3.	P ₂ O ₅ équivalent Olsen.....	68
F.	Synthèse nationale	70
G.	Commentaire de synthèse	70
1.	Le K ₂ O	70
2.	Le MgO	71
3.	Le P ₂ O ₅ équivalent Olsen.....	72
4.	Discussion	73
IV.	Conclusions.....	75
V.	Bibliographie.....	77
VI.	Annexes	78
A.	Règle d'interprétation de l'évolution de la répartition en classes de fertilité.....	78
B.	Relation entre les méthodes P	81
C.	Résultats à l'échelle cantonale	82
D.	Carbone	85
E.	K/CEC.....	86
F.	Mg/CEC.....	87
G.	CEC.....	88
H.	Synthèse de l'évolution de la fertilité (avec le nombre d'hectares par type d'évolution).....	89

Acronymes, définitions et sigles

BDAT : Base de Données d'Analyses de Terre

CEC : Capacité d'Echange Cationique, ici mesurée par la méthode « de Metson » (norme AFNOR NF X 31-130)

COMIFER : Comité français d'études et de développement de la fertilisation raisonnée

pH : potentiel Hydrogène

RegiFert : « Références Régionales et Fertilisation ») logiciel qui permet d'interpréter les résultats d'analyses de terre (hors azote) pour une fertilisation raisonnée.

UNIFA : Union des Industries de la Fertilisation

USD : unité spatiale de décision : correspond à l'unité administrative au sein de laquelle sont effectués les calculs d'évolution.

Classe de disponibilité en élément fertilisant :

Dans l'interprétation de l'analyse de terre, classe de diagnostic basée sur la comparaison de la teneur analytique de l'échantillon, à des valeurs de référence « limites de classe » (cf. partie I.D)

Médiane : la valeur qui permet de partager une série numérique ordonnée en deux parties de même nombre d'éléments. Elle se distingue de la moyenne sauf en cas de distribution exactement symétrique.

Phosphore Dyer, Phosphore Joret-Hébert, Phosphore Olsen : teneur des terres en phosphore extrait par une des méthodes « Dyer » (norme AFNOR NF X 31-160), « Joret-Hébert » (norme AFNOR NF X 31-161), ou « Olsen » (norme NF ISO 11263)

Potassium échangeable, magnésium échangeable : teneur des terres en potassium ou magnésium échangeable par la méthode à l'acétate d'ammonium (norme AFNOR NF X 31-108)

Phosphore équivalent Olsen : indicateur calculé dans ce rapport pour exprimer une analyse de P extractible faite par méthode Joret-Hébert ou Dyer, en la valeur de P extractible par méthode Olsen qui devrait être obtenue sur le même échantillon. Cette valeur estimée permet de combiner dans une même analyse statistique ou représentation plusieurs mesures en P issues de différentes méthodes analytiques (Joret-Hébert et Dyer). Le calcul se base sur une règle de pédotransfert basée sur la teneur en P extractible (Joret-Hébert ou Dyer) et le pH. (cf. partie I.C)

Test de Mann et Whitney : Test statistique non paramétrique permettant de tester la différence des rangs de deux échantillons.

Symboles chimiques

K : Potassium

K₂O : Oxyde de Potassium : formulation conventionnelle et légale (n'ayant pas de réalité chimique) utilisée pour exprimer la teneur en K d'une terre ou d'un engrais. Pour une terre, forme d'expression de la teneur en Potassium échangeable

Mg : Magnésium

MgO : Oxyde de Magnésium (Magnésium échangeable) ; cf. ci-dessus pour oxyde de potassium

P : Phosphore

P₂O₅ : Pentoxyde de Phosphore; cf. ci-dessus pour oxyde de potassium. Pour une terre, forme d'expression de la teneur en phosphate (PO₄) extractible.

Résumé

La convention n°32000742 entre l'UNIFA et l'INRA a encadré le projet d'utilisation des données issues 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. Ce rapport rassemble les résultats et conclusions de cette étude qui avait pour objectif de répondre aux **deux questions** suivantes posées par l'UNIFA :

1. Comment mettre en place un diagnostic sur l'évolution de trois paramètres de fertilité des sols agricoles français : Magnésium échangeable, Potassium échangeable et Phosphore extractible sur la période 1990-2014 ?
2. En identifier les conséquences sur la disponibilité de ces éléments pour les cultures.

Nous avons construit notre réponse en étudiant l'évolution de ces paramètres dans une comparaison de jeux de données regroupés selon les périodes avant et après 2004.

Un nombre important de résultats (cartes, graphiques et tableaux) a été produit durant cette étude.

D'une part, des cartes permettant de comparer l'évolution des teneurs du potassium, du magnésium et du phosphore par canton et par petite région agricole avant et après 2004, ont été réalisées.

Celles-ci ont mis en lumière des évolutions de teneurs contrastées selon les régions et les paramètres étudiés.

Ainsi, l'évolution des teneurs potassium est indéterminée sur une majorité des zones agricoles en France sauf en régions Bretagne, Normandie, Centre et Lorraine où on note une diminution significative des teneurs après 2004. Concernant les teneurs en magnésium, c'est plutôt une augmentation qui est remarquée sur les régions Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Champagne-Ardenne, Limousin et Bretagne. Les teneurs en phosphore ont diminué dans une majorité de petites régions agricoles réparties en région Centre, Bretagne, Normandie, Picardie, Champagne-Ardenne, Lorraine et Bourgogne.

Les cartes illustrant le diagnostic de disponibilité en élément nutritif P, K et Mg (fertilité chimique) montrent une tendance similaire à l'évolution des teneurs à savoir une dégradation du diagnostic de disponibilité en K localisée dans les régions du centre-ouest, une amélioration de ce diagnostic en Mg dans les régions du nord-est de la France et enfin une dégradation du diagnostic de disponibilité en phosphore dans beaucoup de régions françaises.



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 métropolitaine¹

Résumé

L'UNIFA et l'INRA ont signé une convention pour étudier l'évolution spatio-temporelle des teneurs en magnésium échangeable, potassium échangeable et phosphore extractible pour les données stockées dans la Base de Données d'Analyses de Terre entre 1990 et 2014. Ce travail visait à répondre aux **deux questions** suivantes posées par l'UNIFA :

1. Comment mettre en place, à partir de la BDAT, un diagnostic sur l'évolution de trois paramètres de fertilité des sols agricoles français sur la période 1990-2014 ;
2. En identifier les conséquences sur la disponibilité de ces éléments pour les cultures à l'échelle des petites régions agricoles.

Quelles données ?

Les résultats d'analyses collectés dans le cadre de ce programme proviennent d'analyses de terres effectuées majoritairement à la demande des agriculteurs. Les résultats sont issus des bases de données de laboratoires d'analyses agréés par le Ministère en charge de l'Agriculture et dont la liste figure dans un arrêté annuel publié au journal officiel. Les laboratoires utilisent les mêmes méthodes d'analyse normalisées permettant les comparaisons. Cette base permet de disposer à ce jour de plus de deux millions de résultats pour chaque paramètre objet de cette étude, répartis à parts à peu près égales sur les périodes avant et après 2004.

Quelles méthodes ?

Nous avons construit notre réponse en étudiant l'évolution de ces paramètres dans une comparaison de jeux de données regroupés selon les périodes avant et après 2004.

¹ Gouny L., Saby NPA, Denoroy P., Lemercier B., Eveillard P. 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. 2016. Rapport convention UNIFA Inra Gis Sol,89p

Pour mobiliser l'ensemble des analyses en phosphore extractible issues des différentes méthodes (Joret-Hébert, Dyer et Olsen) dans le diagnostic spatio temporel, nous avons construit un indicateur appelé « *P équivalent Olsen* » basé sur l'établissement d'une fonction de pédotransfert. Celle-ci utilise le pH et la valeur en P mesurée par la méthode Joret-Hebert ou la méthode Dyer, afin d'estimer la teneur en P « Olsen » qu'aurait le même échantillon. Ceci permet d'homogénéiser toutes les valeurs analytiques disponibles dans la BDAT, sur la base de l'analyse Olsen.

Le diagnostic spatio-temporel a été conduit en appliquant des tests statistiques à l'échelle de deux niveaux d'unité spatiale de décision (USD) : cantons et petites régions agricoles (PRA). Un algorithme spécifique générant des séries de sous-échantillonnages des données brutes et synthétisant les statistiques a été construit afin de tenir compte des biais possibles issus du mode de collecte de la donnée, la répartition spatiale des échantillons pouvant varier entre années. Le diagnostic a été établi sur l'évolution des teneurs puis également sur des interprétations en classe de disponibilité en élément fertilisant issues de l'adaptation de la méthode RégiFert® aux données de la base BDAT.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes traduisant les états et évolutions de disponibilité des trois éléments étudiés. Nous avons également produit des synthèses nationales et régionales des résultats tenant compte des surfaces agricoles utiles (SAU) à l'échelle des petites régions agricoles (PRA).

Quels résultats ?

Ce travail a permis de produire un ensemble de cartes, graphiques et tableaux permettant de décrire l'organisation et la variabilité spatiale des paramètres agronomiques retenus en teneurs et pour les deux périodes concernées. L'état initial est fourni dans les cartes de la figure 1 de ce résumé. Ces cartes permettent d'appréhender la grande variété des situations contenues dans la base BDAT. Ils fournissent ainsi un éclairage sur l'état moyen des réserves en éléments nutritifs P, K et Mg accessibles aux plantes dans les sols agricoles d'après la médiane calculée par PRA. En deuxième lieu, ce travail a permis de produire des résultats sur l'ampleur et la significativité statistique de l'évolution des teneurs (figures1).

Le lecteur découvrira également des cartes illustrant les états et les évolutions du diagnostic de disponibilité en élément nutritif (figures 2, 3, 4). On note plutôt une dominance des classes de fertilité moyenne et forte pour les 3 éléments sur une grande partie des parcelles analysées. Ces cartes de diagnostic sont dans leurs grandes lignes similaires aux cartes de teneur des sols, bien que les seuils de diagnostics varient avec les propriétés des sols.

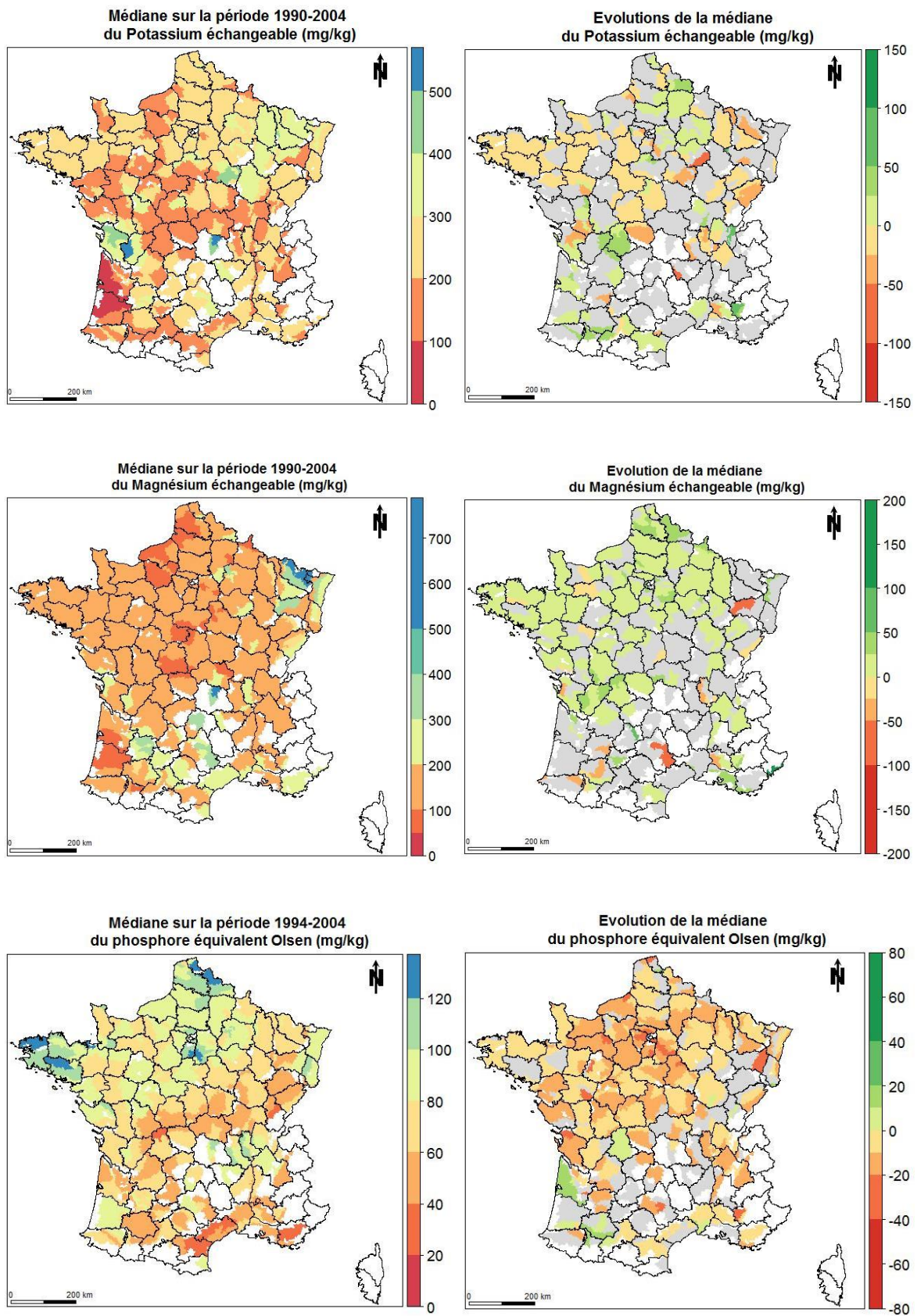


Figure 1 : carte de la médiane des teneurs par PRA sur la période 1994-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite) pour les éléments (exprimés en oxydes) K₂O, MgO et P₂O₅ équivalent olsen

Le potassium : L'analyse temporelle montre des situations bien différentes. On note une diminution de la disponibilité en potassium localisée dans les régions du Centre et de l'Ouest (figure 2). Cependant, ces évolutions sont limitées et une large part des sols reste dans des catégories de disponibilité en K satisfaisante pour la plupart des cultures. Ce travail met en évidence une augmentation en magnésium échangeable dans les régions du Nord-Est de la France. Mais les évolutions sont ici également limitées, avec des contrastes inter-régionaux forts.

Le magnésium Une large part des sols reste dans des catégories de disponibilité en Mg satisfaisante pour la plupart des cultures (figure 3). Les zones de faible fertilité semblent se résorber.

Le Phosphore : Par contre, des diminutions assez importantes de la disponibilité en phosphore dans beaucoup de régions françaises sont observables notamment sur la figure 4. Les contrastes inter-régionaux restent forts. Les zones à très forte disponibilité diminuent au profit de la classe de disponibilité intermédiaire, ce qui n'est pas un problème si cette disponibilité est surveillée. L'augmentation des surfaces de faible fertilité P, probablement en lien avec une réduction importante des apports par les engrais minéraux, peut-être plus préoccupante.

Toutefois, du fait des effets de seuil liés à la procédure de diagnostic, les évolutions de diagnostic ne sont pas aussi nettes que les évolutions de teneur, en particulier pour P. On peut noter enfin que l'utilisation de trois classes de fertilité implique des effets de seuil importants. Il faut une évolution forte de la teneur pour entraîner un changement de répartition des classes au sein de l'USD.

Synthèse régionale : Considérant la synthèse exprimée en surface agricole utile (SAU) par ancienne région administrative, l'évolution des teneurs en potassium fait apparaître des évolutions contrastées sur une majorité des zones agricoles en France sauf en régions Bretagne, Normandie, Centre et Lorraine où on note une diminution significative des teneurs dans la période après 2004 relativement à la période précédente (figure 4). Concernant les teneurs en magnésium c'est plutôt une augmentation qui est remarquée sur les régions Nord-Pas-de Calais, Picardie, Champagne-Ardenne, Limousin, et Bretagne. A l'inverse, les teneurs en phosphore ont diminué dans une majorité de petites régions agricoles réparties dans toutes les anciennes régions administratives et en particulier en régions Centre, Bretagne, Normandie, Picardie, Champagne-Ardenne, Lorraine, Bourgogne.

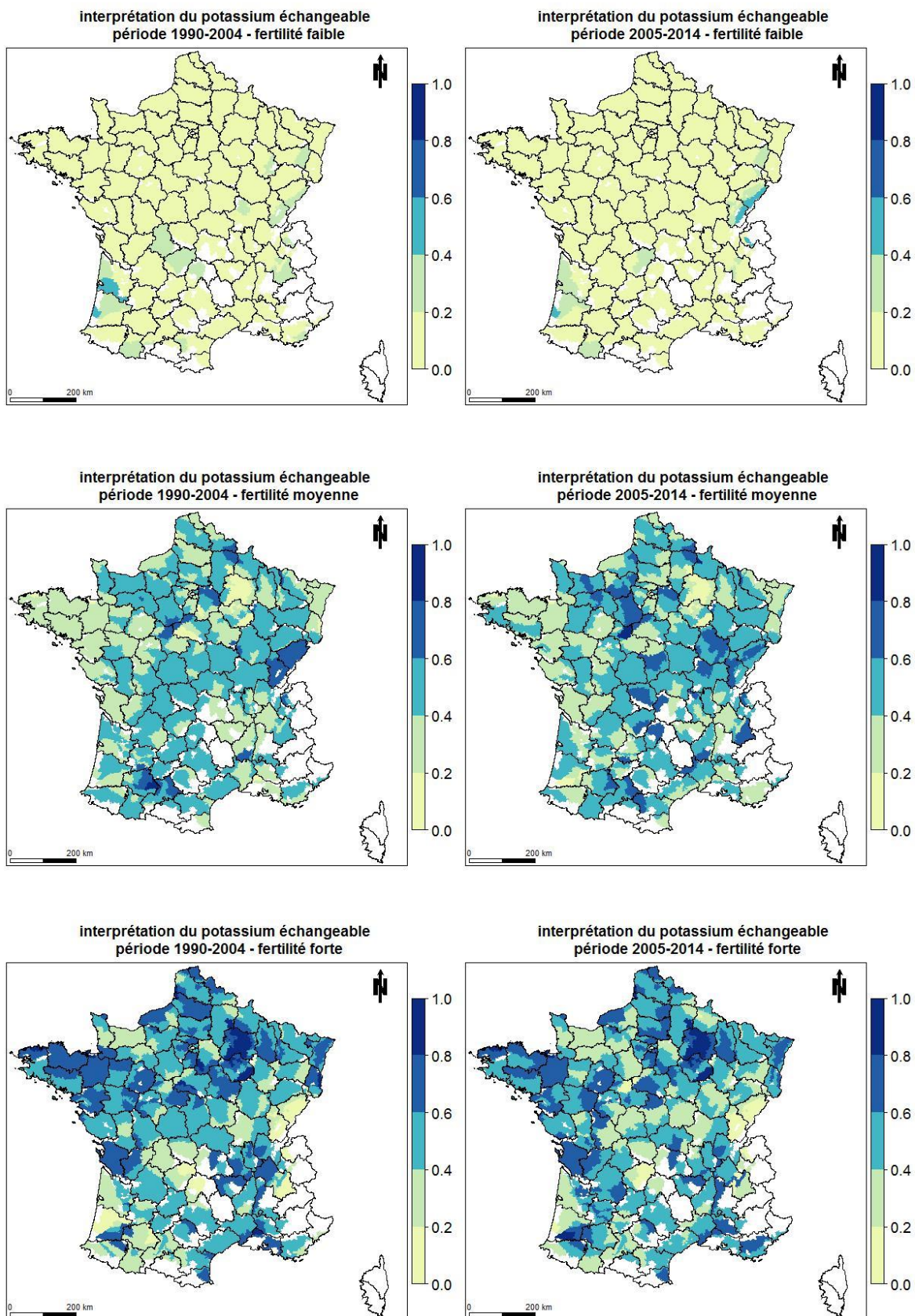


Figure 2 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en potassium échangeable fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle

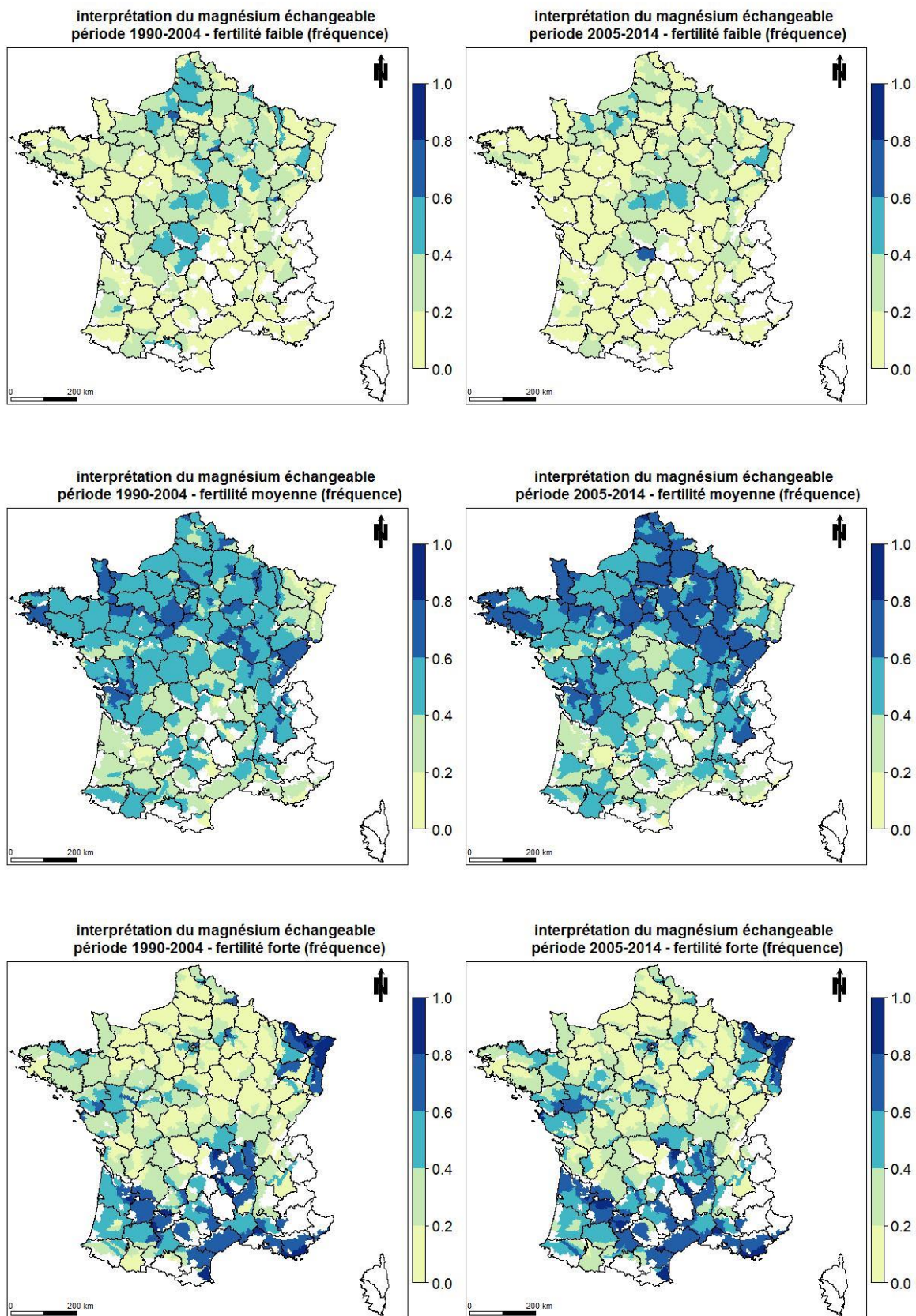


Figure 3 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en magnésium échangeable fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle

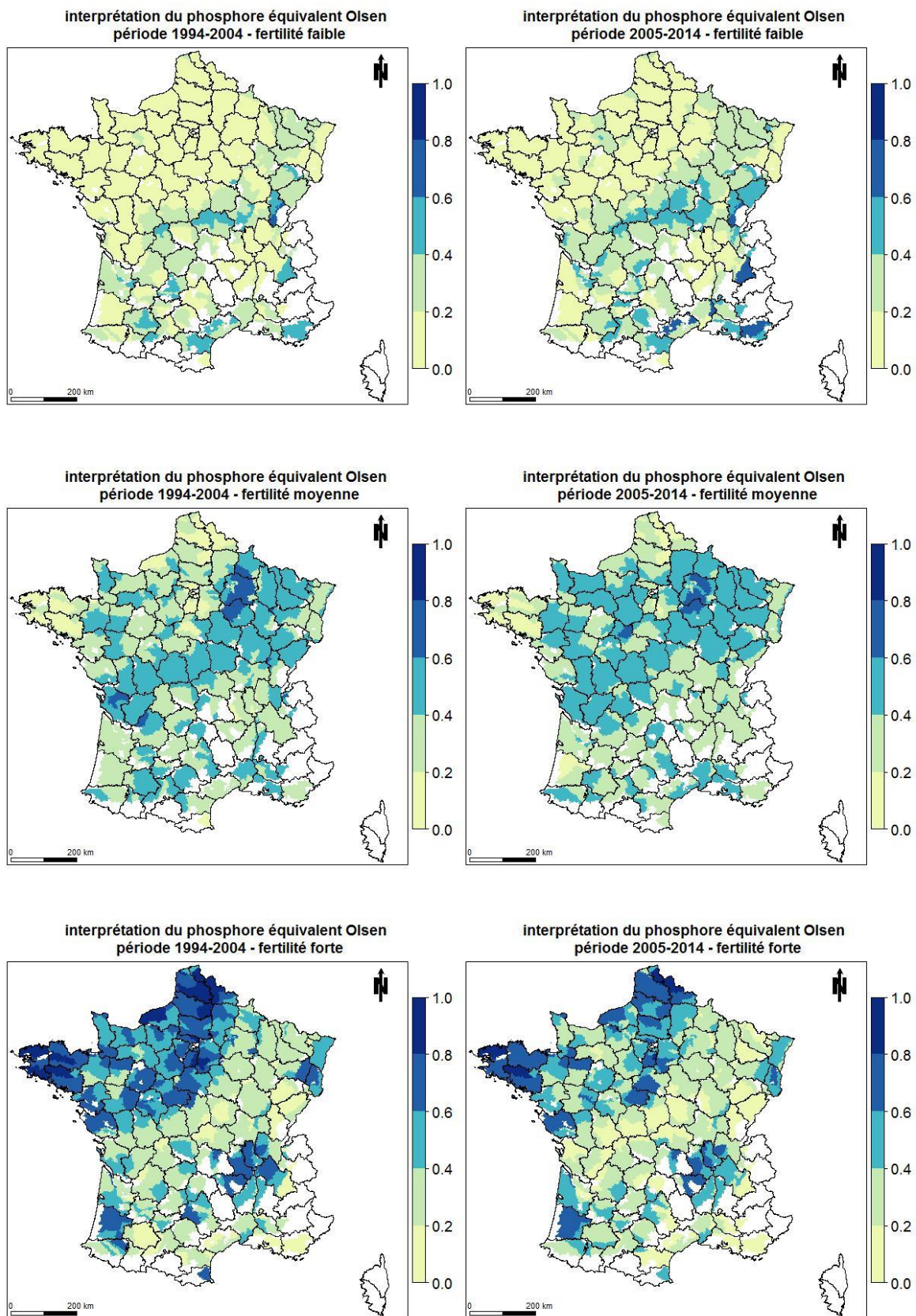


Figure 4 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en phosphore équivalent Olsen fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle

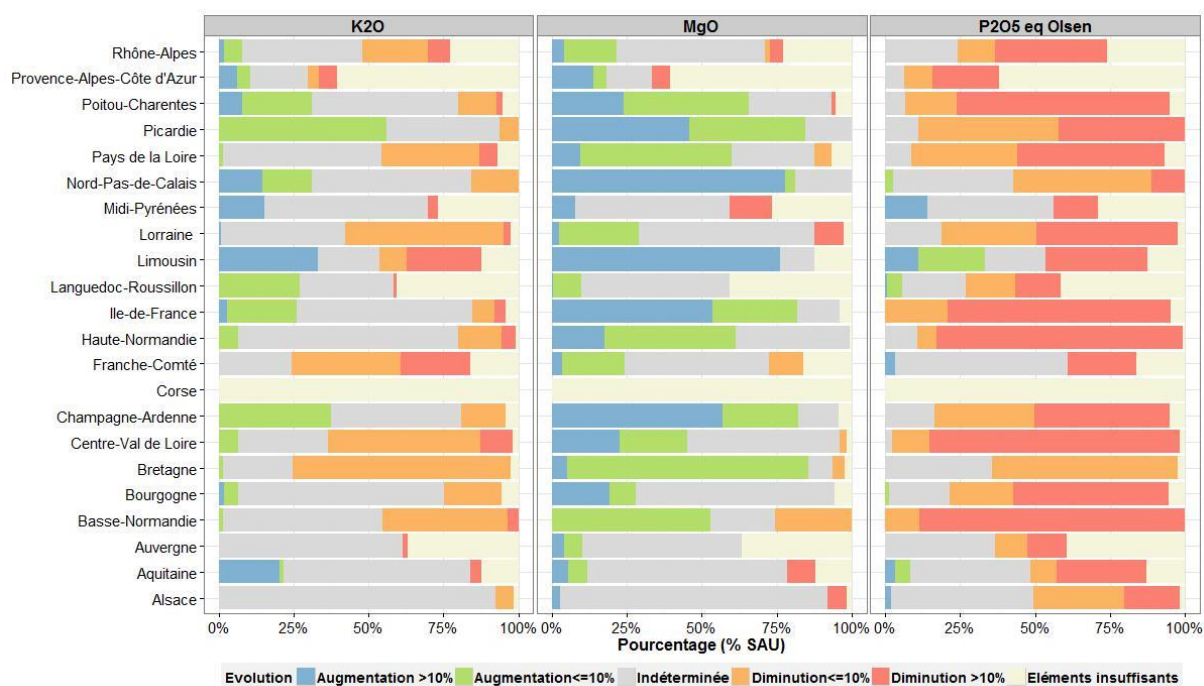


Figure 5 : Synthèse en pourcentage de la SAU par région de l'évolution des teneurs en potassium échangeable (K2O), magnésium échangeable (MgO) et phosphore équivalent Olsen (P2O5 équivalent Olsen) ; Détails de la légende : augmentation significative > 10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation significative <= 10% par rapport à la première période, évolution indéterminée, diminution significative <= 10% par rapport à la première période, diminution significative >10% et « Eléments insuffisants » signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test de comparaison des teneurs entre les 2 périodes.

La répartition sur le territoire national des échantillons analysés ne résulte pas d'un échantillonnage probabiliste. Ce sont les agriculteurs qui décident des parcelles qu'ils font analyser. Il n'est pas possible d'exclure ainsi des biais liés au mode de collecte et ce, malgré les procédures statistiques mises en œuvre. Il importe également de prendre connaissance de la répartition des échantillons à partir de la carte des effectifs correspondante avant de tirer des conclusions sur les sols agricoles dans leur ensemble. Par ailleurs, les résultats présentés à l'échelle de la PRA ou du canton n'autorise 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 de la teneur et des classes de fertilité. Elle ne doit pas être utilisée pour une interprétation « locale ». L'analyse de terre par zone homogène au niveau parcellaire reste la seule qui peut être utilisée pour un raisonnement d'apport de ces éléments nutritifs dans le cadre de la méthode COMIFER.

Liste des tableaux

Tableau 1 : effectif de résultats d'analyse par type de données et groupe (jeu) de données en distinguant les données avant et après 2004	26
Tableau 2 : Indicateurs renseignant sur la « qualité » des modèles de régression mises en œuvre. RMSE = racine de l'erreur quadratique moyenne ; R^2 = coefficient de détermination linéaire.....	36
Tableau 3 : Statistiques élémentaires des données mobilisées exprimées en mg.kg-1.....	48
Tableau 4 : tableau résumant le % de SAU par type d'évolution en teneurs entre les 2 périodes (avant et après 2004) pour chaque paramètre étudié	70
Tableau 5 : tableau résumant le % de SAU par type d'évolution en classes de disponibilité en élément nutritif interprétées par RegiFert® entre les 2 périodes (avant et après 2004) pour chaque paramètre étudié.....	70
Tableau 6 : Règle d'interprétation de l'évolution de la répartition en classes de fertilité.....	78
Tableau 7 : Variation de la médiane du rapport Dyer/Olsen avec le pH et la CEC (en haut à gauche de chaque cellule est noté le nombre de résultats correspondant)	81
Tableau 8 : Variation de la médiane du rapport Joret/Olsen avec le pH et la CEC (en haut à gauche de chaque cellule est noté le nombre de résultats correspondant)	81
Tableau 9 : tableau de synthèse de l'évolution de la fertilité (avec le nombre d'hectares de SAU par type d'évolution)	89

Liste des figures

Figure 1 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole (PRA) disposants d'un résultat pour le potassium échangeable (jeu de données A), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).....	27
Figure 2 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole avec un résultat pour le magnésium échangeable (jeu de donnée B), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).....	28
Figure 3 : Part des analyses de phosphore assimilable réalisées par chacune des méthodes analytiques par année	29
Figure 4 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole avec un résultat pour le phosphore extrait par la méthode Dyer (jeu de données C) comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; , échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).....	30
Figure 5 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole avec un résultat pour le phosphore extrait par la méthode Joret (jeu de données D), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).....	30
Figure 6 : Nombre d'analyses par PRA pour le phosphore extrait par la méthode Olsen (jeu de données E), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).	31

Figure 7 : Relation entre les résultats P Olsen et P Dyer. Les boxplots sont calculés sur les données P Olsen regroupées par classes croissantes de 20 mg/kg ⁻¹ de P Dyer	33
Figure 8 : Relation entre les résultats P Olsen et P Joret-Hébert. Les boxplots sont calculés sur les données P Olsen regroupées par classes croissantes de 20 mg/kg ⁻¹ de P Joret-Hébert....	34
Figure 9 : Valeurs de phosphore équivalent Olsen estimées à partir de mesures Dyer (à gauche) et Joret-Hébert (à droite) en fonction des valeurs en P Olsen mesurées.....	35
Figure 10 : Cartes des médianes cantonales des résidus statistiques issues de la différence entre les teneurs en P observées et celles modélisées pour le P Joret-Hébert,(à partir du jeu de données F).....	37
Figure 11 : Cartes des médianes cantonales des résidus statistiques issues de la différence entre les teneurs en P observées et celles modélisées pour le P Dyer (à partir du jeu de données F).....	38
Figure 12 : Nombre d'échantillons par PRA permettant d'obtenir une valeur de phosphore équivalent Olsen (mesurée ou estimée) (jeu de données G), comparaison avant/après 2004	39
Figure 13 : schéma explicatif de la méthode de ré-échantillonnage.....	42
Figure 14 : Démarche générale	46
Figure 15 : Répartition (fréquence) des classes de fertilité au niveau national pour toutes les analyses en Potassium échangeable (K ₂ O), magnésium échangeable et l'indicateur phosphore équivalent Olsen, calculées pour les deux périodes.....	49
Figure 16 : Cartes des médianes des teneurs en Potassium échangeable (K ₂ O), par petite région agricole, calculées pour les deux périodes.	50
Figure 17 : Cartes d'évolution des teneurs en potassium échangeable (K ₂ O), par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.	50
Figure 18 : Carte de la médiane des teneurs en potassium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs avant/après 2004 (à droite)	51
Figure 19 : Graphique représentant les médianes par CANTON des teneurs en potassium échangeable (mg/kg) après 2004 en fonction des médianes par CANTON des teneurs en potassium échangeable (mg/kg) avant 2004 . La taille du point représente le log du rapport du nombre de données disponibles période 1 sur période 2. La couleur représente la classe d'évolution. Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, "D++"	

signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.....	51
Figure 20 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en potassium échangeable fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle.....	52
Figure 21 : Différences par PRA calculées entre les pourcentages après 2004– avant 2004 par classe de disponibilité en potassium échangeable faible, moyenne et forte,.....	53
Figure 22 : Cartes d'évolution de la répartition des classes de disponibilité en potassium échangeable (K ₂ O) fournies par RegiFert®, par petite région agricole, comparaison après/avant 2004. Concernant le résultat du test, "A" signifie augmentation de la disponibilité en potassium par rapport à la première période, "S" signifie stable la répartition des classes est inchangée même si les % par classe de disponibilité ont changé, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution de la disponibilité par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.....	53
Figure 23 : Cartes des médianes des teneurs en magnésium échangeable (MgO), par petite région agricole, calculées pour les deux périodes.	54
Figure 24 : Cartes d'évolution des teneurs en magnésium échangeable (MgO), par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.	54
Figure 25 : médiane des teneurs en magnésium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane avant/après 2004 (à droite)	55
Figure 26 : Graphique représentant les médianes par CANTON des teneurs en magnésium échangeable (mg/kg) après 2004 en fonction des médianes par CANTON des teneurs en magnésium échangeable (mg/kg) avant 2004	55
Figure 27 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en magnésium échangeable fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle.....	56
Figure 28 : Différences par PRA calculées entre les pourcentages après 2004– avant 2004 par classe de disponibilité en magnésium échangeable faible, moyenne et forte.....	57
Figure 29 : Cartes d'évolution de la répartition des classes de disponibilité en magnésium échangeable fournies par RegiFert® entre les 2 périodes par petite région agricole, comparaison avant/après 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 . Concernant le résultat du test, "A" signifie augmentation de la disponibilité en magnésium par rapport à la première période, "S" signifie stable l'ordre des classes est inchangé même si les % par classe de disponibilité ont changé, "I" signifie	

évolution indéterminée, "D" signifie diminution de la disponibilité par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test..... 57

Figure 30 : Cartes d'évolution pour le phosphore extrait par la méthode Dyer Exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par PRA par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test..... 58

Figure 31 : Cartes d'évolution pour le phosphore extrait par la méthode Olsen Exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par PRA par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test..... 59

Figure 32 : Cartes d'évolution pour le phosphore extrait par la méthode Joret-Hébert Exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par PRA. Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test 59

Figure 33 : Cartes des médianes des teneurs en phosphore équivalent Olsen exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par petite région agricole, calculées pour les deux périodes..... 60

Figure 34 : cartes d'évolution des teneurs pour le phosphore équivalent Olsen (à gauche : le résultat du test d'évolution) et à droite : l'évolution de la médiane des teneurs entre les 2 périodes). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test..... 60

Figure 35 : carte de la médiane des teneurs par PRA sur la période 1994-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite)..... 61

Figure 36 : Comparaison des teneurs médianes par canton avant 2004 et après 2004, pour le phosphore équivalent Olsen (mg/kg) 61

Figure 37 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en phosphore équivalent Olsen fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle	62
Figure 38 : Différences par PRA calculées entre les pourcentages après 2004– avant 2004 par classe de disponibilité en phosphore équivalent Olsen faible, moyenne et forte	63
Figure 39 : Cartes d'évolution de la répartition des classes de disponibilité en phosphore équivalent Olsen fournies par RegiFert® entre les 2 périodes. Concernant la légende : "A" signifie augmentation de la disponibilité en phosphore par rapport à la première période, "S" signifie stable l'ordre des classes est inchangé même si les % par classe de disponibilité ont changé, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution de la disponibilité par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.....	63
Figure 40 : Synthèse en surface agricole utile par région des différentes classes d'évolution des teneurs en K ₂ O échangeable : augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, " évolution indéterminée, diminution des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Eléments insuffisants" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.	64
Figure 41 : Synthèse en surface agricole utile par région de l'évolution de la disponibilité en potassium (évolution de la répartition dans les trois classes de fertilité {faible, moyenne, forte})	65
Figure 42 : Synthèse en surface agricole utile par région des différentes classes d'évolution des teneurs en MgO échangeable : augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, " évolution indéterminée, diminution des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Eléments insuffisants" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test	66
Figure 43 : synthèse régionale de l'évolution de la disponibilité en magnésium (synthèse de la répartition dans les trois classes de fertilité {faible, moyenne, forte}).....	67
Figure 44 : Synthèse en surface agricole utile par région des différentes classes d'évolution des teneurs en phosphore équivalent Olsen : augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, " évolution indéterminée, diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Eléments insuffisants" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test..	68
Figure 45 : synthèse régionale de la disponibilité en phosphore équivalent Olsen (Synthèse en SAU par région de l'évolution de la répartition dans les trois classes de fertilité {faible, moyenne, forte})	69
Figure 46 : Résultat du test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs (à droite).....	82

Figure 47 : médiane du potassium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite).....	82
Figure 48 : Résultat du test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs (à droite).....	83
Figure 49 : médiane du magnésium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite).....	83
Figure 50 : Résultat du test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs (à droite).....	84
Figure 51 : médiane du phosphore équivalent Olsen sur la période 1994-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite).....	84
Figure 52 : évolution des teneurs en carbone organique	85
Figure 53 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane du carbone organique à la première période (à droite)	85
Figure 54 : évolution du rapport K^+/CEC (unité : mole de charge/mole de charge)	86
Figure 55 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane du rapport K^+/CEC à la première période (à droite)	86
Figure 56 : évolution du rapport Mg^{++}/CEC (unité : mole de charge/ mole de charge).....	87
Figure 57 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane du rapport Mg^{++}/CEC à la première période (à droite)	87
Figure 58 : évolution de la CEC entre les 2 périodes.....	88
Figure 59 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane de la CEC à la première période (à droite).....	88



Introduction

I. Introduction

Ce rapport fait état des travaux menés dans le cadre d'un projet conduit en collaboration entre les unités INRA Infosol (Orléans) et ISPA (Bordeaux), le Laboratoire Départemental d'Analyse et Recherche (LDAR, Laon), l'unité Sol Agro hydrosystème Spatialisation AGROCAMPUS OUEST / INRA (Rennes), le groupe PKMg de l'Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA, Paris).

Ce travail avait pour objectif d'investiguer les deux questions suivantes :

- 1- Comment mettre en place un diagnostic sur l'évolution de trois paramètres de fertilité des sols agricoles français : Magnésium échangeable, Potassium échangeable et Phosphore extractible entre les deux périodes avant et après 2004 ?
- 2- Peut-on en identifier les conséquences sur la disponibilité de ces éléments pour les cultures .

Pour y répondre, nous avons mobilisé les données issues du programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT). Ce dernier collecte auprès de laboratoires d'analyses de terre agréés par le ministère en charge de l'agriculture, sous la tutelle du GIS Sol et pour la France métropolitaine, les résultats d'analyses effectuées pour des agriculteurs (Gis Sol, 2011). Ce travail de collecte a permis de regrouper plus de 20 millions de résultats de paramètres analysés sur des échantillons de surface de sols agricoles prélevés entre 1990 et 2014. La répartition spatiale de ces échantillons (localisés à l'échelle du canton) est relativement homogène dans les principales régions agricoles françaises.

La fertilité des sols pour les cultures est couramment approchée par divers paramètres, dont la mesure des teneurs en éléments échangeables ou assimilables potassium, magnésium et phosphore. En France, il existe 3 méthodes de mesure du phosphore extractible, dit « assimilable par les plantes » qui se distinguent par leur pouvoir d'extraction, de plus en plus fort dans l'ordre suivant : P Olsen < P Joret Hébert < P Dyer. La méthode Dyer est plus utilisée en sols acides (non utilisable en sols calcaires), la méthode Joret-Hébert est surtout adaptée aux sols calcaires. La méthode Olsen tend à remplacer les deux précédents dans tous les sols. Les résultats obtenus par ces méthodes ne sont pas directement comparables dans la mesure où les valeurs analytiques obtenues sur un même échantillon de terre par deux méthodes d'extraction, ne sont pas du même ordre de grandeur. La relation entre ces valeurs change suivant le type de sol concerné, ce qui est révélateur de l'interaction chimique complexe entre l'extractant et la matrice du sol.

Les teneurs en éléments extractible (P) ou échangeable (K ou Mg) sont généralement mobilisées dans l'établissement d'un diagnostic (jugement qualitatif sur la situation) puis utilisées pour faire une préconisation quantifiée de fertilisation (dose d'élément fertilisant à apporter) à l'aide d'une méthode de raisonnement associée à un référentiel de normes. La

préconisation étant relative à un choix de culture, nous avons limité l'interprétation à un diagnostic agronomique en nous basant sur la méthode Regifert (INRA-LDAR) qui pour le diagnostic peut être considérée comme une forme simplifiée des principes COMIFER, largement utilisés en France.

Notre démarche s'articule autour de trois axes.

- a) Il nous a fallu dans un premier temps proposer une méthode pour rendre comparable les teneurs en phosphore extractible issues des différentes méthodes, surtout pour pouvoir effectuer des comparaisons temporelles, car la proportion des diverses méthodes a considérablement évolué entre les deux périodes étudiées.
- b) Ensuite, l'étude de l'évolution des teneurs en éléments nutritifs a été menée par la mise en œuvre de tests statistiques par unité spatiale correspondant à des regroupements de communes (canton ou petite région agricole PRA). Ces tests ont été effectués en comparant deux périodes (1990-2004 et 2005-2014).
- c) Enfin, nous avons mobilisé les règles d'interprétation de RegiFert pour aboutir à un diagnostic sur chaque analyse. L'évolution des diagnostics entre les périodes 1990-2004 et 2005-2014 a été étudiée de façon similaire à l'étude de l'évolution des teneurs.



©Laurine Charpentier, INRA

GisSol
GROUPEMENT
D'INTÉRÊT
SCIENTIFIQUE SOL

Matériel et Méthodes

II. Matériel et méthodes

A. Le groupe projet

Pour piloter les travaux, un groupe de travail a été constitué par les personnes suivantes :

- Philippe Eveillard (UNIFA, Paris),
- Nicolas Saby , Chloé Swiderski, Laëtitia Gouny (INRA Infosol Orléans)
- Blandine Lemerrier (AGROCAMPUS OUEST UMR-SAS, Rennes)
- Pascal Denoroy (INRA UMR ISPA –Bordeaux)
- Adhérents de l'UNIFA : Denis Jacques (MEAC), Frédéric Carnec (ICL Fertilizers), Olivier Goujard (K+S Kali), Patrick Hautefeuille (Timac Agro), Marc Lambert (Yara), Théophile Coriou (Rosier- Borealis)
- Stéphanie Sagot, François Servain (LDAR 02, Laon)

La mise en œuvre des travaux a été possible par le recrutement de Laëtitia Gouny durant 6 mois au moyen d'un financement assuré par le contrat de recherche signé avec l'UNIFA.

B. La BDAT

1. La collecte sous l'égide du GIS Sol

La BDAT est l'un des 4 grands programmes du Gis Sol, financé par le Ministère de l'Agriculture. Il s'agit de collecter et de regrouper dans une base de données unique les résultats d'analyses provenant d'analyses de terre effectuées majoritairement à la demande des agriculteurs. Les résultats sont extraits des bases de données de laboratoires d'analyses de terre ayant satisfait à une procédure d'agrément proposée par le Ministère en charge de l'Agriculture et dont la liste est fournie par arrêté publié au Journal Officiel en fin d'année civile. En moyenne, 80 % des laboratoires collaborent, ce qui représente une trentaine de partenaires sur 15 ans. Nous collectons et qualifions environ la moitié des analyses réalisées soit à peu près 125 000 sur 250 000 par an.

Deux caractéristiques de la base peuvent être soulignées ici :

- La méthode de prélèvement des échantillons à l'origine des mesures stockées dans cette base n'est pas connue en détail. Les pratiques couramment conseillées par les laboratoires consistent à prélever un échantillon composite dans une zone représentative du fonctionnement de la parcelle sur une profondeur de 25 à 30 cm depuis la surface, correspondant à la profondeur de labour donc d'homogénéisation des éléments P, K, Mg dans le sol.(AFNOR 1999, Mérelle 1998)
- La base de données ne contient qu'une indication assez floue de la position géographique de l'analyse à travers la fourniture du code INSEE de la commune d'origine de la parcelle où l'échantillon a été prélevé. Pour des raisons de confidentialité, les laboratoires ne transmettent pas les coordonnées. Certaines

analyses peuvent se retrouver localisées à la commune du siège de l'exploitation ou de la coopérative. Ces analyses ne sont pas intégrées dans la base.

Les règles d'utilisation des données issues de ce programme imposent :

1. **d'agréger** les résultats à la maille du canton ou supérieure (petite région agricole, département, région ou autre unité de taille supérieure),
2. de **disposer** de plus de 10 résultats par unité spatiale pour calculer des statistiques. Nous avons revu à la hausse ces chiffres en appliquant un seuil de 50 pour les cantons et 100 pour les PRA dans cette étude sur la base de l'expérience du LDAR (Servain & Sagot, 2014).

Les données sont collectées régulièrement auprès des laboratoires par l'unité InfoSol, qui après une première mise en forme d'homogénéisation, les envoie à AGROCAMPUS OUEST pour expertise (validation de la localisation géographique, absence de doublons, recherche de valeurs aberrantes, sélection d'horizons de surface de sols agricoles...) avant leur introduction dans la base de données nationale. Cette procédure d'expertise conduit à écarter entre 10 et 20% des analyses selon les années.

2. Description des jeux de données pour les différents éléments et diagnostic des effectifs

Ce paragraphe décrit les jeux de données construits pour la mise en œuvre de l'ensemble de la méthode. Le Tableau 1 résume les effectifs par type de mesure comme indiqué dans la suite.

Tableau 1 : effectif de résultats d'analyse par type de données et groupe (jeu) de données en distinguant les données avant et après 2004

Paramètre	Jeu de données	Nombre d'analyses		
		total	1990-2004	2005-2014
K₂O	A	2 516 743	1 330 148	1 186 595
MgO	B	2 513 694	1 327 102	1 186 592
		total	1994-2004	2005-2014
P₂O₅ Dyer	C	531 559	378 845	152 714
P₂O₅ Joret-Hébert	D	826 587	473 473	353 114
P₂O₅ Olsen	E	1 049 236	255 266	793 970
Calibration Dyer et Olsen	F 1	99 661	x	x
Calibration Joret Hébert et Olsen	F 2	114 591	x	x
P₂O₅ Olsen et équivalent Olsen	G	2 163 656	1 022 172	1 141 474

a) POTASSIUM ECHANGEABLE (K₂O)

Les teneurs en potassium échangeable sont mesurées par la méthode NF X 31 – 108 et exprimé en mg d'oxyde, noté K₂O par kg de terre sèche (mg K₂O. kg⁻¹). Nous avons mobilisé les mesures issues d'échantillons collectés entre 1990 et 2014. La répartition spatiale des analyses est assez peu homogène sur l'ensemble de la France avec une prédominance de l'Ouest. Le nombre d'échantillons par petite région agricole est souvent inférieur à 10 pour les 2 périodes sur les Alpes (figure 1).

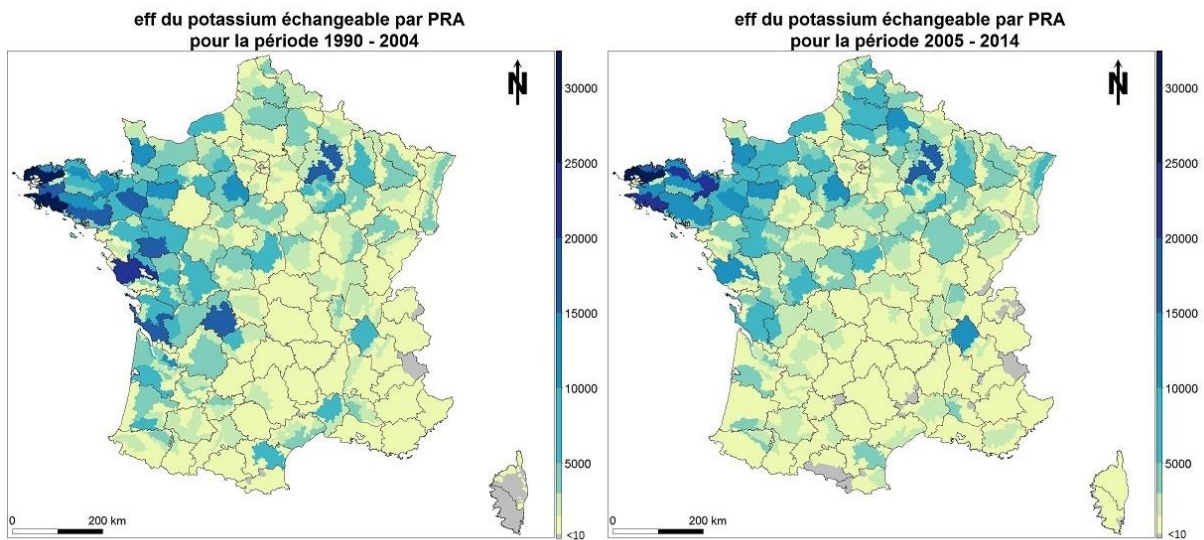


Figure 1 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole (PRA) disposants d'un résultat pour le potassium échangeable (jeu de données A), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).

b) MAGNESIUM ECHANGEABLE (MGO)

Les teneurs en magnésium échangeable sont mesurées par la méthode NF X 31 – 108 et exprimé en mg d'oxyde, noté MgO par kg de terre sèche (mg MgO. kg⁻¹). Nous avons mobilisé les mesures issues d'échantillons collectés entre 1990 et 2014. Comme pour les analyses de K₂O, la répartition spatiale des analyses n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire, avec des données plus nombreuses dans le Nord et particulièrement le Nord-Ouest. Le nombre d'échantillons par petite région agricole est souvent inférieur à 10 pour les 2 périodes sur les Alpes (figure 2).

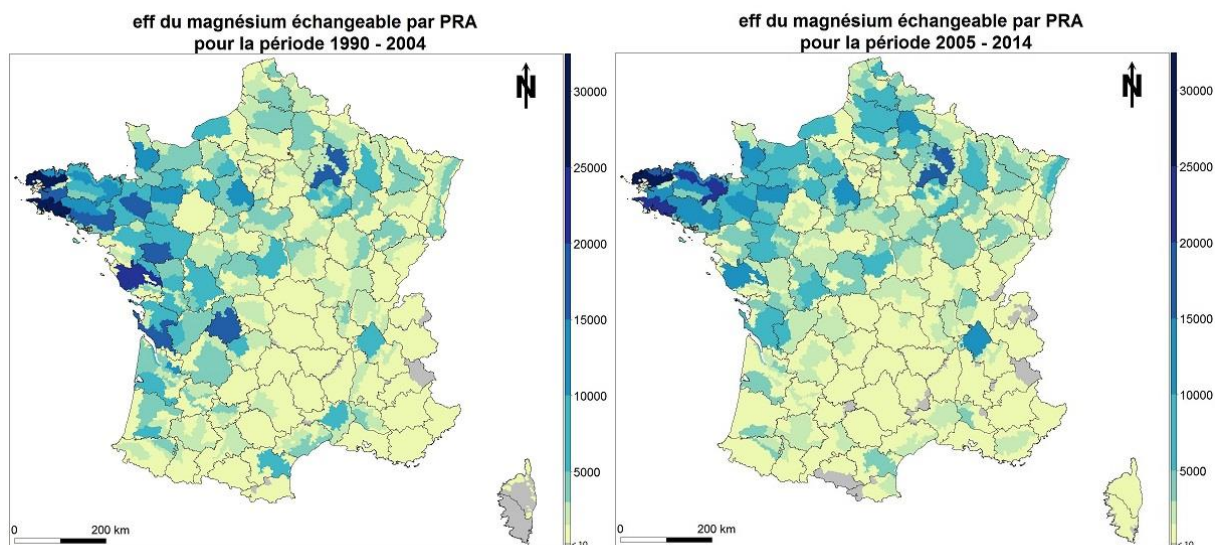


Figure 2 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole avec un résultat pour le magnésium échangeable (jeu de donnée B), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en gris : effectif insuffisant (<10).

c) PHOSPHORE EXTRACTIBLE

En France, il existe 3 méthodes de mesure du phosphore extractible qui se distinguent par leur pouvoir d'extraction, de plus en plus fort dans l'ordre suivant: P Olsen (NF ISO 11263) < P Joret-Hébert (NF X 31 – 161) < P Dyer (NF X 31 – 160).

La figure 3 illustre le pourcentage de chaque méthode par rapport au nombre total d'analyses présents dans la base de données. Elle met clairement en évidence la transition avant/après 2004 en ce qui concerne les méthodes d'analyses du phosphore extractible. La méthode Olsen est privilégiée par rapport aux méthodes Dyer et Joret-Hébert à partir de 2003.

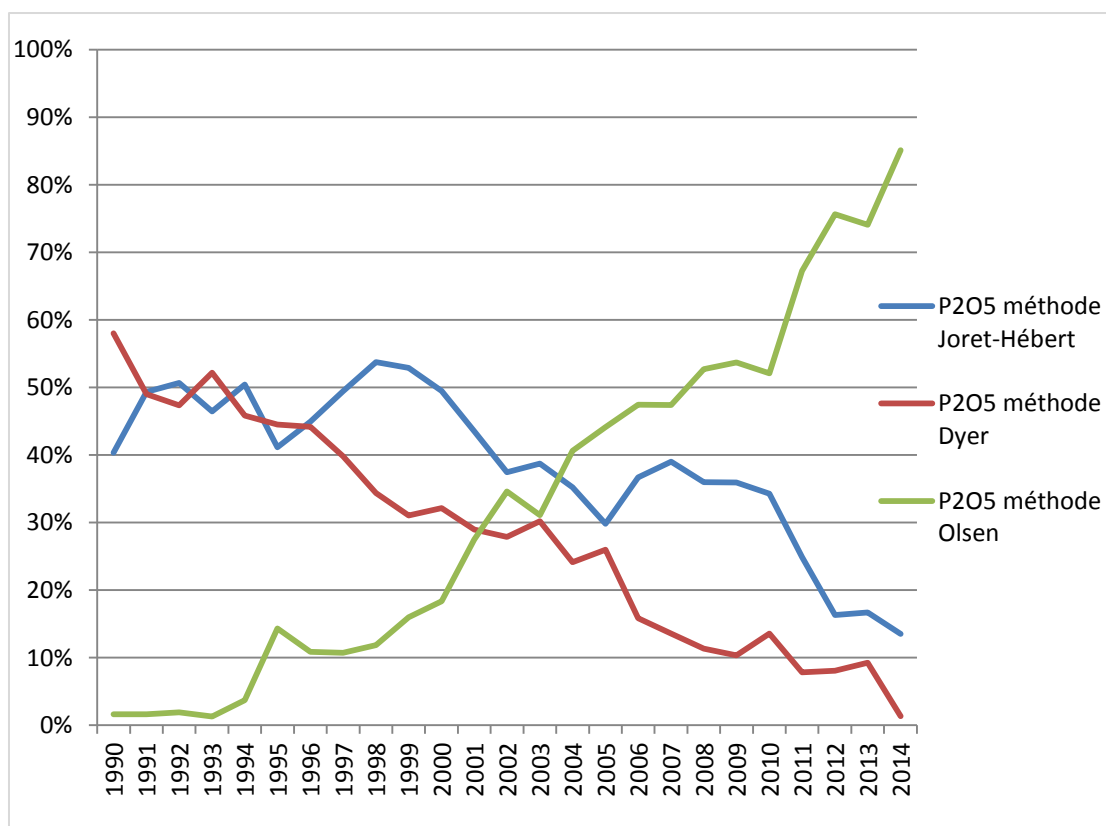


Figure 3 : Part des analyses de phosphore assimilable réalisées par chacune des méthodes analytiques par année

Pour la mesure du phosphore extrait selon la méthode Olsen et selon la méthode Joret-Hébert les données de 1994 à 2014 ont été prises en compte. En effet, les analyses antérieures à 1994 correspondent à une période d'apprentissage concernant la méthode Olsen pour la mesure du phosphore extractible (Schvartz et Julien, 2009).

A propos des données du phosphore mesurées à l'aide de la méthode Dyer, nous avons seulement pris en compte les données où les observations correspondent à des sols non calcaires. En effet, les résultats de phosphore extrait par la méthode Dyer peuvent être biaisés par la dissolution possible de phosphates de calcium inassimilables et l'extraction acide peut être perturbée par la masse de calcaire (neutralisant l'acide). Pour cela, seules les analyses montrant un pH dans l'eau inférieur ou égal à 7 et/ou une teneur en calcaire total inférieure à 20 g/kg ont été retenues.

Pour le phosphore extrait par la méthode Dyer, le nombre d'analyses par PRA est beaucoup plus important sur la période 1994-2004 comparée à la période 2005-2014, sauf pour la Bretagne où le nombre d'analyses est assez similaire pour les deux périodes (figure 4).

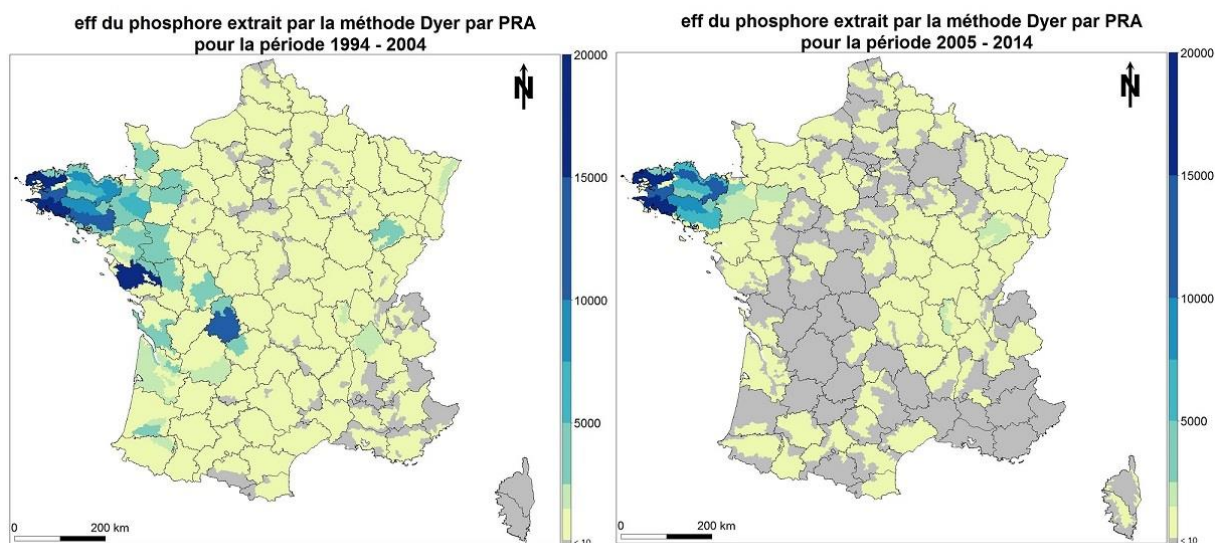


Figure 4 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole avec un résultat pour le phosphore extrait par la méthode Dyer (jeu de données C) comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).

Concernant le phosphore extrait par la méthode Joret-Hébert, la répartition d'analyses par petite région agricole est assez similaire avant et après 2004, avec une diminution des nombres (figure 5).

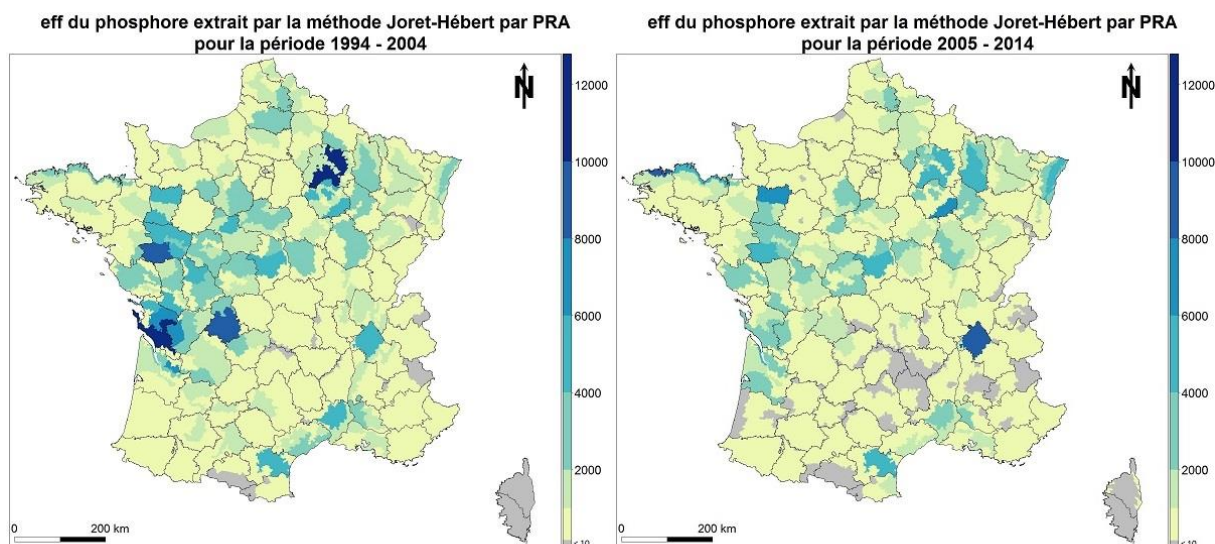


Figure 5 : Nombre d'échantillons par Petite Région Agricole avec un résultat pour le phosphore extrait par la méthode Joret (jeu de données D), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).

En ce qui concerne le phosphore extrait par la méthode Olsen le nombre d'analyses réalisées est nettement plus important après 2004 (figure 6), à part dans les Alpes et le Massif Central où le nombre d'analyses par petite région agricole est toujours faible (très souvent moins de 1000 analyses par PRA).

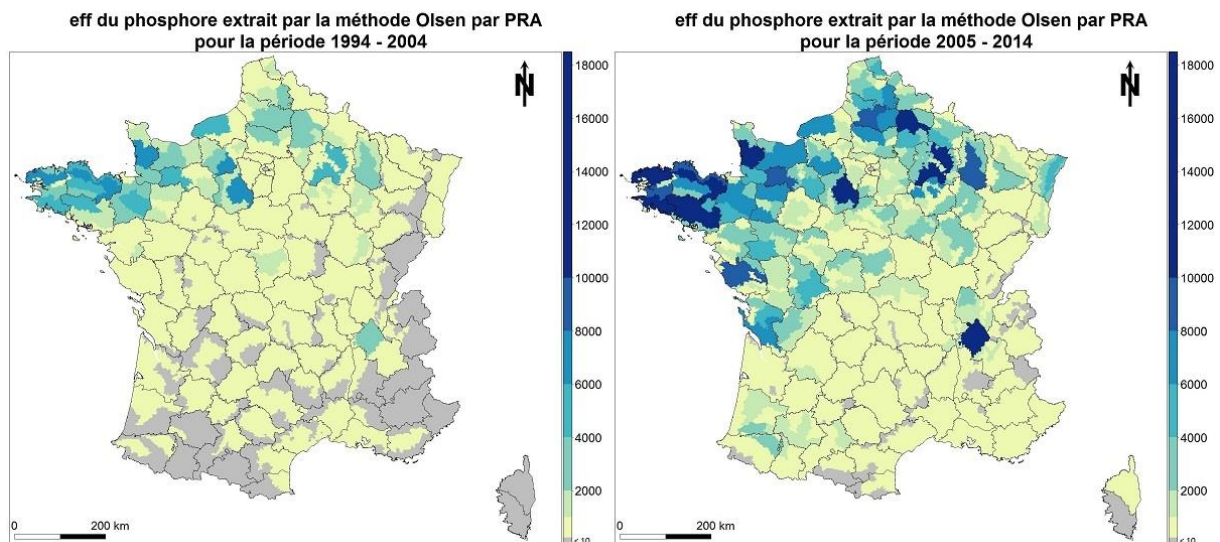


Figure 6 : Nombre d'analyses par PRA pour le phosphore extrait par la méthode Olsen (jeu de données E), comparaison avant 2004 à gauche et après 2004 à droite ; échelle des effectifs, en grisé : effectif insuffisant (<10).

d) PHOSPHORE EQUIVALENT OLSEN

Pour construire une règle de passage permettant de calculer une teneur en phosphore équivalent Olsen à partir d'une mesure Joret-Hebert ou Dyer, il est nécessaire de disposer d'échantillons sur lesquels ont été conduites au moins deux méthodes de mesure de la teneur en phosphore extractible. Nous avons retenu les échantillons qui présentaient des caractéristiques suivantes :

- Echantillons prélevés après 1994
- Sols non calcaires (Calcaire total < 20 g/kg et/ou pH dans l'eau < 7.1) pour P Dyer
- Teneurs en P Olsen < 250 mg.kg⁻¹
- Teneurs en P Dyer < 1000 mg.kg⁻¹
- Teneurs en P Joret-Hébert < 500 mg.kg⁻¹

Les teneurs analytiques très élevées correspondent à des cas rares et en voie de disparition. Les régressions à établir entre méthodes d'analyse risquaient, en les considérant, d'être biaisées par le poids statistique excessif de ces points extrêmes (du fait de leur éloignement du barycentre des populations étudiées). Une fois construite, la règle de passage est appliquée sur les échantillons disposant de l'une ou l'autre des méthodes de mesure du P et

du pH. Ce nouveau jeu de données s'ajoute aux données P Olsen disponibles constituant ainsi un nouveau jeu de données appelé G dans le tableau 1.

e) AUTRES DONNEES (CEC, CARBONE ET PH)

Nous avons mobilisé également de données correspondant à la CEC, au pH et au carbone organique. Ces données sont présentées en annexe. Elles ont servi :

- à la phase de recherche sur la fonction de pédotransfert liant les 3 méthodes d'extraction du P
- à la présentation des ratios K/CEC et Mg / CEC
- à établir la typologie des cas pour le diagnostic

C. Calcul d'un indicateur P équivalent Olsen

1. Méthode

La méthode de calcul d'un indicateur P équivalent Olsen repose sur l'établissement d'une fonction de pédotransfert construite à partir du jeu de données F et d'une méthode d'arbres de régression issues des techniques de fouille de données. Cet algorithme s'appelle *GBM* pour Gradient Boosted method. Cette méthode est décrite par Martin *et al.* (2009). Il est implémenté dans le logiciel R à l'aide du package *gbm*. Cet algorithme nécessite de régler un certain nombre de paramètres. Nous avons, pour cela, utilisé une boucle mettant en œuvre des validations croisées à partir d'un jeu de paramètres. Cette étape permet de trouver de déterminer la combinaison de paramètres optimale. Les résultats ne sont pas détaillés ici.

Les modèles de prédictions sont construits à partir de la teneur en P et du pH dans l'eau. Les autres paramètres n'ont pas été retenus car ils se sont avérés non pertinents en particulier en raison de leur taux de remplissage non suffisant.

2. Règle de calcul de l'équivalent P Olsen

Nous représentons d'abord à partir des données de la base BDAT la relation existante entre les différentes méthodes d'extraction du P. Nous avons utilisé pour cela des boxplots montrant la dispersion des teneurs en P Olsen mesurées par tranches de valeurs Dyer ou Joret Hébert (figures 7 et 8). La relation est quasi-linéaire dans les deux cas. La dispersion par contre est plus importante dans le cas du P Joret-Hébert.

Il n'est pas possible de représenter de façon simple la relation établie par l'outil GBM. Ce dernier construit en effet un enchaînement de plusieurs centaines d'arbres simples.

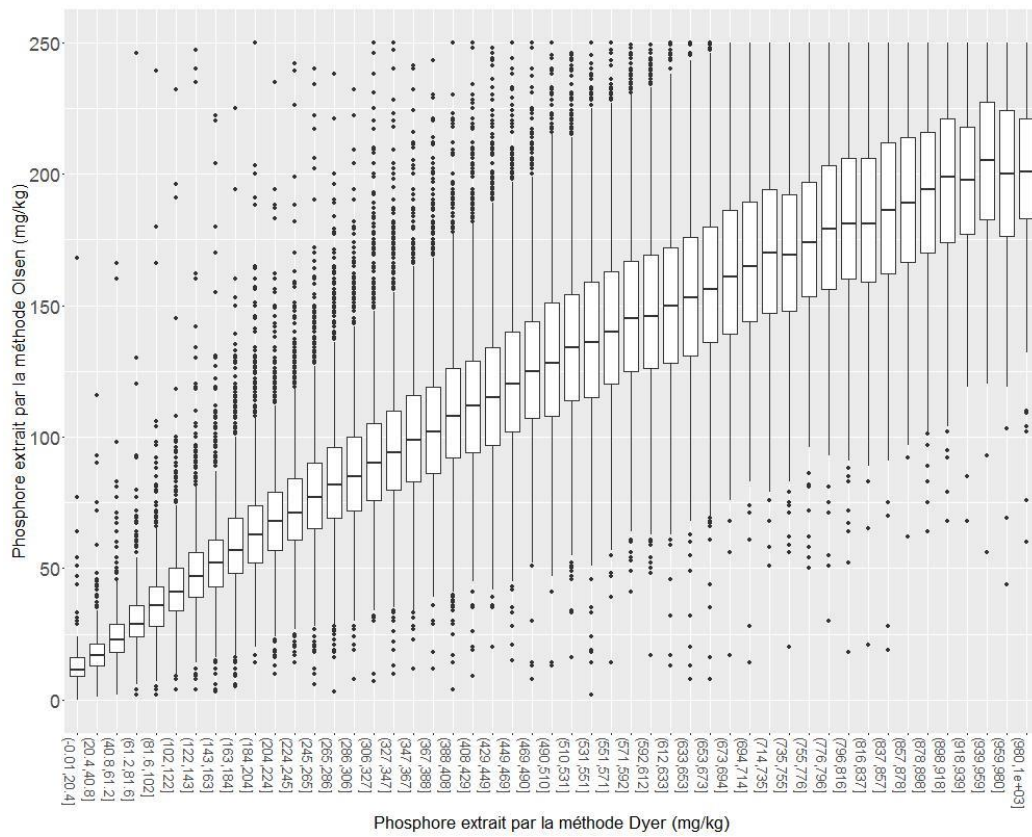


Figure 7 : Relation entre les résultats P Olsen et P Dyer. Les boxplots sont calculés sur les données P Olsen regroupées par classes croissantes de 20 mg/kg⁻¹ de P Dyer

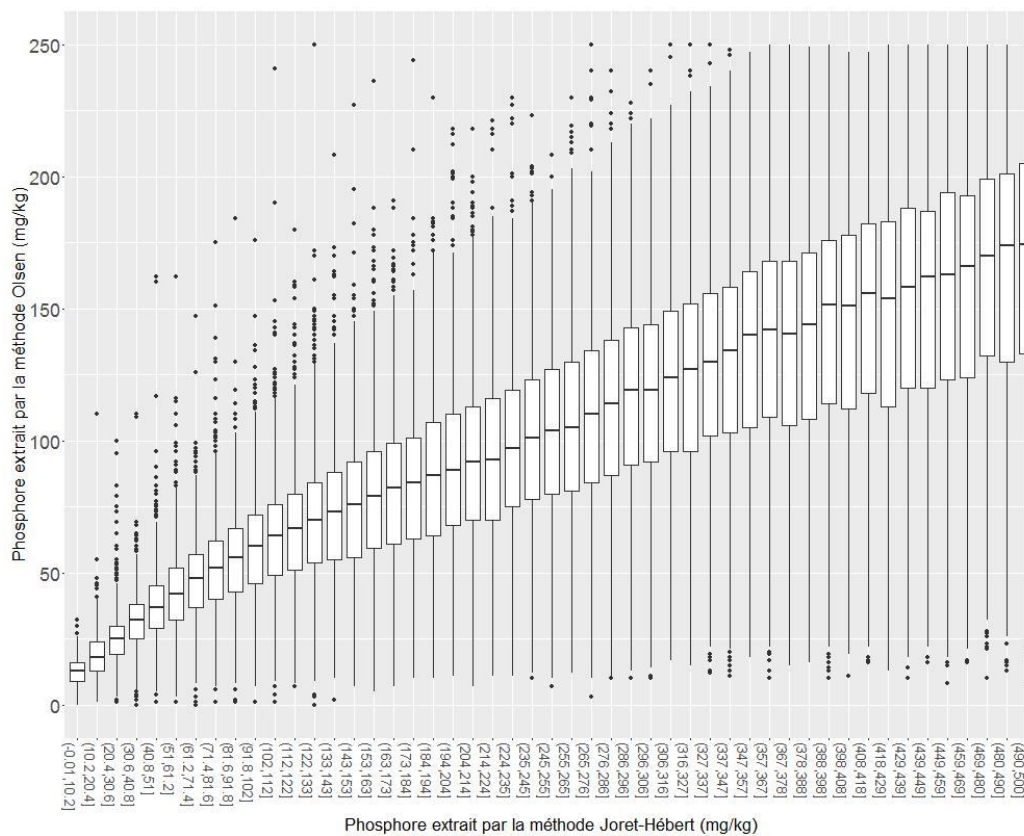


Figure 8 : Relation entre les résultats P Olsen et P Joret-Hébert. Les boxplots sont calculés sur les données P Olsen regroupées par classes croissantes de 20 mg/kg⁻¹ de P Joret-Hébert

Nous nous intéressons maintenant aux résultats de la modélisation par GBM. La figure 9 représente les données observées en fonction de la prédiction en équivalent Olsen par les modèles statistiques pour les deux méthodes (Joret-Hébert et Dyer). La qualité de la prédiction est moins bonne pour le modèle utilisant les données Joret-Hébert. Cependant, le biais est faible dans les deux cas (Tableau 4). L'absence de biais représente une information importante pour l'interprétation des comparaisons temporelles qui seront menées sur les valeurs prédites en phosphore équivalent Olsen dans la suite de ce travail : les données modélisées, même si elles ne sont pas toujours justes, ne montrent pas une tendance générale de sur- ni de sous-estimation des valeurs.

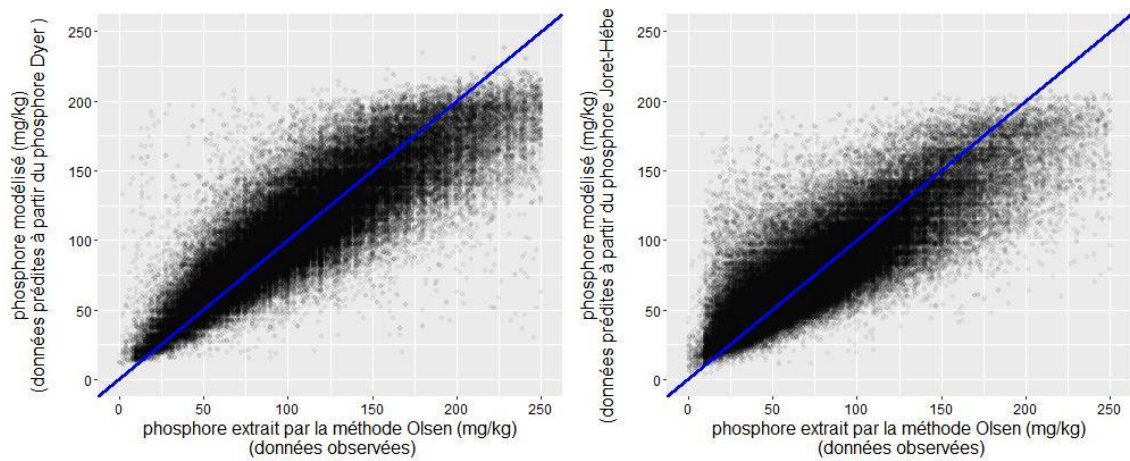


Figure 9 : Valeurs de phosphore équivalent Olsen estimées à partir de mesures Dyer (à gauche) et Joret-Hébert (à droite) en fonction des valeurs en P Olsen mesurées

Tableau 2 : Indicateurs renseignant sur la « qualité » des modèles de régression mises en œuvre. RMSE = racine de l'erreur quadratique moyenne ; R^2 = coefficient de détermination linéaire

Phosphore prédit à partir du phosphore Dyer

RMSE	R^2	Biais
26,825	0,745	-0,01135

Phosphore prédit à partir du phosphore Joret-Hébert

RMSE	R^2	Biais
23,672	0,715	-0,00036

Afin d'appréhender la répartition spatiale des analyses mobilisées dans cet exercice de modélisation et la répartition spatiale des erreurs, les figures 10 et 11 représentent les médianes calculées par canton des résidus entre les données observées en P et les prédictions par le modèle statistique pour les deux méthodes. Les cartes ne présentent pas de structures spatiales très marquées. Les structures observées sont difficiles à interpréter. Quelques cantons isolés montrent des valeurs extrêmes. Les résidus sont plus faibles à partir de la méthode Joret-Hébert qu'à partir de la méthode Dyer.

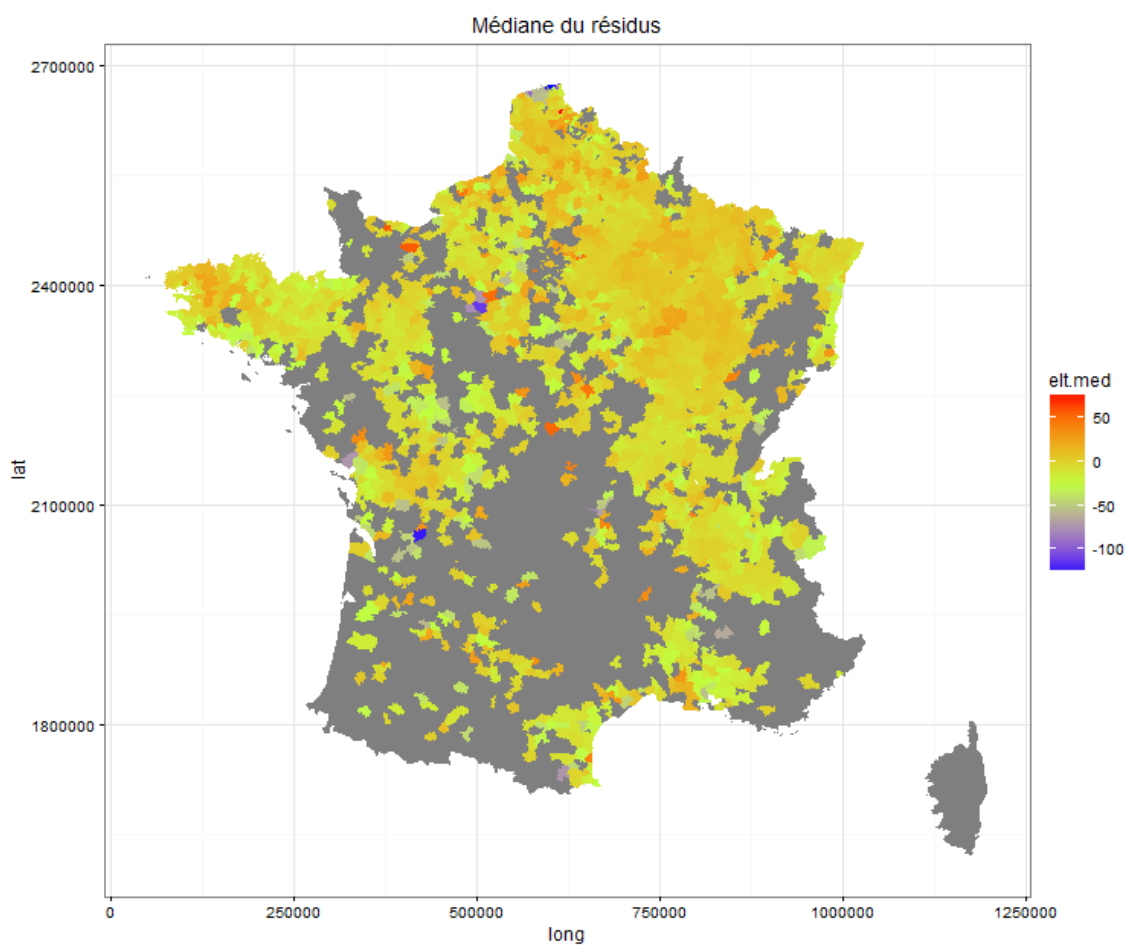


Figure 10 : Cartes des médianes cantonales des résidus statistiques issues de la différence entre les teneurs en P observées et celles modélisées pour le P Joret-Hébert,(à partir du jeu de données F)

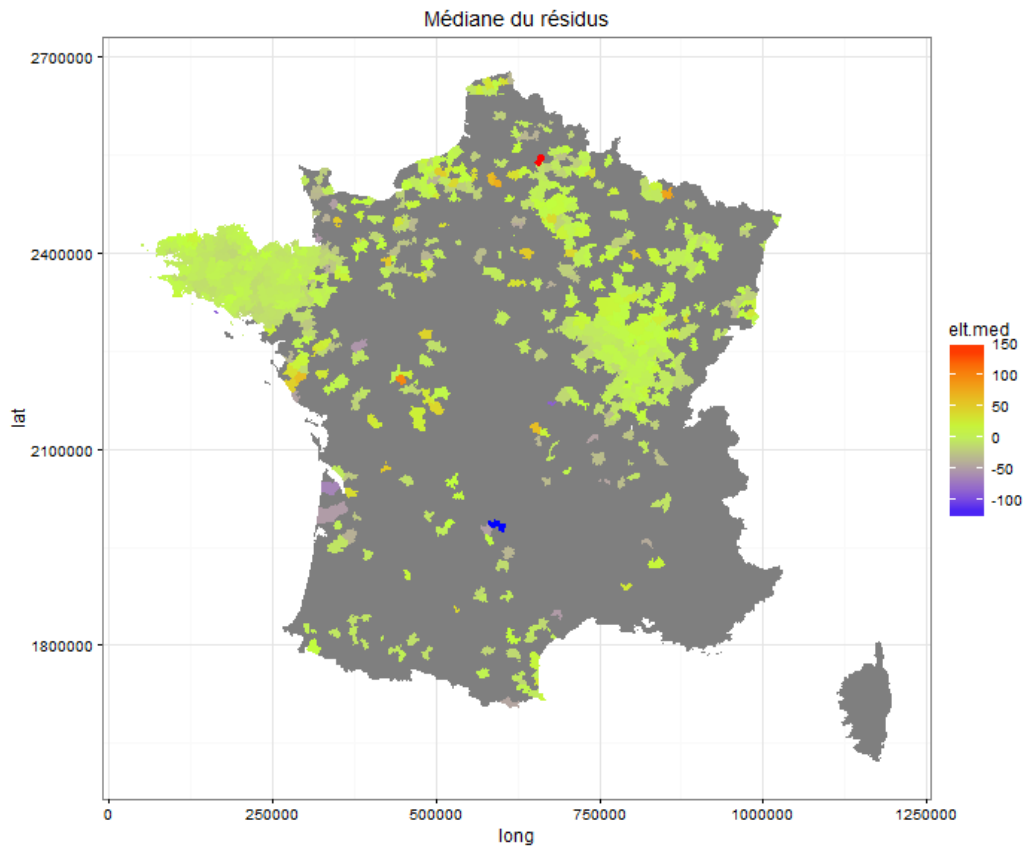


Figure 11 : Cartes des médianes cantonales des résidus statistiques issues de la différence entre les teneurs en P observées et celles modélisées pour le P Dyer (à partir du jeu de données F)

Enfin, nous avons cartographié dans la figure 12 comme pour les autres déterminations la répartition spatiale du nombre d'échantillons par petite région agricole permettant d'obtenir une valeur de phosphore équivalent Olsen (vraie ou estimée).

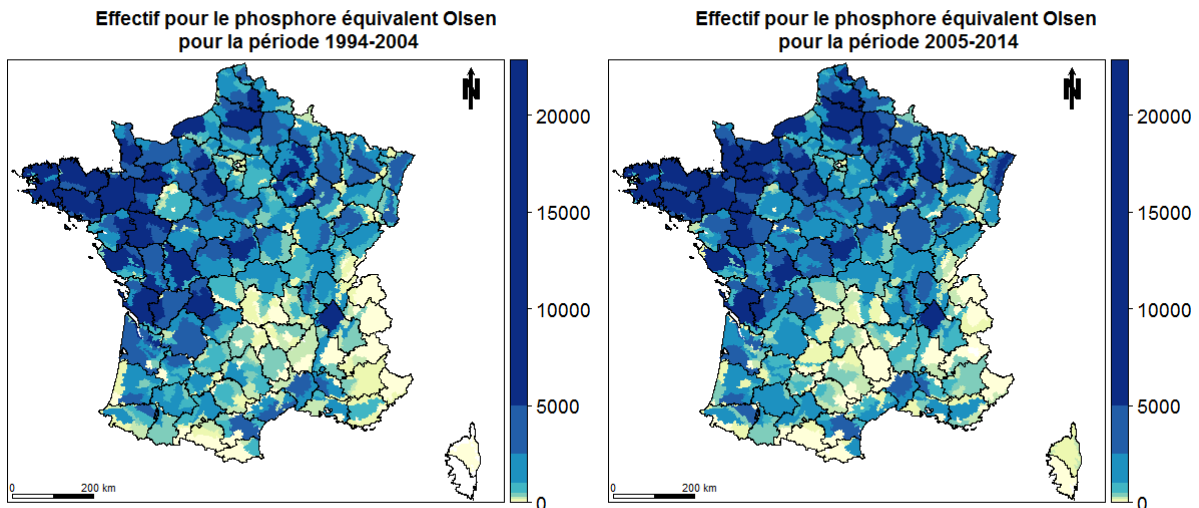


Figure 12 : Nombre d'échantillons par PRA permettant d'obtenir une valeur de phosphore équivalent Olsen (mesurée ou estimée) (jeu de données G), comparaison avant/après 2004

D. Interprétation agronomique des teneurs en P, K et Mg

1. L'interprétation agronomique

L'interprétation agronomique (diagnostic) exprime la nécessité plus ou moins forte de fertiliser pour permettre aux cultures prévues d'exprimer leur potentiel de production suivant l'état initial du sol tel que caractérisé par l'analyse. Elle comprend un nombre limité de modalités, le système d'expression devant être assez simple pour en faciliter la communication.

La méthode choisie se base sur les principes de l'interprétation d'analyse « RégiFert » (Denoroy *et al.*, 2004), elle-même basée sur les principes proposés par le Comifer (1993). L'affectation d'une analyse à une classe diagnostique est basée sur la situation de la valeur de l'analyse par rapport à des valeurs-seuil notées L1 et L2 dans RegiFert.

Le seuil L1 est le seuil d'impasse pour les cultures faiblement exigeantes vis-à-vis de l'élément considéré, c'est-à-dire qu'en l'absence de fertilisation en cet élément, toutes les cultures risquent une perte de rendement (rendement réel < potentiel) du fait de la disponibilité insuffisante de cet élément nutritif. Le seuil L2 est le seuil d'impasse pour les cultures exigeantes (il est donc par définition supérieur au seuil L1). Ceci signifie que pour une disponibilité en élément entre les seuils L1 et L2, seules les cultures exigeantes risqueront –en l'absence de fertilisation– une perte de rendement lié à l'élément considéré, et que pour une disponibilité supérieure à L2, aucune culture ne risque de perte de rendement.

On définit donc ainsi, à partir de 2 valeurs seuils, 3 classes de diagnostic avec leur dénomination dans la suite de ce rapport : <L1 : « fertilité faible », entre L1 et L2 : « fertilité moyenne », et > L2 : « fertilité forte ». En situation de fertilité faible, la fertilisation est nécessaire pour toutes les cultures, en situation de fertilité forte, elle n'est nécessaire à aucune culture, en situation intermédiaire, elle est nécessaire pour les cultures exigeantes.

Les seuils L1 et L2, qui varient suivant la méthode d'analyse considérée, ne sont pas les mêmes pour tous les types de sols. Un avantage de la méthode RégiFert est qu'elle permet de rattacher les seuils L1 & L2 nécessaires à l'interprétation d'une analyse dans un contexte donné, à des paramètres analytiques courants, qui sont parmi les plus déterminants pour la mobilité de l'élément: la teneur en CaCO₃, le pH, la teneur en argile, la teneur en C organique.

2. Mise en œuvre de la méthode Regifert

a) POUR LE PHOSPHORE

Les seuils L1 & L2 sont définis en fonction de la teneur en CaCO₃, du pH, de la teneur en argile et de la teneur en C organique, et peuvent varier suivant la méthode d'analyse de terre considérée. On reprendra le paramétrage utilisé par Follain (2009), qui est celui proposés par Colomb *et al* dans le paramétrage par défaut de RégiFert. Toutefois, ces seuils proposés par méthode d'analyse du P (Dyer, Joret-Hebert, Olsen) sont issus d'un jeu limité d'essais et analyses. Il n'est pas assuré que ces seuils soient cohérents entre méthodes analytiques pour une terre donnée.

On sait que la fréquence d'usage des diverses méthodes a notablement changé entre les périodes 1990-2004 et 2005-2014 (partie D de ce rapport). Un défaut de cohérence entre les seuils utilisés peut conduire à un artefact dans l'évaluation de l'évolution des diagnostics entre les 2 périodes d'étude, du fait de l'évolution des méthodes d'analyse utilisées.

Toutes les analyses sont donc transcrites en équivalent Olsen et les diagnostics sont réalisés sur ces analyses « équivalentes ». L'évolution de la fréquence des classes diagnostiques est ensuite étudiée par entité géographique. Cependant, ce calcul de valeur analytique équivalente étant lui aussi entaché d'incertitude, les diagnostics seront également réalisés sur les valeurs analytiques originelles et on étudiera aussi l'évolution de la fréquence des classes diagnostiques issues d'analyses suivant des extractions différentes.

b) POUR K ET MG

Toutes les analyses K et Mg sont effectuées suivant une seule méthode, la question d'une évolution des méthodes dans le temps ne se pose donc pas. Les seuils L1 et L2 pour K et Mg sont basés sur la CEC des sols, suivant un formalisme curvilinéaire qui signifie que les seuils augmentent de façon moins que proportionnelle avec la valeur de la CEC. Là encore, le paramétrage par défaut de RégiFert est utilisé. Pour K, plusieurs jeux de paramètres sont

proposés par RégiFert. On choisit le jeu qui permet de se rapprocher au mieux du paramétrage proposé par type de sols par Arvalis (<http://www.arvalis-infos.fr/conna-tre-les-teneurs-seuils-dans-sa-region-selon-son-sol-@/view-7826-arvarticle.html>).

3. Application aux données de la BDAT

La démarche RegiFert d'interprétation des teneurs en éléments fertilisants impose de disposer, en plus des teneurs en P extractible, de la CEC, du pH, du taux de calcaire et de la teneur en argile. Les échantillons de la BDAT avec un résultat en P, K ou Mg n'ont pas tous été analysés pour les éléments précités. Dans le cas où les données complémentaires sont absentes, la méthode proposée par Follain *et al.* (2009) a été appliquée. Elle consiste à affecter à la valeur manquante la médiane cantonale calculée sur la période temporelle correspondant à la date de prélèvement.

E. Outils d'analyses spatiale et temporelle

1. Principe

L'analyse temporelle s'appuie sur la méthodologie développée par Lemerrier *et al* (2006) sur le phosphore et le carbone organique en Bretagne, mise en œuvre par Saby *et al* (2008) sur le carbone organique en Franche-Comté et par Swiderski *et al* (2012) sur le carbone organique en Alsace. La mise en évidence de tendances temporelles repose sur la comparaison statistique de deux groupes ou échantillons de valeurs agrégées à l'échelle d'une unité spatiale (canton ou petite région agricole) et selon deux périodes temporelles (ici, avant et après 2004). Afin de minimiser les biais probables issus de l'échantillonnage non maîtrisé, la méthode propose l'application d'une technique de ré-échantillonnage (dite de Monte-Carlo) sur les données brutes préalablement à la mise en œuvre du test statistique.

2. Algorithme de simulation d'échantillonnage non biaisé

Le risque le plus important serait de mettre en évidence une différence significative attribuée à une évolution temporelle alors qu'il s'agirait simplement d'un artefact de prélèvement. La figure 13 présente une entité géographique (par exemple un canton) découpée en 4 sous-entités (des communes) aux deux périodes étudiées. La coloration des communes pourrait illustrer différentes teneurs en élément quelconque (magnésium par exemple) allant de la plus forte (en marron foncé) à la plus faible (en jaune). On remarque que la commune au sud-est qui a une forte teneur en magnésium est très peu échantillonnée à la première période (1 prélèvement) mais l'est beaucoup plus à la seconde période (5 prélèvements). Tandis que la commune au nord, en jaune, a une teneur en magnésium faible et n'est analysée qu'à la 1^o période. La réalisation du test sur les deux jeux de données brutes pourrait nous conduire à observer une augmentation de la teneur en magnésium entre les deux échantillons mais qui n'est en fait liée qu'à l'hétérogénéité spatio-temporelle du prélèvement.

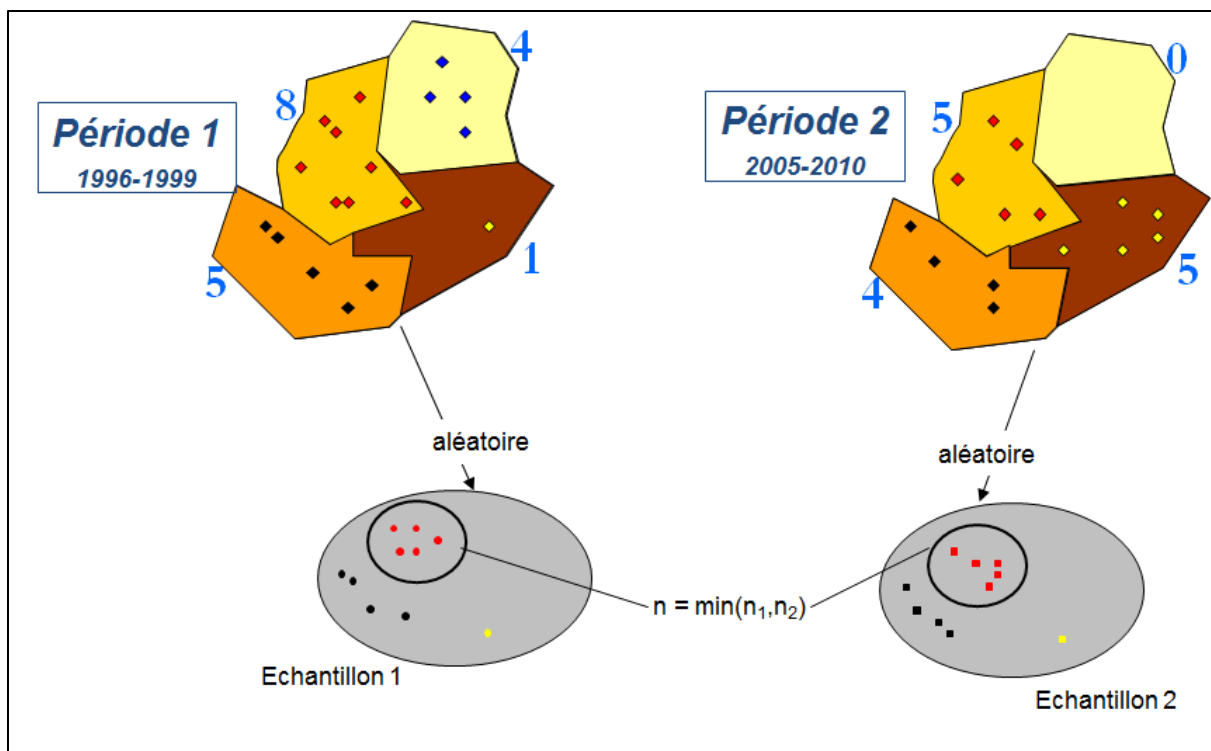


Figure 13 : schéma explicatif de la méthode de ré-échantillonnage

La méthode de ré-échantillonnage de *Monte-Carlo* consiste à répéter plusieurs fois une étape qui conduit à générer par unité spatiale de décision (par canton ou par PRA) un échantillon par période, soit deux échantillons, dans lesquels le nombre d'analyses par commune est comparable d'une période temporelle à l'autre (avant et après 2004). Pour les deux périodes et pour chaque unité spatiale, nous procédons à un tirage aléatoire de 80% des données disponibles au sein de la période la moins bien pourvue en analyses.

A l'issue de ces N itérations d'échantillonnage, un ensemble de N échantillons est obtenu sur lesquels il est possible de mettre en œuvre des tests statistiques ou des calculs de statistique descriptive. On obtient ainsi N p-valeurs (probabilité) issues des tests correspondant à N inférences. La pratique impose de prendre en compte le risque d'existence de faux positif en appliquant une correction des p valeurs, nous avons retenu la technique de Benjamini et Hochberg, (1995).

La décision finale repose sur le calcul du pourcentage p des N p-valeurs inférieures au seuil de risque α fixé. Pour décider d'une évolution significative, on considère que p doit être supérieur à un seuil de 80 %.

Pour mettre en œuvre cet algorithme au niveau de l'unité spatiale de décision, on considère qu'il faut disposer d'un nombre d'analyse suffisant. Nous avons retenu un nombre minimum de **100** analyses pour les PRA et **50** pour les cantons, en arbitrant entre le nombre

souhaitable proposé par Servain et Sagot (LDAR, 2014) et le nombre de déterminations disponibles par entité spatiale dans la population de données

3. Inférence statistique et calcul d'indicateurs

Ce paragraphe décrit comment les inférences statistiques ont été menées. Il explique donc comment nous avons décidé de la significativité d'une évolution calculée au niveau de l'unité spatiale de décision. Il explique également quels tests statistiques ont été retenus. Enfin, les indicateurs calculés à partir de l'algorithme de ré-échantillonnage sont décrits ici.

a) COMPARAISON DES TENEURS

La comparaison spatio-temporelle des teneurs repose sur un test non paramétrique basé sur la somme des rangs, connu sous le nom de test de Mann-Whitney (MW). Le seuil de risque est fixé ici à 5 %.

Pour décider du sens de l'évolution, on compare, pour chaque itération de l'algorithme de ré-échantillonnage, la différence des médianes. L'ampleur de l'évolution est calculée à partir de la médiane des N différence de médianes obtenues lors de l'étape de ré-échantillonnage.

On calcule ensuite un indicateur synthétique, *Evol*, qui tient compte de la teneur médiane calculée à la première période et du résultat du test statistique. Cet indicateur prend les valeurs suivantes :

- « A++ » signifie augmentation des teneurs > 10% en valeur absolue par rapport à la teneur initiale,
- « A » signifie augmentation des teneurs < 10 % en valeur absolue par rapport à la teneur initiale,
- « I » signifie évolution indéterminée,
- « D » signifie diminution < 10% en valeur absolue par rapport à la teneur initiale,
- « D++ » signifie diminution >10% en valeur absolue par rapport à la teneur initiale,
- « EI » signifie qu'il n'y a pas assez de données pour faire le calcul.

Nous avons également calculé les indicateurs *MedP1* et *MedP2* correspondant aux médianes des N médianes issues du ré-échantillonnages aux deux périodes ainsi que l'indicateur *Diff* correspondant à leur différence.

Ces 3 indicateurs sont représentés sous forme de cartes à la résolution de l'unité spatiale de décision (la PRA dans le rapport et le canton pour une sélection de paramètres dans les annexes)

Enfin, nous avons construit un graphique XY synthétique où les indicateurs *MedP1* sont représentés en fonction de *MedP2* pour les cantons. Chaque individu est caractérisé par un point dont la couleur dépend de l'indicateur *Evol* et dont la taille varie en fonction du nombre de données (pour agréger les cas de plusieurs unités géographiques présentant les mêmes valeurs).

b) COMPARAISON DES INTERPRETATIONS AGRONOMIQUES

Les interprétations agronomiques des teneurs en éléments par la méthode RégiFert® fournissent des résultats sous la forme de trois classes de fertilité : *Faible, Moyenne, Forte*. À l'issue de la phase de ré-échantillonnage, nous disposons pour chaque tirage de la répartition des résultats d'analyse entre ces 3 classes. Nous avons mis en œuvre le test du χ^2 d'adéquation (dénommé aussi test du χ^2 de conformité ou test du χ^2 d'ajustement). Le seuil de risque est fixé ici à 10 %.

Plusieurs résultats ont été calculés à la maille de l'unité spatiale de décision pour chaque itération en plus des valeurs du test du χ^2 . Nous disposons ainsi de :

- le pourcentage de chaque classe *Faible, Moyen, Fort* aux deux périodes, soit 6 résultats = $pcFaible1, pcFaible2, pcMoyen1, pcMoyen2, pcFort1$ et $pcFort2$. Ces résultats permettent également d'effectuer le diagnostic de fertilité en représentant par exemple la modalité dominante.
- La différence des pourcentages par modalité = $DiffpcFaible, DiffpcMoyen$ et $DiffpcFort$. Ces résultats permettent d'appréhender les évolutions par modalité
- un indicateur qui intègre les évolutions des répartitions des pourcentages des classes et le résultat du test du χ^2 : la règle est présentée en annexe A ; elle tient compte de l'ordre des occurrences par unité spatiale dans les deux périodes ; elle produit un indicateur comportant les valeurs suivantes
 - A : les pourcentages évoluent de manière à obtenir un test du χ^2 positif et la variation des occurrences des modalités dans les deux périodes conduit à interpréter une **Augmentation** (ex P1 : Faible>Fort>Moyen et P2 : Fort>Moyen>Faible) ;
 - D : les pourcentages évoluent de manière à obtenir un test du χ^2 positif et la variation des occurrences des modalités dans les deux périodes conduit à interpréter une **Diminution** (ex P1 : Faible>Fort>Moyen et P2 : Faible >Moyen >Fort) ;
 - S : les pourcentages évoluent de manière à obtenir un test du χ^2 positif **MAIS** il n'y a pas de changement de répartition des modalités ; on interprète les variations comme stables (ex P1 : Faible>Fort>Moyen et P2 : Faible>Fort>Moyen) ;
 - I les pourcentages n'ont pas évolué ou très peu, si bien que le test est négatif, on interprète cette situation comme indéterminée.

F. Synthèse nationale

Des résultats agrégés au niveau national ont été produits à partir des calculs effectués au niveau de la petite région agricole. La démarche consiste à sommer par classe d'évolution la surface agricole utile de la petite région agricole. Cette opération permet de se représenter

les surfaces concernées par les changements. Elles sont reportées dans ce rapport sous forme de tableaux et de graphiques en barres, agrégées par région administrative.

L'échelle du canton n'a pas été retenue car les cartes présentaient trop de zones sans information dues au manque de données.

G. Démarche générale

Le schéma suivant résume les grandes étapes de la méthodologie mise en œuvre.

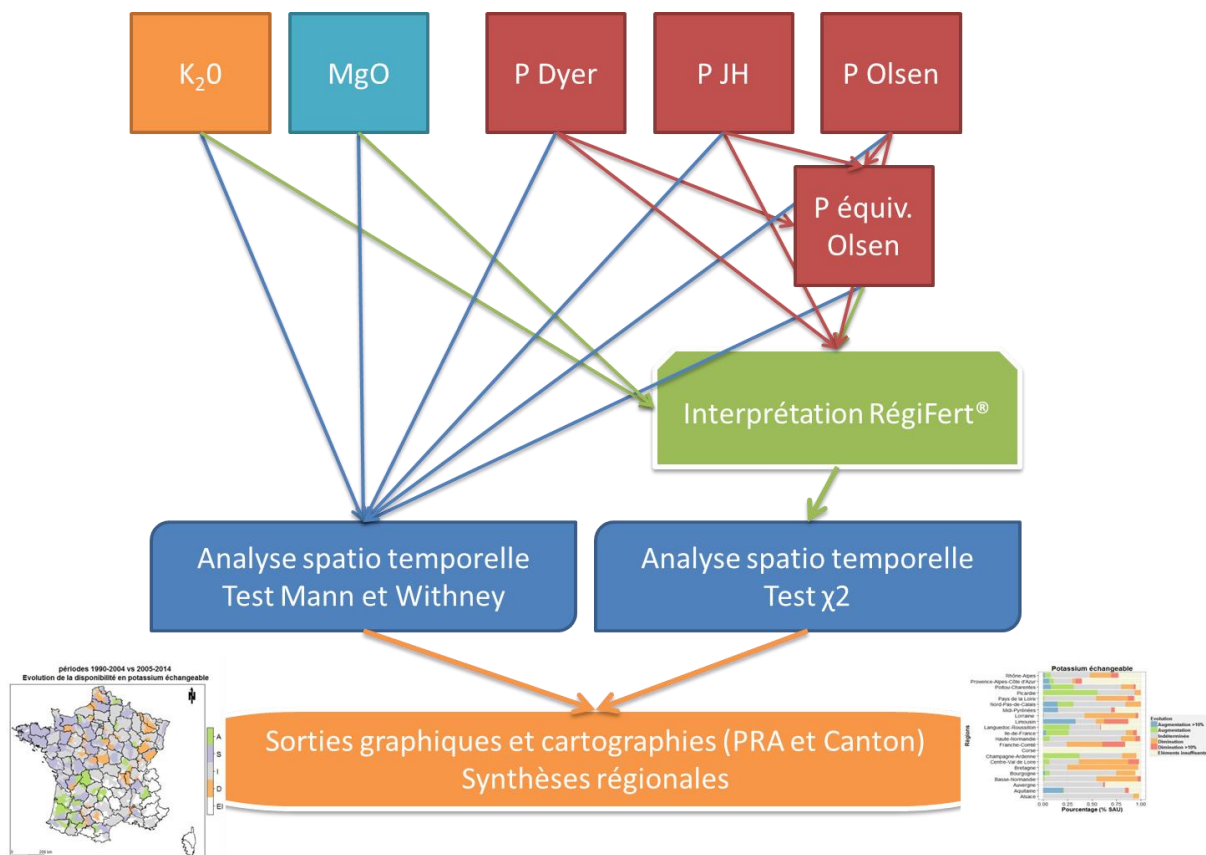
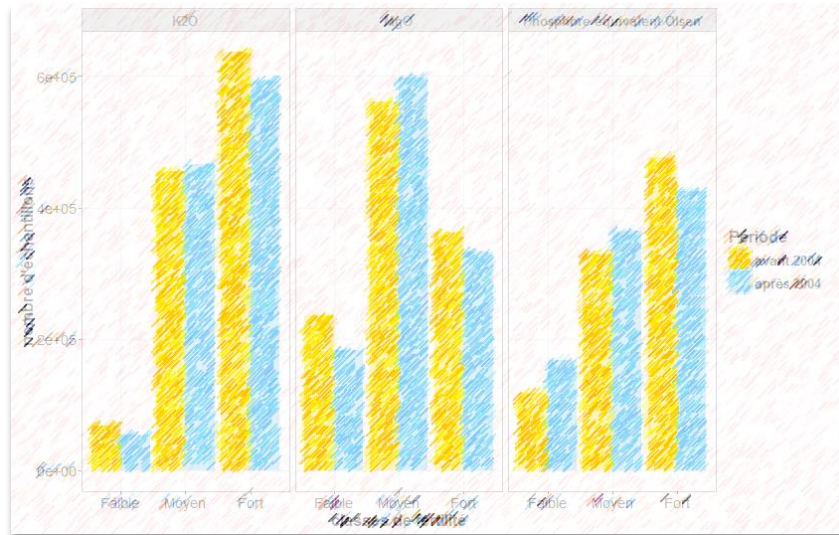
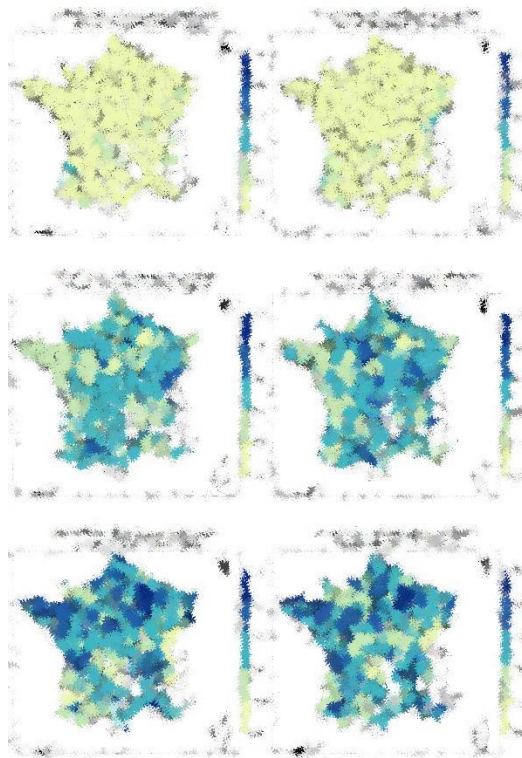


Figure 14 : Démarche générale



Résultats



III. Résultats

Après avoir fourni des statistiques sommaires au niveau national, la présentation des résultats de l'analyse spatio-temporelle est organisée par élément : le potassium (K₂O), puis le magnésium (MgO), et enfin le phosphore (exprimé en P₂O₅) avec la distinction selon la méthode de mesure et l'indicateur phosphore équivalent Olsen. Pour chacun des éléments, nous présentons d'abord les résultats de l'analyse temporelle effectuée sur les teneurs brutes et ensuite sur les données issues de l'interprétation agronomique avec la méthode RegiFert®. Toutes les analyses ont été effectuées à la maille de la petite région agricole. Nous fournissons en annexe une sélection de résultats à la maille cantonale. A la fin de cette section, des éléments de synthèse aux niveaux national et régional sont proposés. Enfin, un commentaire synthétique par élément a été réalisé.

A. Statistiques sommaires nationales par période temporelle

Tableau 3 : Statistiques élémentaires des données mobilisées exprimées en mg.kg-1

Elément	période	n	Moyenne	Médiane	Variance	Premier quartile	Troisième quartile	Premier décile	Dernier décile
K₂O	1990-2004	1276119	262,17	227	169	158	320	109	449
	2005-2014	1185978	264,92	232	159	165	323	117	445
MgO	1990-2004	1245598	176,40	140	168	99	199	70	293
	2005-2014	1185965	180,71	145	161	106	201	79	293
P Olsen	1994-2004	259768	98,80	89	58	63	122	44	163
	2005-2014	805642	85,15	74	56	49	106	32	149
Pjoret-Hebert	1994-2004	533017	218,68	170	222	100	266	60	410
	2005-2014	375139	201,14	147	204	84	249	47	400
P Dyer	1994-2004	392182	320,34	268	258	151	425	80	611
	2005-2014	160786	392,95	338	284	198	520	107	734
P équivalent Olsen	1994-2004	1021835	86,21	81	42	56	110	37	143
	2005-2014	1141171	80,78	73	44	49	104	32	141

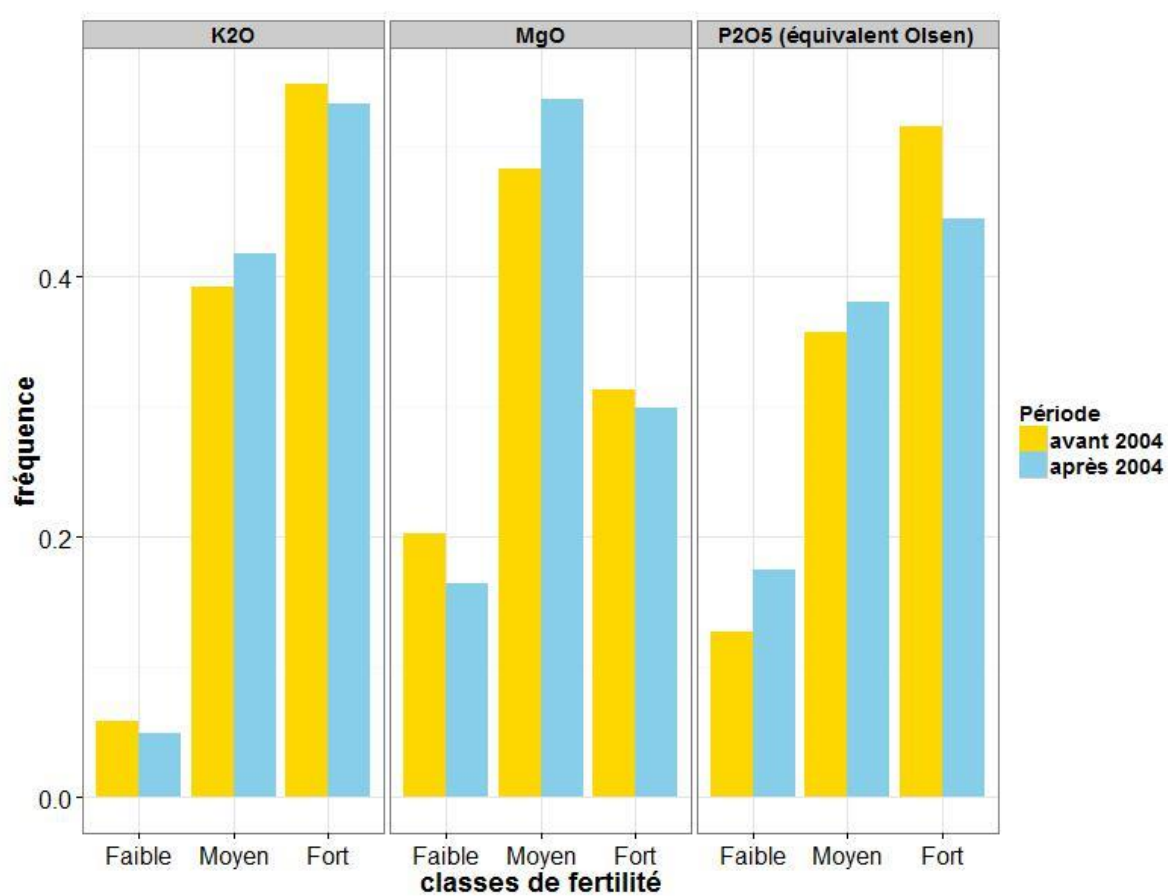


Figure 15 : Répartition (fréquence) des classes de fertilité au niveau national pour toutes les analyses en Potassium échangeable (K₂O), magnésium échangeable et l'indicateur phosphore équivalent Olsen, calculées pour les deux périodes.

B. Analyse spatio-temporelle des données du potassium échangeable K_2O

1. Evolution des teneurs

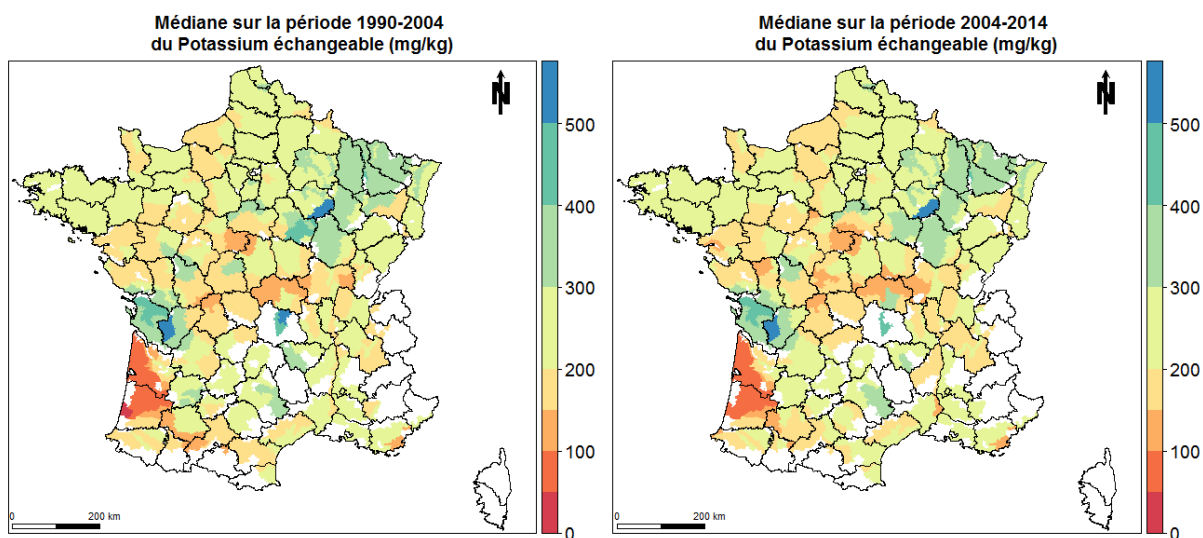


Figure 16 : Cartes des médianes des teneurs en Potassium échangeable (K_2O), par petite région agricole, calculées pour les deux périodes.

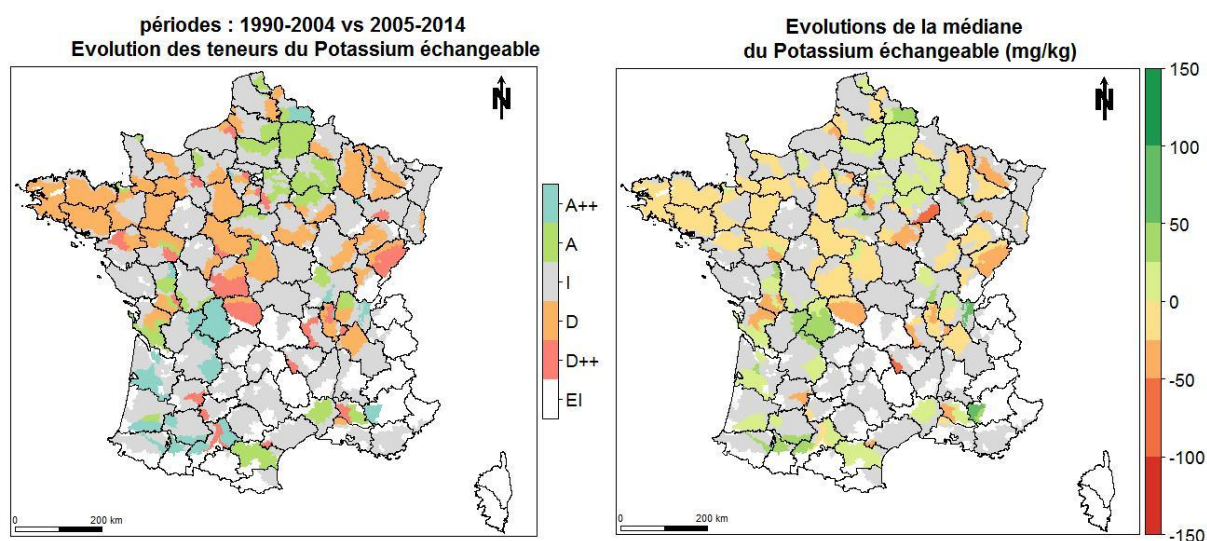


Figure 17 : Cartes d'évolution des teneurs en potassium échangeable (K_2O), par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.

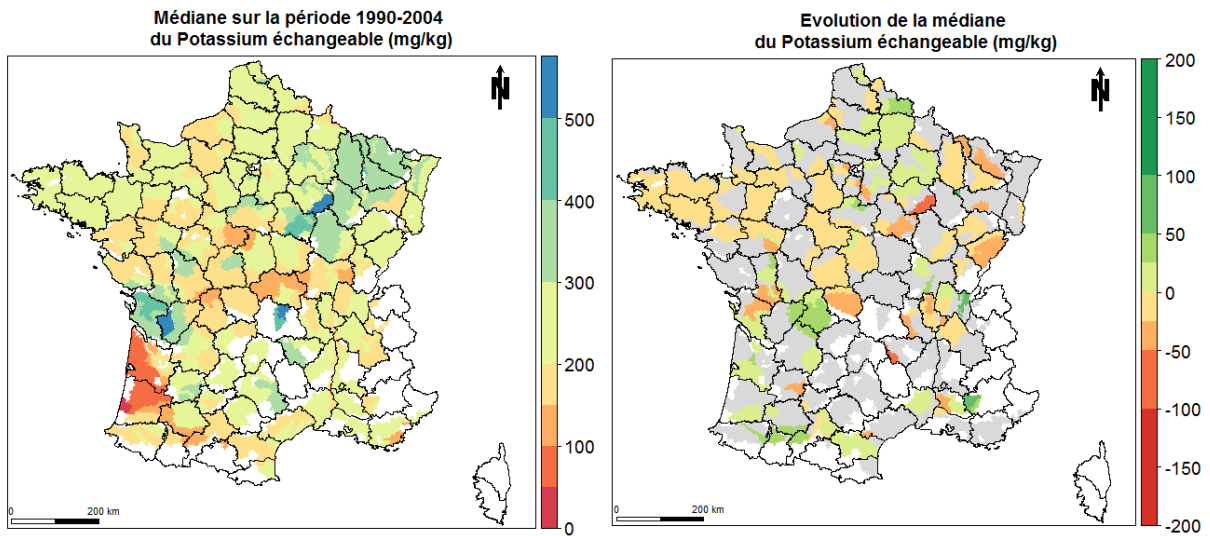


Figure 18 : Carte de la médiane des teneurs en potassium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs avant/après 2004 (à droite)

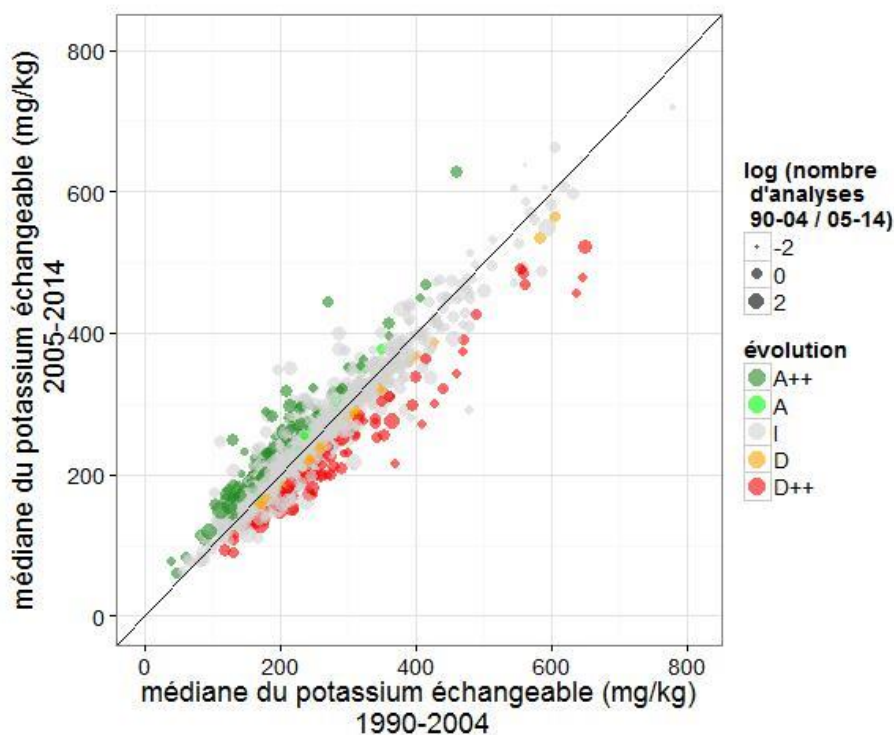


Figure 19 : Graphique représentant les médianes par CANTON des teneurs en potassium échangeable (mg/kg) après 2004 en fonction des médianes par CANTON des teneurs en potassium échangeable (mg/kg) avant 2004. La taille du point représente le log du rapport du nombre de données disponibles période 1 sur période 2. La couleur représente la classe d'évolution. Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs ≤10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs ≤10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Ei" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.

2. Interprétation agronomique par RegiFert®

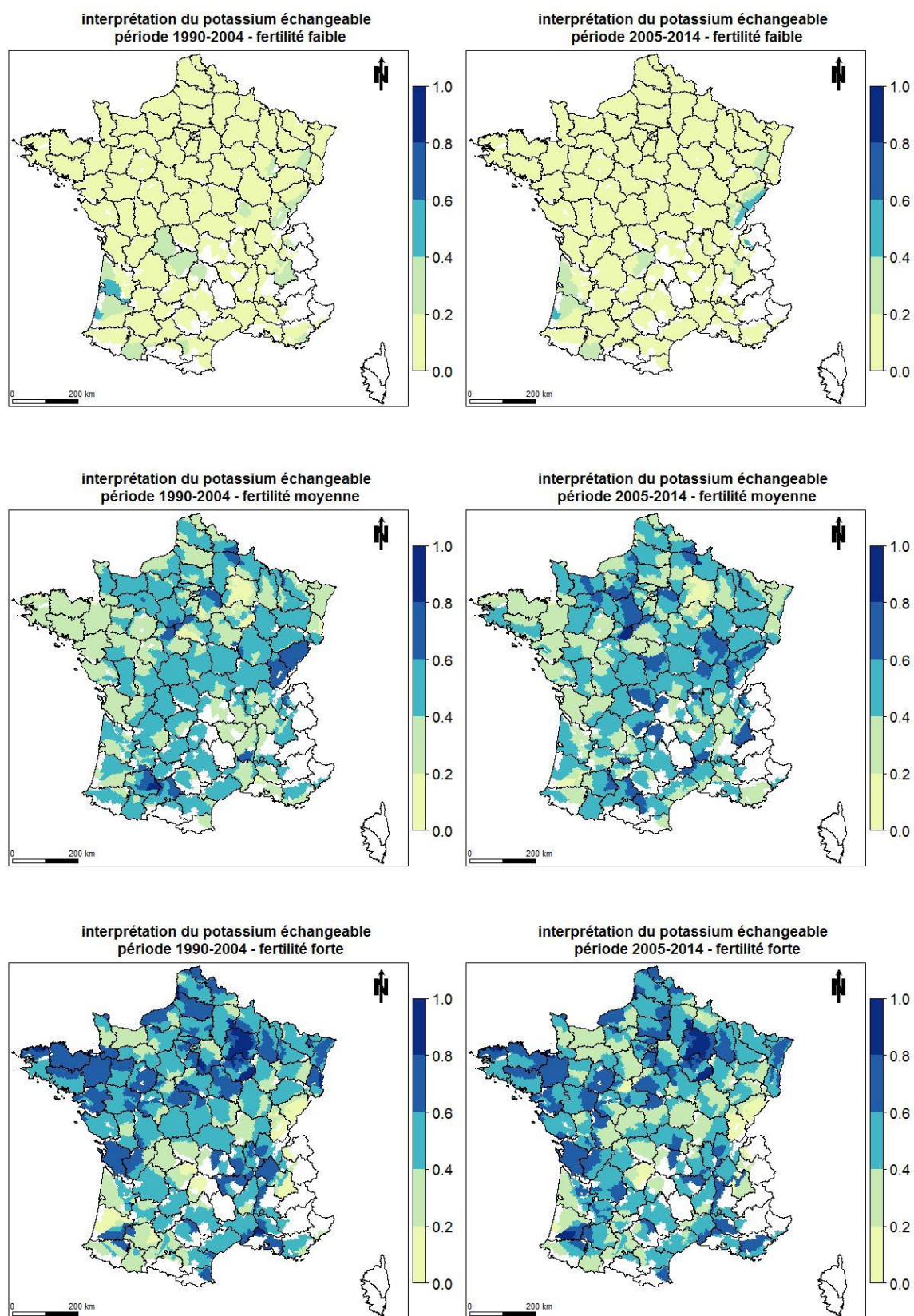


Figure 20 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en potassium échangeable fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle

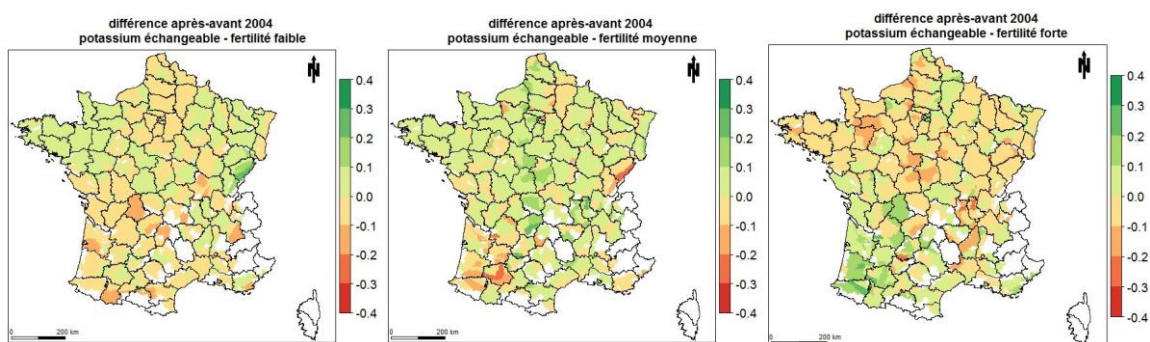


Figure 21 : Différences par PRA calculées entre les pourcentages après 2004– avant 2004 par classe de disponibilité en potassium échangeable faible, moyenne et forte,.

périodes 1990-2004 vs 2005-2014
Evolution de la disponibilité en potassium échangeable

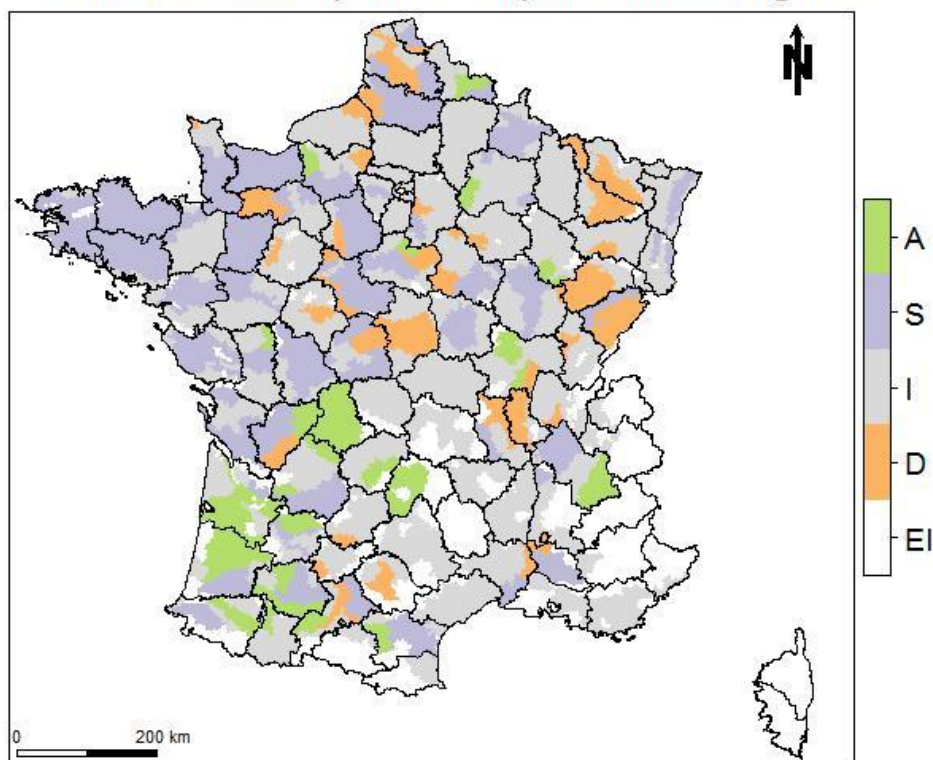


Figure 22 : Cartes d'évolution de la répartition des classes de disponibilité en potassium échangeable (K_2O) fournies par RegiFert®, par petite région agricole, comparaison après/avant 2004. Concernant le résultat du test, "A" signifie augmentation de la disponibilité en potassium par rapport à la première période, "S" signifie stable la répartition des classes est inchangée même si les % par classe de disponibilité ont changé, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution de la disponibilité par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.

C. Analyse spatiotemporelle des données du magnésium échangeable : MgO

1. Evolution des teneurs

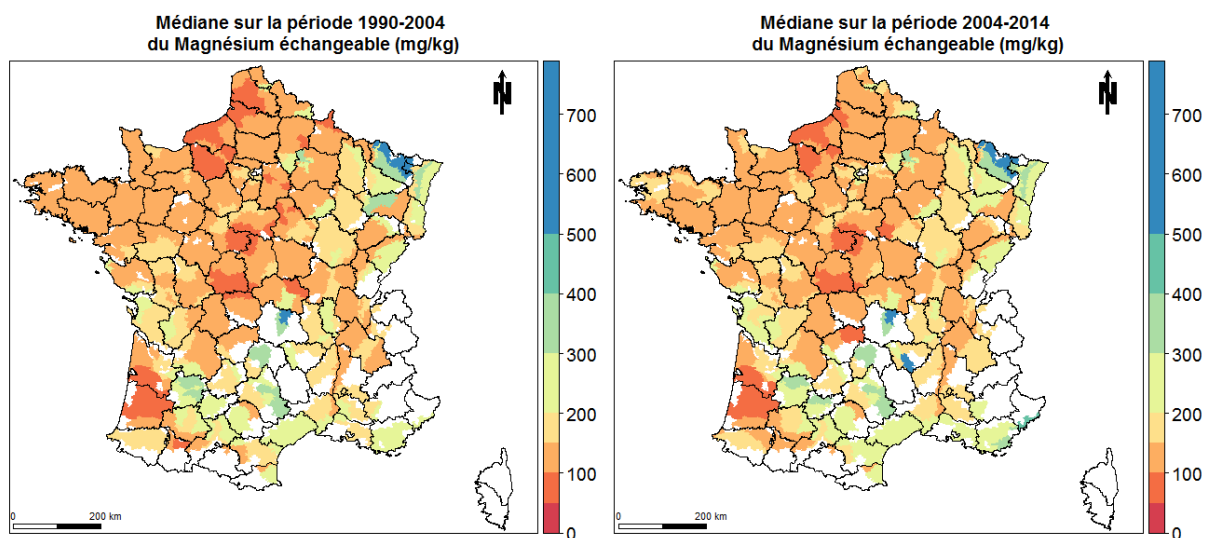


Figure 23 : Cartes des médianes des teneurs en magnésium échangeable (MgO), par petite région agricole, calculées pour les deux périodes.

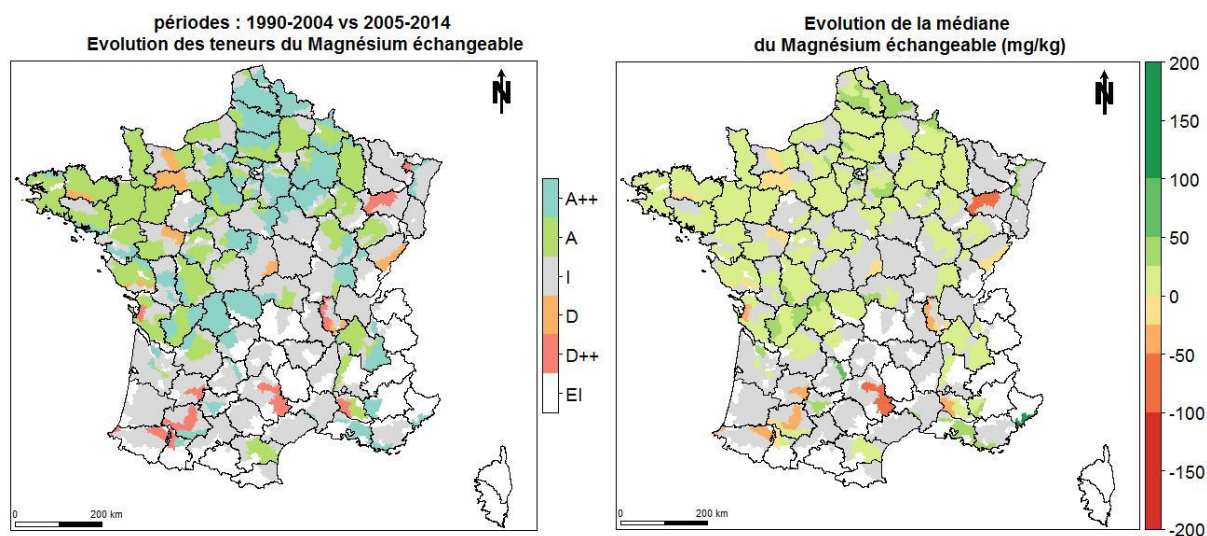


Figure 24 : Cartes d'évolution des teneurs en magnésium échangeable (MgO), par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.

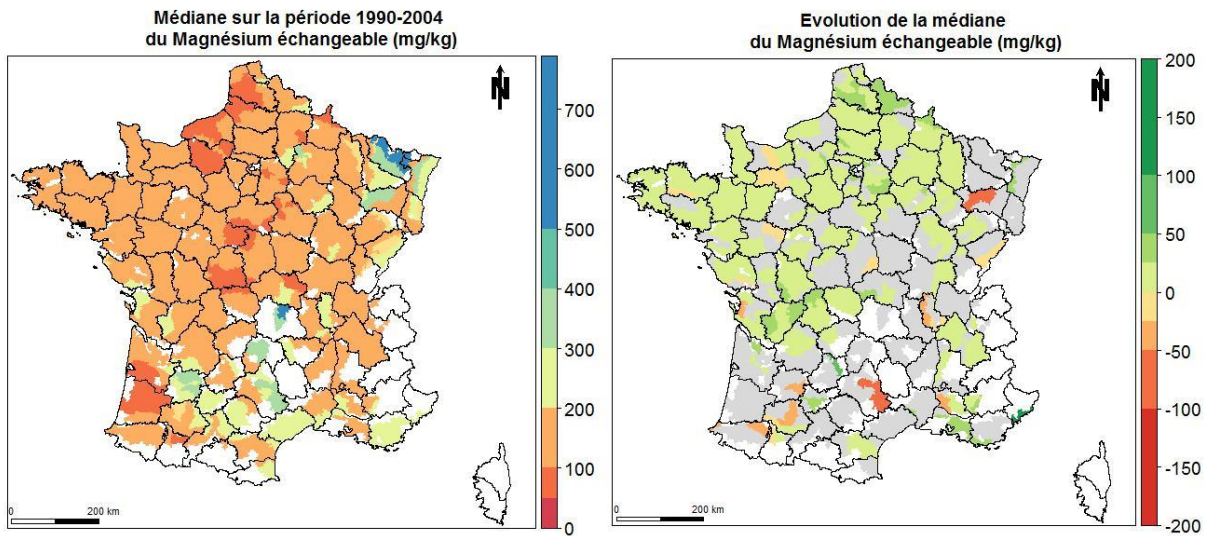


Figure 25 : médiane des teneurs en magnésium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane avant/après 2004 (à droite)

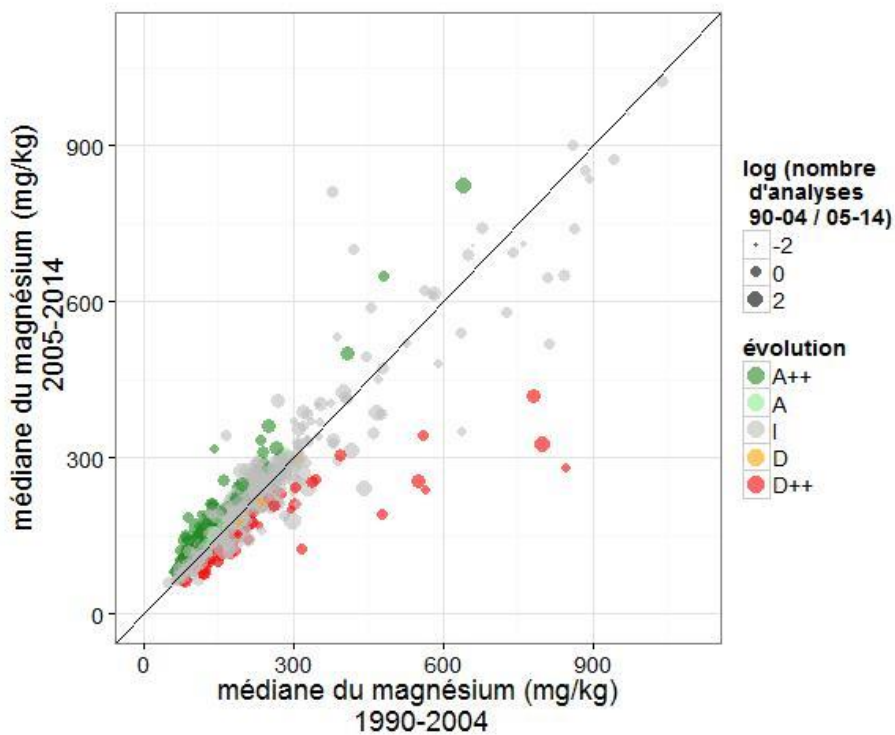


Figure 26 : Graphique représentant les médianes par CANTON des teneurs en magnésium échangeable (mg/kg) après 2004 en fonction des médianes par CANTON des teneurs en magnésium échangeable (mg/kg) avant 2004 .

2. Interprétation agronomique par RegiFert®

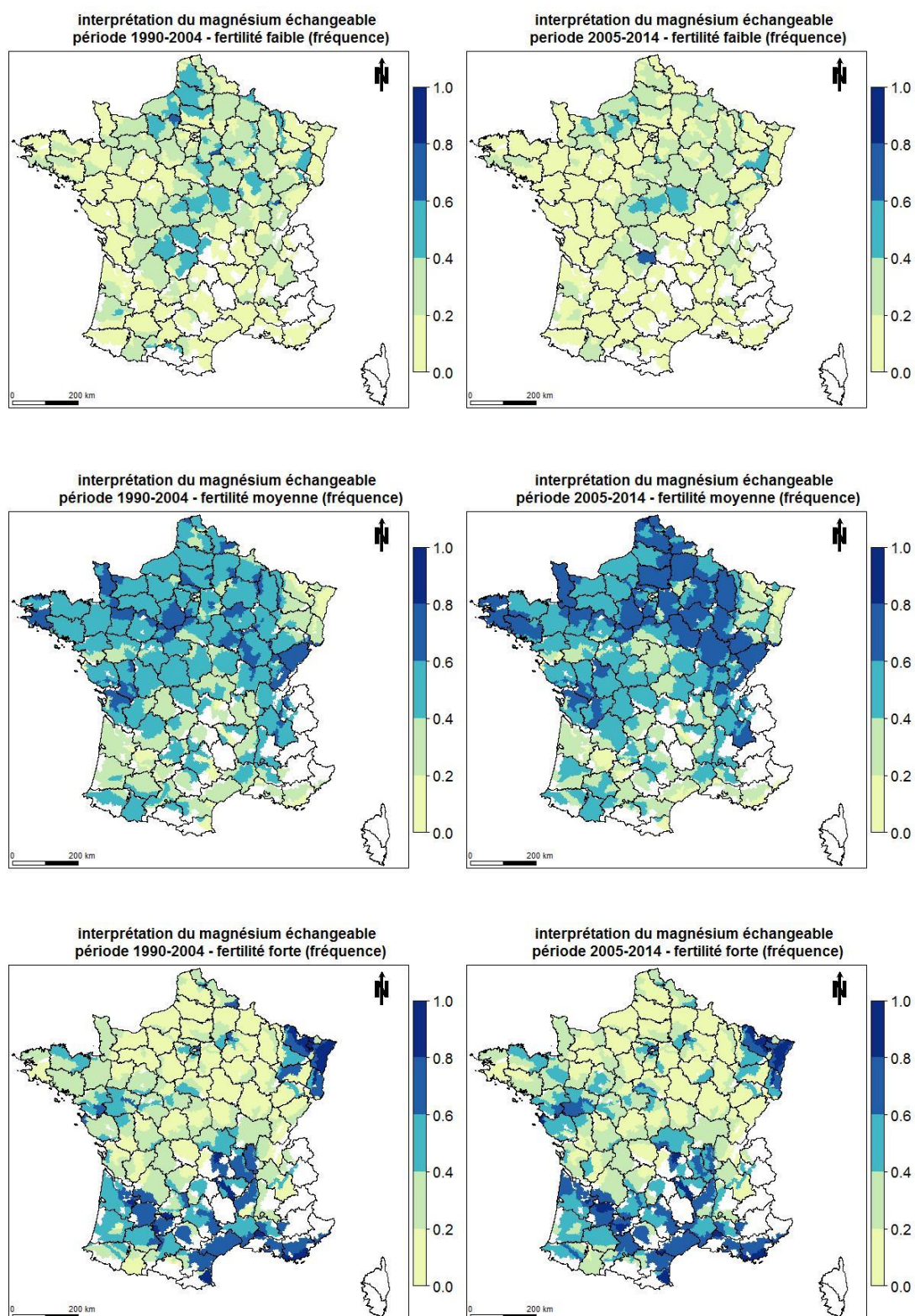


Figure 27 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en magnésium échangeable fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle

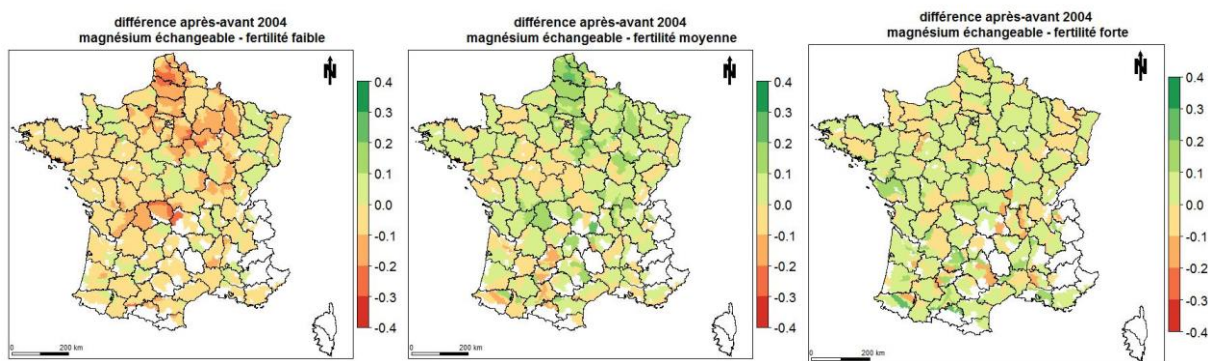


Figure 28 : Différences par PRA calculées entre les pourcentages après 2004– avant 2004 par classe de disponibilité en magnésium échangeable faible, moyenne et forte.

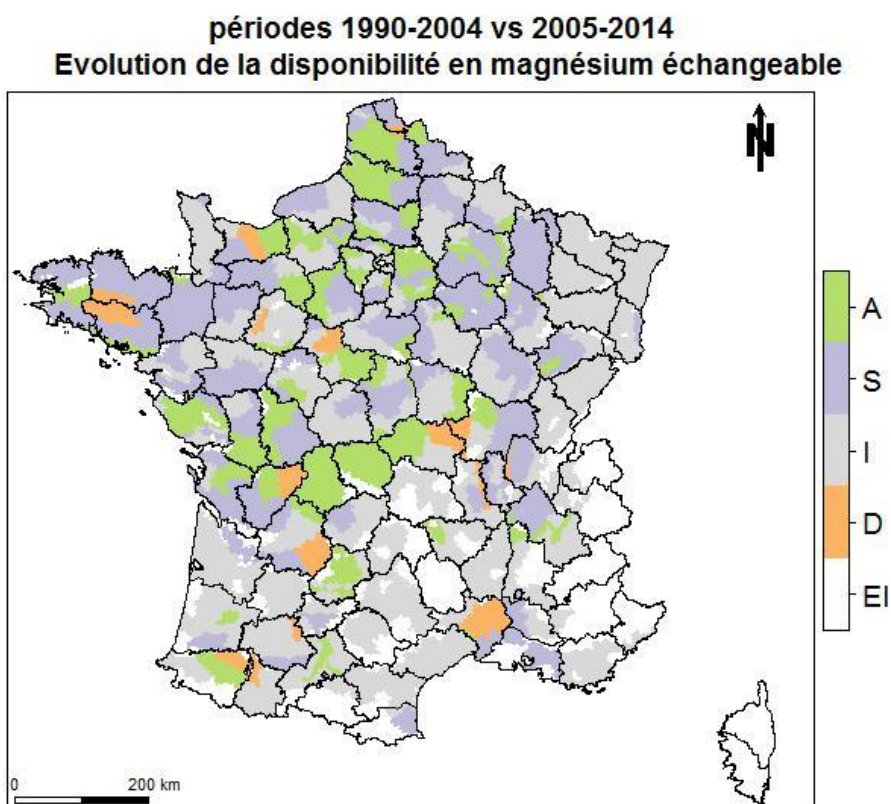


Figure 29 : Cartes d'évolution de la répartition des classes de disponibilité en magnésium échangeable fournies par RegiFert® entre les 2 périodes par petite région agricole, comparaison avant/après 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 . Concernant le résultat du test, "A" signifie augmentation de la disponibilité en magnésium par rapport à la première période, "S" signifie stable l'ordre des classes est inchangé même si les % par classe de disponibilité ont changé, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution de la disponibilité par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

D. Analyse spatio-temporelle des données du phosphore assimilable

1. Analyse pour les 3 méthodes prises indépendamment

Les résultats pour les méthodes d'analyse du phosphore extractible (Dyer, Joret-Hébert et Olsen) prises indépendamment sont moins détaillés que pour le K, Mg et P équivalent Olsen. On ne présente que les cartes d'évolution. La méthode d'interprétation RégiFert® n'a pas été conduite pour chaque méthode isolément car du fait de l'évolution de la fréquence de chaque méthode, il y aurait un fort risque que les populations d'analyses concernées à chaque époque ne soient pas comparables entre elles (avant vs après 2004). Cela induirait un fort biais d'échantillonnage et conduirait à des conclusions erronées sur l'évolution des diagnostics.

a) METHODE DYER

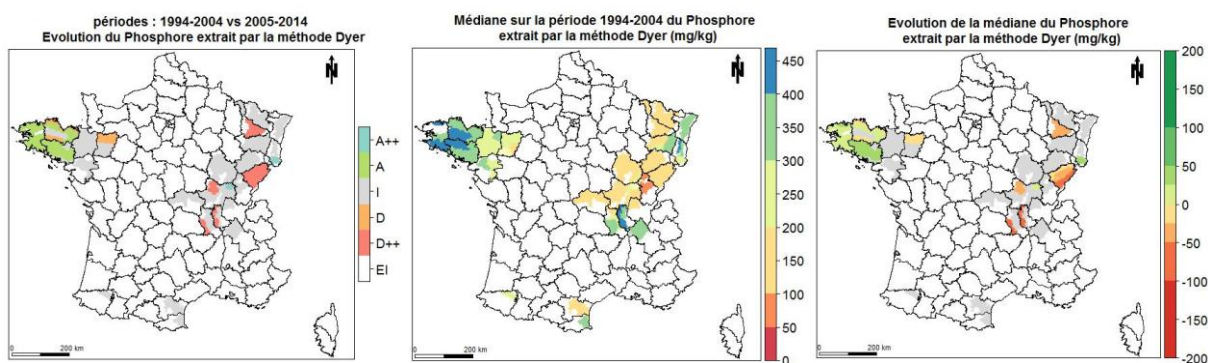


Figure 30 : Cartes d'évolution pour le phosphore extrait par la méthode Dyer Exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par PRA par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs \leq 10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs \leq 10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.

b) OLSEN

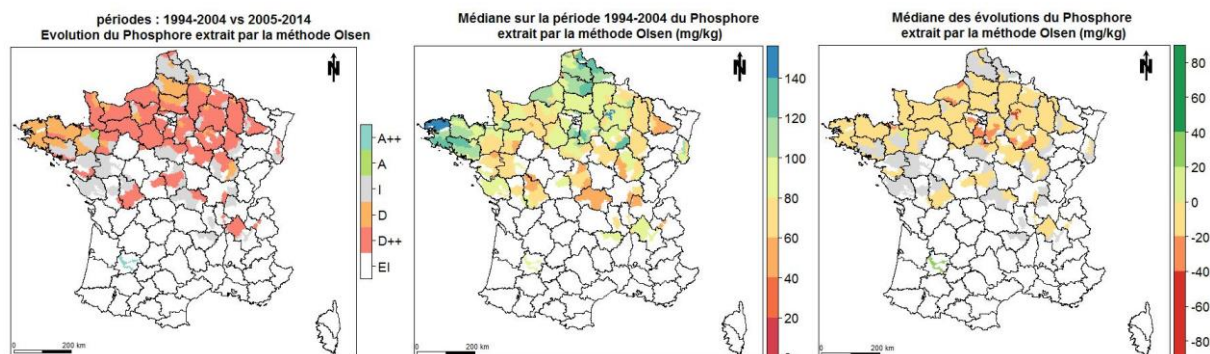


Figure 31 : Cartes d'évolution pour le phosphore extrait par la méthode Olsen Exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par PRA par petite région agricole, comparaison après/avant 2004 par un test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs après/avant 2004 (à droite). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

c) JORET-HEBERT

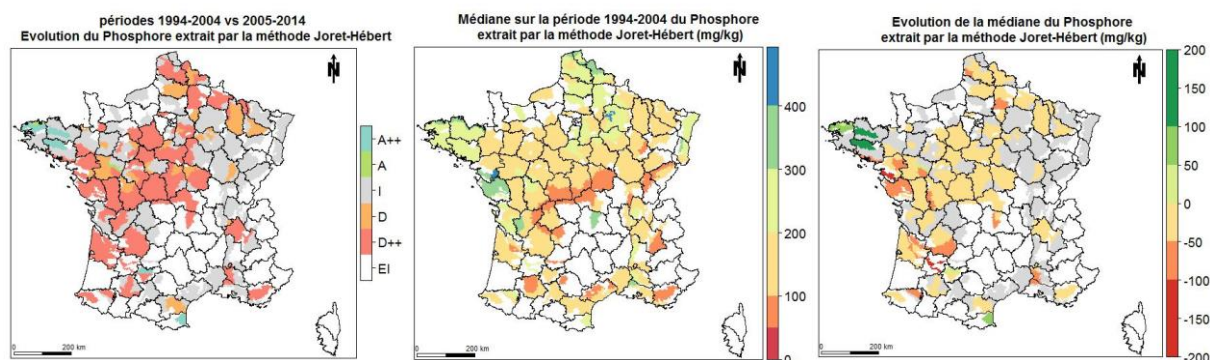


Figure 32 : Cartes d'évolution pour le phosphore extrait par la méthode Joret-Hébert Exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par PRA. Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

2. Analyse à partir du Phosphore dit équivalent Olsen Evolution des teneurs

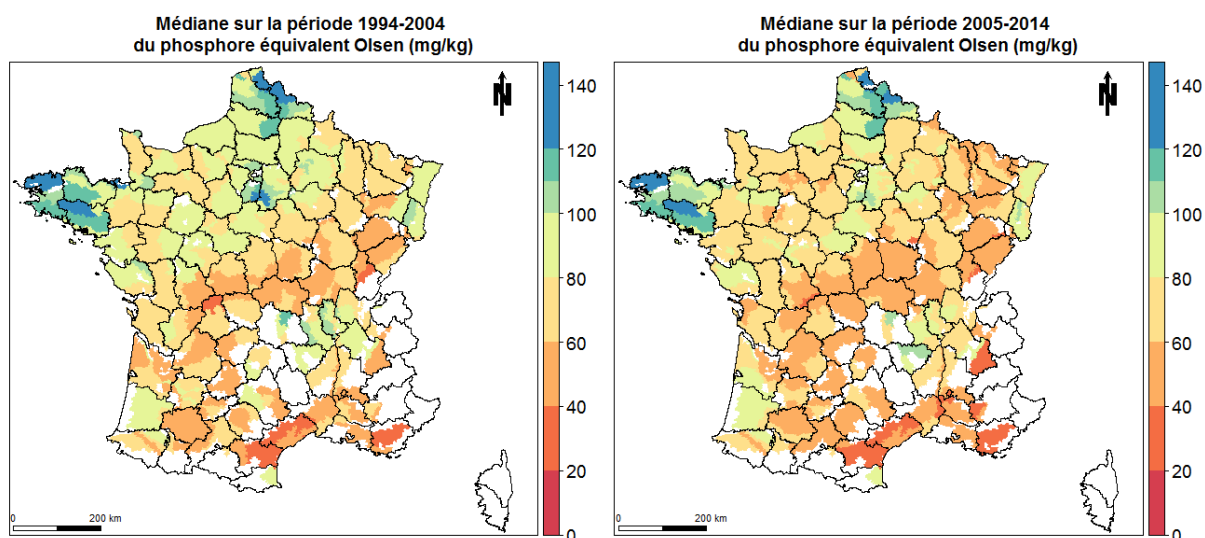


Figure 33 : Cartes des médianes des teneurs en phosphore équivalent Olsen exprimé en P_2O_5 (mg P_2O_5 / kg terre), par petite région agricole, calculées pour les deux périodes.

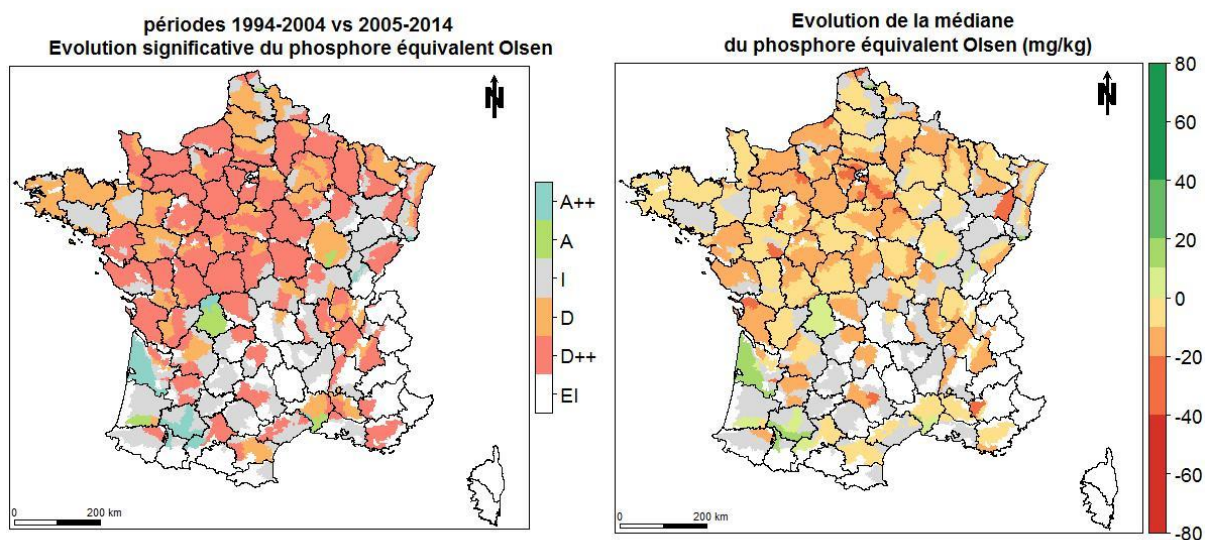


Figure 34 : cartes d'évolution des teneurs pour le phosphore équivalent Olsen (à gauche : le résultat du test d'évolution) et à droite : l'évolution de la médiane des teneurs entre les 2 périodes). Concernant le résultat du test (carte de gauche), "A++" signifie augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, "A" signifie augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, "D++" signifie diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

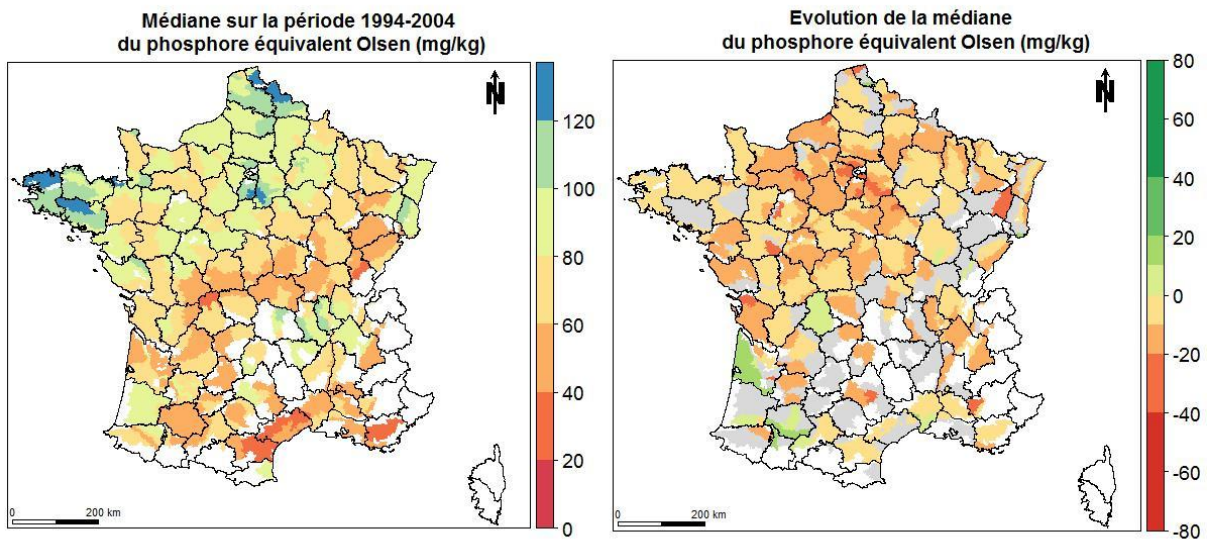


Figure 35 : carte de la médiane des teneurs par PRA sur la période 1994-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite)

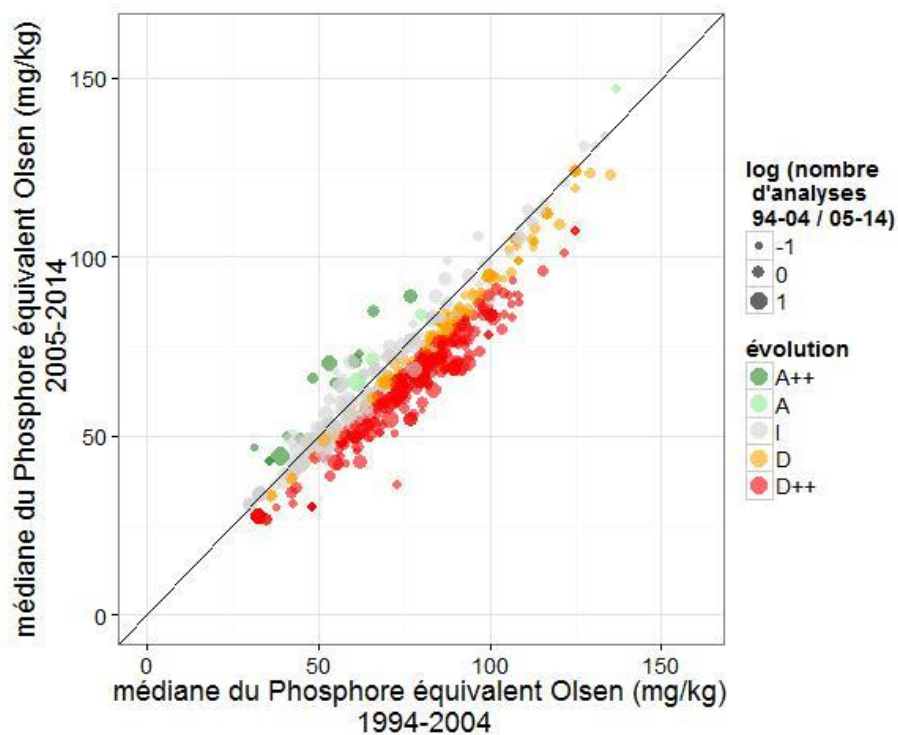


Figure 36 : Comparaison des teneurs médianes par canton avant 2004 et après 2004, pour le phosphore équivalent Olsen (mg/kg)

3. Interprétation agronomique par RegiFert®

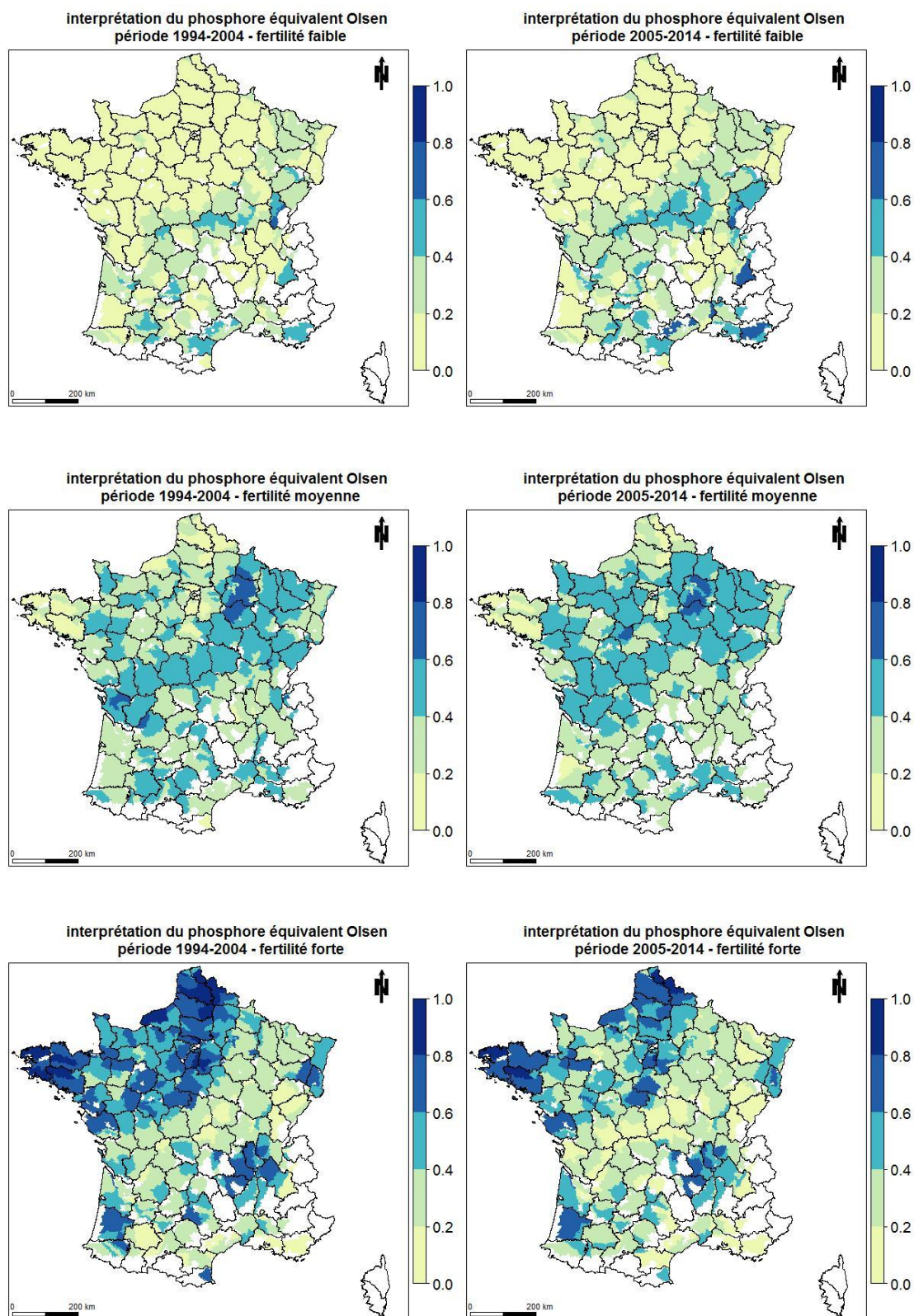


Figure 37 : Cartes de pourcentages d'analyses interprétées dans la classe de disponibilité en phosphore équivalent Olsen fournies par RegiFert® par petite région agricole et par période temporelle

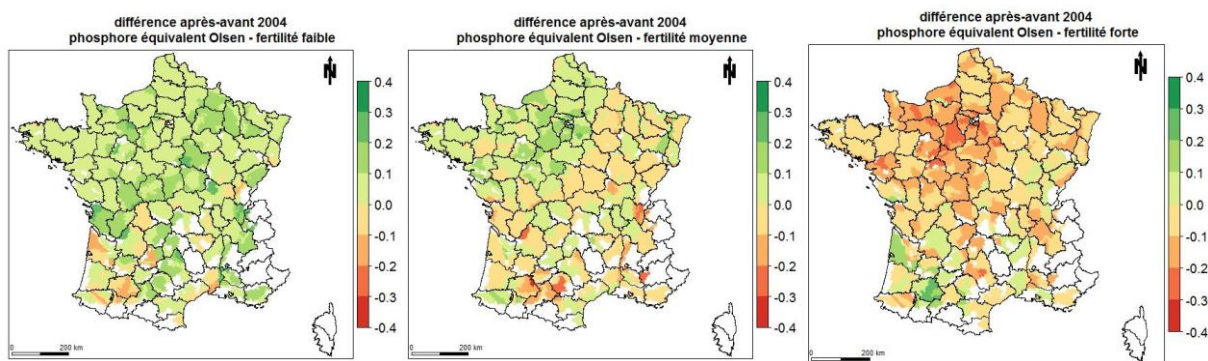


Figure 38 : Différences par PRA calculées entre les pourcentages après 2004– avant 2004 par classe de disponibilité en phosphore équivalent Olsen faible, moyenne et forte

périodes 1994-2004 vs 2005-2014
 Evolution de la disponibilité en phosphore équivalent Olsen

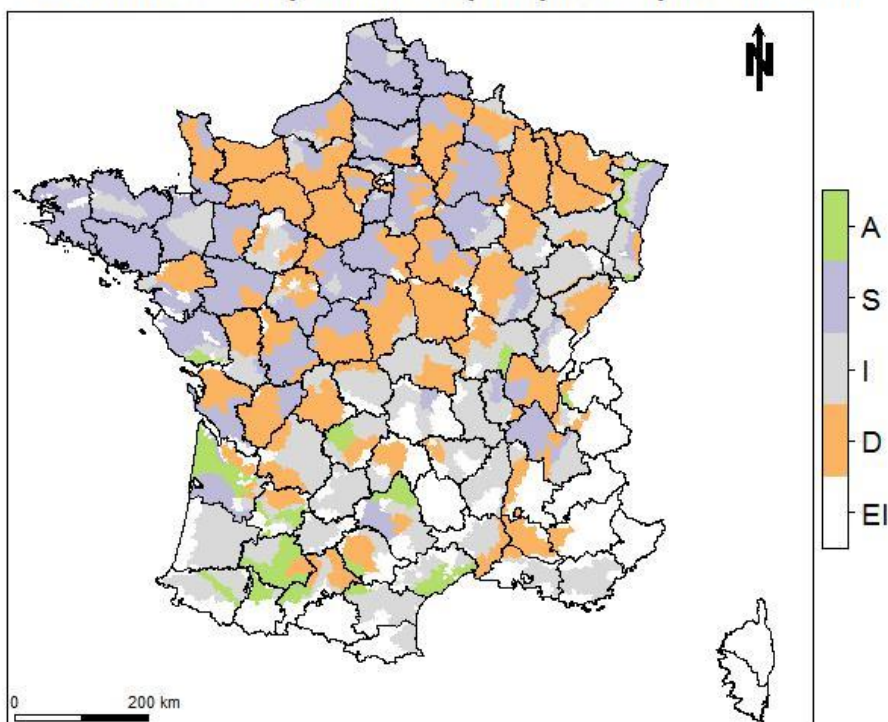


Figure 39 : Cartes d'évolution de la répartition des classes de disponibilité en phosphore équivalent Olsen fournies par RegiFert® entre les 2 périodes. Concernant la légende : "A" signifie augmentation de la disponibilité en phosphore par rapport à la première période, "S" signifie stable l'ordre des classes est inchangé même si les % par classe de disponibilité ont changé, "I" signifie évolution indéterminée, "D" signifie diminution de la disponibilité par rapport à la première période et "EI" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

E. Synthèse Régionale

1. K_2O

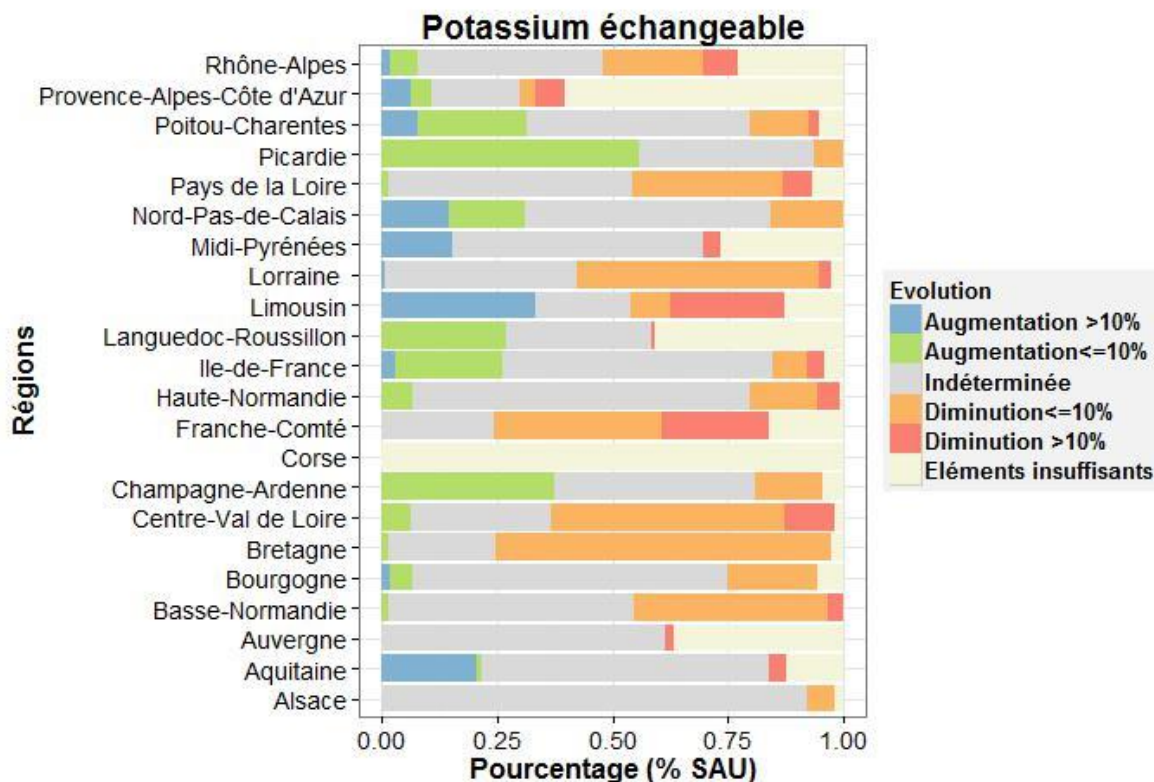


Figure 40 : Synthèse en surface agricole utile par région des différentes classes d'évolution des teneurs en K_2O échangeable : augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, " évolution indéterminée, diminution des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Eléments insuffisants" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test.

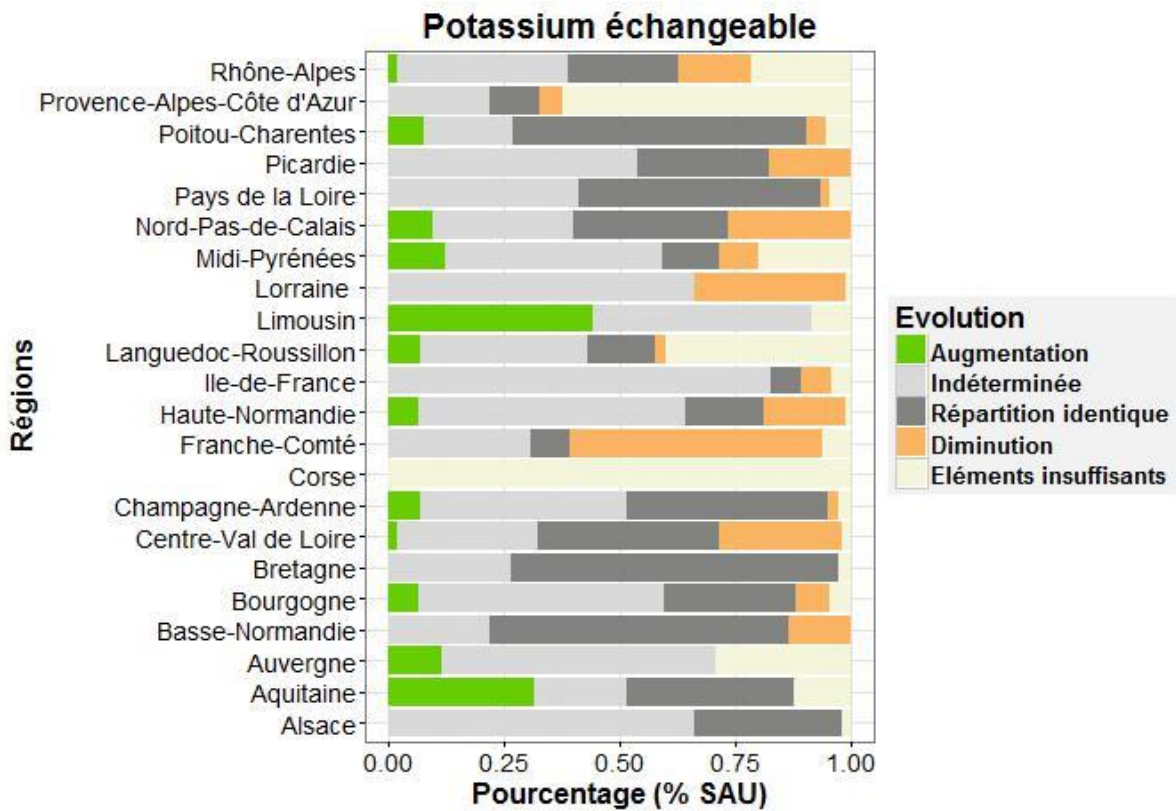


Figure 41 : Synthèse en surface agricole utile par région de l'évolution de la disponibilité en potassium (évolution de la répartition dans les trois classes de fertilité {faible, moyenne, forte})

2. MgO

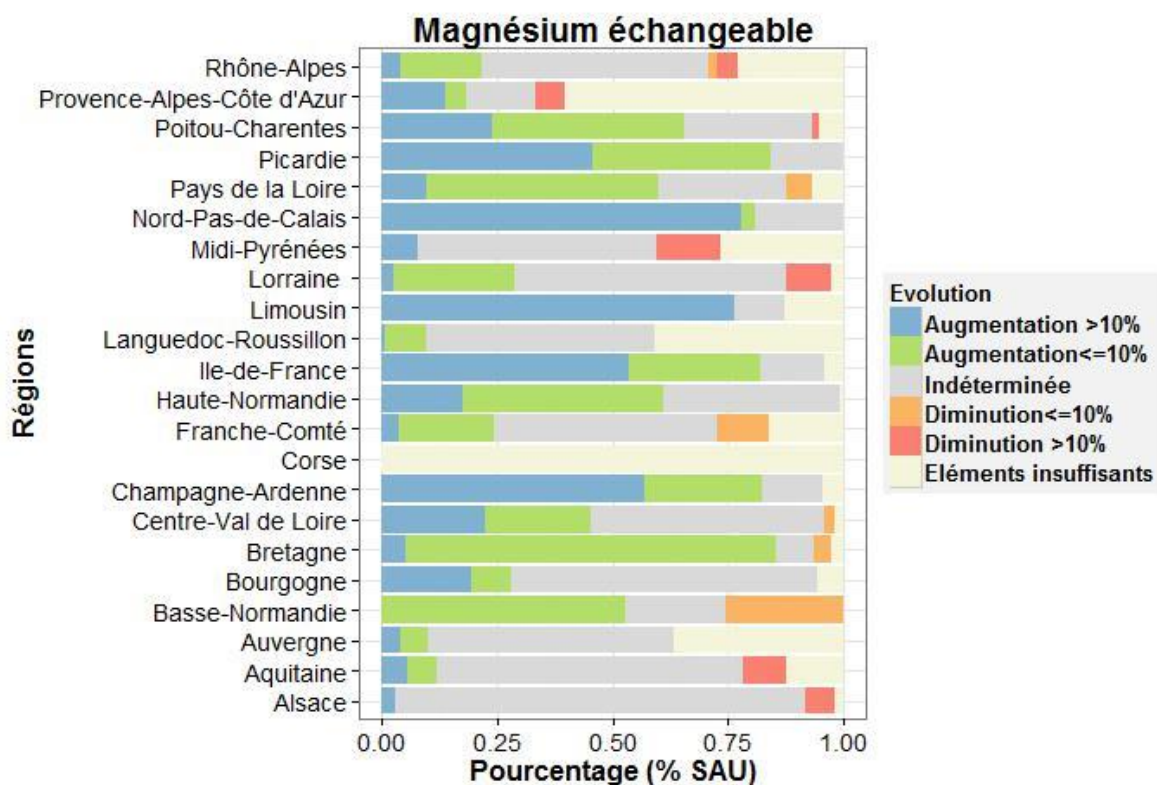


Figure 42 : Synthèse en surface agricole utile par région des différentes classes d'évolution des teneurs en MgO échangeable : augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, " évolution indéterminée, diminution des teneurs <=10% par rapport à la teneur à la première période, diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Eléments insuffisants" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

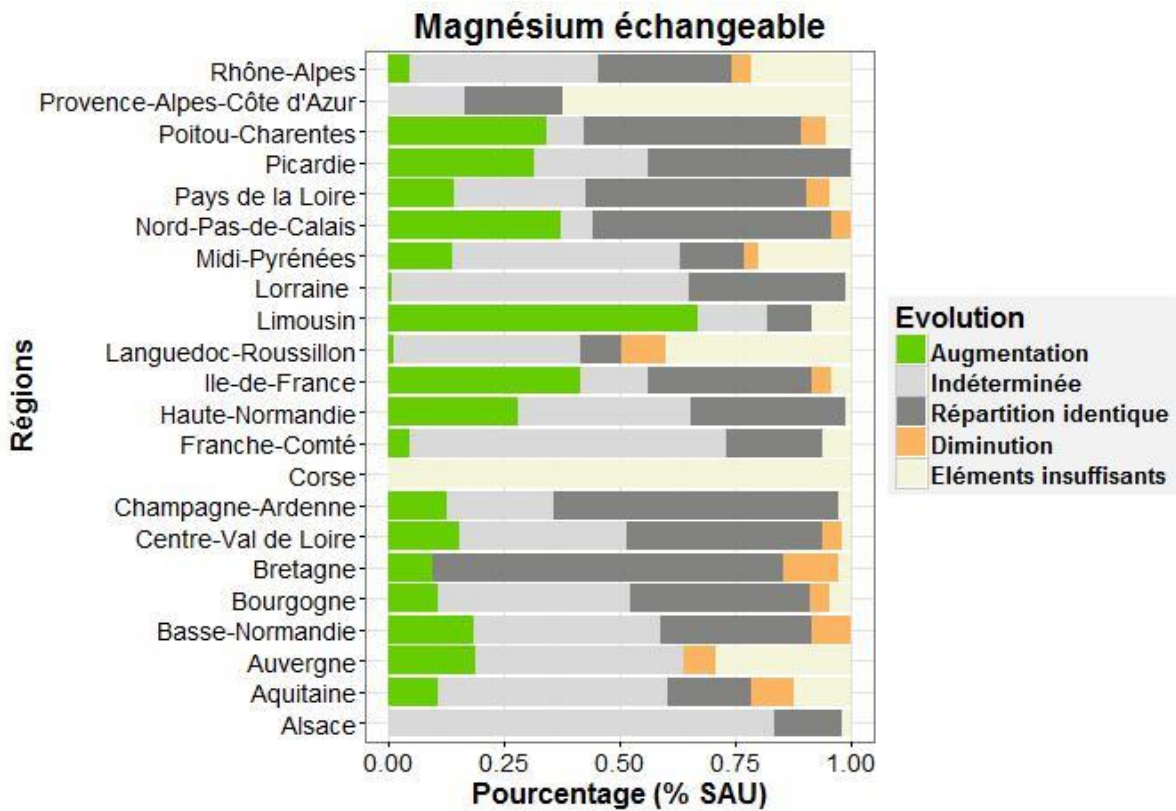


Figure 43 : synthèse régionale de l'évolution de la disponibilité en magnésium (synthèse de la répartition dans les trois classes de fertilité {faible, moyenne, forte})

3. P₂O₅ équivalent Olsen

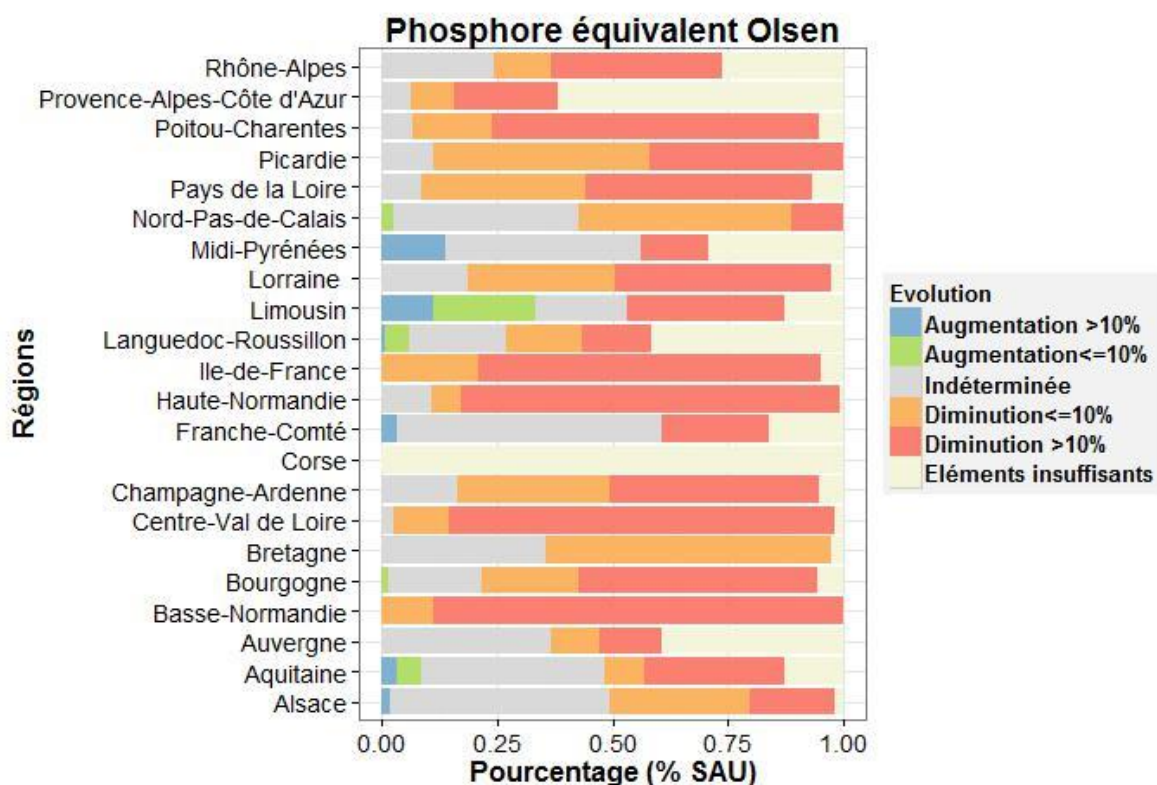


Figure 44 : Synthèse en surface agricole utile par région des différentes classes d'évolution des teneurs en phosphore équivalent Olsen : augmentation >10% par rapport à la teneur à la première période, augmentation des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, " évolution indéterminée, diminution des teneurs <10% par rapport à la teneur à la première période, diminution des teneurs >10% par rapport à la première période et "Eléments insuffisants" signifie que le nombre d'analyses est insuffisant pour faire le test

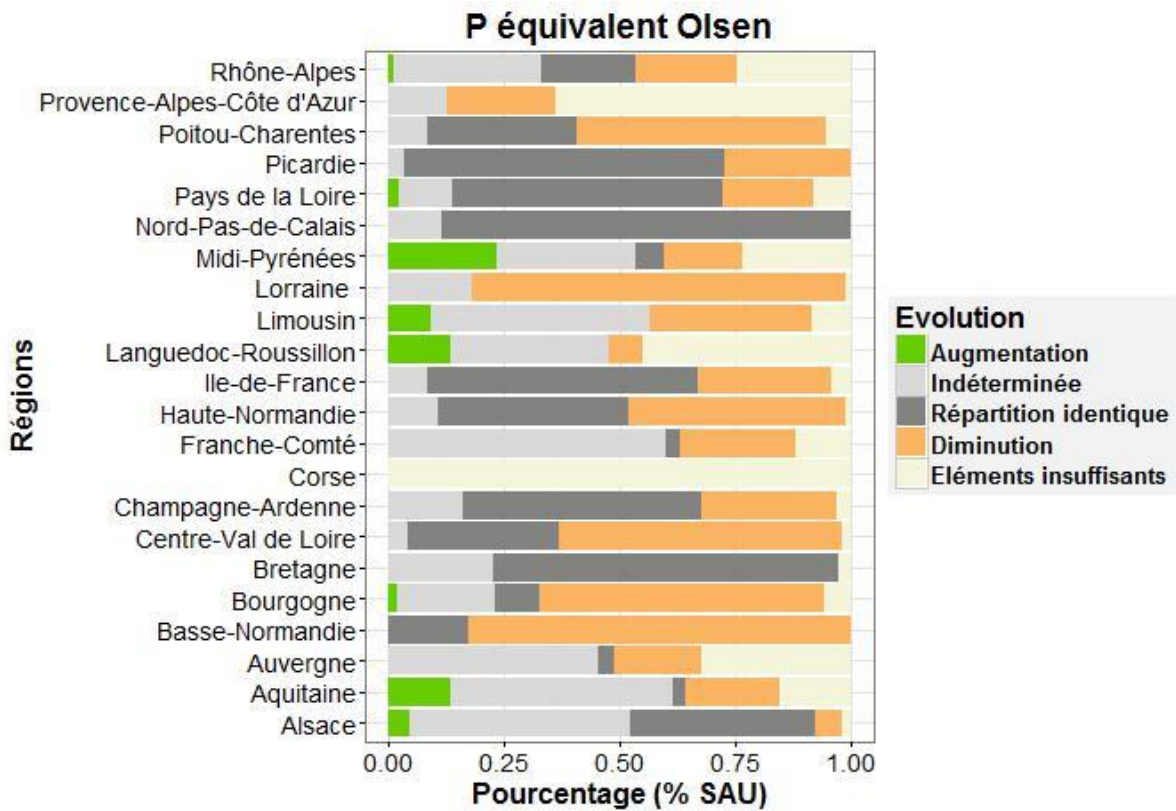


Figure 45 : synthèse régionale de la disponibilité en phosphore équivalent Olsen (Synthèse en SAU par région de l'évolution de la répartition dans les trois classes de fertilité {faible, moyenne, forte})

F. Synthèse nationale

Tableau 4 : tableau résumant le % de SAU par type d'évolution en teneurs entre les 2 périodes (avant et après 2004) pour chaque paramètre étudié

évolution des teneurs	Augmentation >10%	Augmentation <10 %	Indéterminée	Diminution <10 %	Diminution >10%	Eléments insuffisants
paramètre	% SAU	% SAU	% SAU	% SAU	% SAU	% SAU
K2O	4,76	10,07	46,23	22,26	4,50	12,18
MgO	19,57	25,35	37,88	2,41	2,61	12,18
P2O5 équiv. Olsen	1,81	1,29	20,89	20,99	42,19	12,84

Tableau 5 : tableau résumant le % de SAU par type d'évolution en classes de disponibilité en élément nutritif interprétées par RegiFert® entre les 2 périodes (avant et après 2004) pour chaque paramètre étudié

évolution de la fertilité	Augmentation	Répartition identique	Indéterminée	Diminution	Pas assez de données
paramètre	% SAU	% SAU	% SAU	% SAU	% SAU
K2O	6,9	31,7	4,3	10,6	10,3
MgO	15,5	35,2	34,6	4,5	35,22
P2O5 équivalent Olsen	7	37,7	40,3	10,6	10,35

G. Commentaire de synthèse

1. Le K₂O

La répartition des échantillons analysés en K₂O échangeable est très hétérogène dans l'espace montrant des PRA avec 1800 résultats en moyennes. Dans le temps, la répartition est plus homogène montrant une relative stabilité du nombre de données par période.

La médiane K₂O échangeable sur 2005-2014 est de 265 pour la France avec une très large variabilité.

Les teneurs en K₂O échangeable pour les deux périodes sont très variables selon les régions. Elles s'étendent de moins de 100 mg.kg⁻¹ dans la région des Landes ou de la Sologne à plus de 500 mg.kg⁻¹ dans le Barrois dans l'Aube ou le Cognaçais. En Bretagne et dans le Nord, les valeurs sont élevées, bien que plus irrégulières. Dans le Centre et le sud de la vallée du Rhône, la situation paraît assez contrastée, où des zones à teneur très faible côtoient des zones à teneur élevée. Les cartes des teneurs font donc apparaître des diversités régionales bien marquées, coïncidant avec la diversité des textures : les régions les plus riches ont dans l'ensemble les sols les plus argileux, à forte CEC, et les plus pauvres les sols les plus sableux et à faible CEC où il n'est de toute façon pas possible d'obtenir des teneurs en K élevées. Et certains types d'argiles peuvent libérer naturellement beaucoup de K. Cette diversité des

teneurs peut aussi être le reflet d'historiques de productions contrastés, certaines cultures (pomme de terre, légumes,...) demandant une forte disponibilité en K ont été abondamment fertilisées.

Le calcul des classes de disponibilité en élément fertilisant montre que la plupart des analyses se trouve dans la classe « moyenne » à « forte ». En effet, moins de 13 % des résultats interprétés tombent dans la classe faible. Ces résultats semblent concentrés dans le Jura et les Landes. Les teneurs tombant dans la classe forte se trouvent dans le Nord, le nord de la Bretagne avec l'Ille-et-Vilaine, la Champagne, l'Alsace, la Chalosse, le Gers, la vallée du Rhône.

Les évolutions mises en évidence sur les teneurs sont, pour la plupart des régions, inférieures à 10 % de la teneur médiane calculée à la première période (1990-2004). Cela représente des évolutions inférieures à 25 mg/Kg de K₂O échangeable sur 32 % de la surface agricole utile française. Les évolutions plus marquées (supérieures à 10 % de la teneur initiale) représentent moins de 10 % de la SAU. Ces évolutions semblent localisées dans le Jura et le sud de l'Indre et la Corrèze. Les augmentations les plus fortes sont situées en Haute Vienne, Nord et sud de la Gironde. A l'échelle de la France, on peut ainsi observer des évolutions dans les deux sens qui touchent l'ensemble de la gamme de teneur.

Ces évolutions en teneurs ne semblent pas changer la répartition des pourcentages des classes de fertilité au sein des PRA. La classe S est en effet dominante, traduisant une évolution des pourcentages mais sans changer l'ordre d'importance des classes. Quelques PRA montrent des évolutions plus marquées mais leur répartition géographique est difficile à interpréter.

2. Le MgO

La répartition des échantillons analysés en MgO échangeable disponibles dans la BDAT est très hétérogène dans l'espace montrant des PRA avec en moyenne 1800 résultats. Quelques PRA disposent de plus de 10 000 analyses. Dans le temps, la répartition est plus homogène montrant une relative stabilité du nombre de données sur la période de l'étude.

Les teneurs en MgO échangeable pour les deux périodes sont très variables selon les régions. Elles s'étendent de moins de 100 mg.kg⁻¹ dans la région des Landes ou de la Sologne mais également en Seine et Marne et dans l'Eure à plus de 500 mg.kg⁻¹ dans le nord de la Moselle. La médiane des médianes par PRA sur la période 2005-2014 s'élève à 145 mg.kg⁻¹. De plus, il n'apparaît pas de relation simple entre les variations des teneurs observées et une autre caractéristique majeure des sols ou du contexte géologique (quoique certains calcaires peuvent être source de Mg). Des teneurs assez élevées sont observées dans les Charentes, le sud du Massif Central, la Lorraine et l'Alsace (à l'exception des Vosges), ainsi que l'Est du Jura. Ces zones les plus riches ne coïncident qu'imparfaitement

avec celles où les horizons superficiels sont les plus riches en argile. De même, les zones peu argileuses (médiane cantonale $<10 \text{ g.kg}^{-1}$) sont généralement pauvres, mais elles ne sont pas les seules.

Les résultats du calcul des classes de disponibilité en élément fertilisant montrent que plus de la moitié des analyses sont interprétées dans la classe « moyenne ». Moins de 20 % des résultats interprétés tombent dans la classe « faible ». Ces résultats sont concentrés dans la Nièvre, l'Indre, les Vosges et la Corrèze. Les teneurs interprétées comme « moyenne » se répartissent sur une grande moitié Nord-Ouest. Enfin, les résultats d'analyses interprétées comme « forte » sont plus concentrées en Alsace, Moselle, Tardenois, Sud du Massif Central, Languedoc-Roussillon, Garonne et Tarn et Garonne.

La tendance générale semble à la hausse des teneurs. Les évolutions marquées sont mises en évidence pour le Nord, le sud du Bassin parisien, la Marne, le nord de l'Aube, la Creuse et la Haute-Vienne. Les évolutions à la baisse concernent des PRA isolées.

Ces évolutions ne sont cependant pas assez importantes pour changer la répartition des classes de disponibilité à l'exception du Nord, de la Corrèze, de la Vendée et de la Haute-Vienne.

3. Le P_2O_5 équivalent Olsen

Comme nous l'avons déjà abordé dans ce document, la répartition spatio-temporelle des différentes mesures en phosphore assimilable issues des 3 méthodes couramment utilisées en France est très hétérogène. Cela nous a conduit à produire un indicateur statistique dit « équivalent Olsen » permettant de synthétiser l'ensemble des mesures en P par le recours à une règle de pédotransfert appliquée aux analyses P Dyer et P Joret-Hébert. La densité d'observation ainsi obtenue permet de couvrir avec un nombre important de résultats la majorité des régions à l'exception notable du Massif Central et des zones de montagne.

Les cartes des teneurs médianes par PRA montrent des structures spatiales très marquées avec des situations très hétérogènes. Les teneurs les plus élevées sont ainsi observées en Nord-Picardie, en Alsace, Bretagne, et dans les départements entourant la région lyonnaise, dans une moindre mesure le nord du Bassin parisien, Pays-de-Loire et Poitou-Charentes. Il faut noter que la dispersion des valeurs (variabilité) est beaucoup plus forte dans les zones à teneurs élevées. Les teneurs les plus faibles se trouvent principalement dans les régions où domine un élevage plutôt extensif (Limousin, Jura et Vosges) mais également dans le Sud-Est de la France.

Les structures spatiales des cartes issues de la mise en œuvre de l'interprétation en classes de disponibilité en élément fertilisant semblent marquées par les systèmes de culture. On note ainsi la prédominance de la classe Forte au sein d'un grand arc Nord-Ouest, la région lyonnaise, l'Alsace, le Gers et les Landes. Les classes moyennes sont plutôt réparties au long

de la ceinture centrale et notamment la Champagne. Enfin, la prédominance de la classe faible a lieu au long de la bordure Nord du Massif Central ainsi que dans le Jura et le Sud-Est.

Cette situation contrastée de la répartition des teneurs en P semble avoir subi une évolution assez importante durant la période de l'étude. Ainsi, une évolution significative de plus de 10% de la médiane initiale pour la majorité des PRA (plus de 60 % de la SAU) a été mise en évidence. Les augmentations représentent moins de 5 % de la SAU, se localisant autour de Bordeaux, dans la Vienne et dans le Gers. Ces évolutions ont modifié significativement la répartition des classes de disponibilité en élément nutritif représentant 20 % de la SAU. Ces PRA ne se situent pas dans les zones où les teneurs étaient les plus élevées. Dans ce dernier cas, la répartition des classes n'a pas évolué. On assiste donc à une tendance à la diminution de la disponibilité en P, avec parfois (localement) en conséquence une évolution de la distribution de fréquence des classes de fertilité (diagnostic). La fréquence des situations à risques de carence semble augmenter légèrement.

4. Discussion

Les résultats présentés dans ce rapport correspondent au traitement des analyses disponibles pour les périodes choisies et agrégées par entité spatiale (canton, PRA, ou région). Les unités regroupant moins de 50 résultats pour les cantons et 100 pour les PRA et régions, ne sont pas prises en considération pour les calculs effectués à la maille considérée.

La répartition des échantillons analysés n'étant pas homogène sur le territoire national, il importe de prendre connaissance de cette répartition à partir de la carte des effectifs correspondante. Par ailleurs, compte tenu du mode d'acquisition des données utilisées pour réaliser cette représentation cartographique, il est incorrect, voire dangereux au regard des conclusions que l'on pourrait en tirer, de l'utiliser à une échelle plus précise que le 1/250 000. Il n'est pas possible d'exclure des biais probables liés au mode de collecte et ce, malgré les procédures statistiques mises en œuvre. Les motivations qui conduisent à la prise de décision de la demande d'analyse n'étant pas connu, une sur- ou sous-estimation des évolutions est possible.

La méthodologie employée pour avoir une clé d'interprétation nationale des indicateurs d'évolutions est simplifiée, il faut être prudent dans le cas d'une interprétation « locale » et donc relativiser les interprétations qui pourraient résulter de zooms sur les zones calcaires notamment.

Il serait possible de comparer les bilans d'entrées-sorties de fertilisants avec l'évolution de chaque paramètre mais la comparaison est délicate pour plusieurs raisons. En effet, ces bilans ne tiennent pas compte des pertes (lessivage, ruissellement), ils sont simplifiés et comptabilisent les excréments totales des animaux parfois trop optimistes en région d'élevage.

De plus, les bilans entrées-sorties de fertilisants et les analyses de terre ne portent pas forcément sur les mêmes parcelles agricoles. En particulier dans le cas de régions avec des sols agricoles bien différenciées entre cultures fertilisées d'une part (analyses de terres plus nombreuses) et pâtures bénéficiant davantage de recyclage d'effluents (et enrichies indirectement par les importations d'aliments : tourteaux...). Pour faire des bilans entrées-sorties complets pour la sphère agricole, il faudrait intégrer les flux d'aliments des animaux (aliments qui voyagent plus que les effluents). Mais il est vrai qu'inventorier les flux d'effluents sur la base des effectifs d'animaux inclus indirectement les flux d'aliments.

Les analyses de terre ne rendent compte que d'une partie des bilans de minéraux. Une part des minéraux des bilans positifs peut intégrer des compartiments non extraits à l'analyse. Ce pourcentage dépend des propriétés de sorption des sols (pouvoir tampon) et de leur "indice de saturation".

Il y a nombre de source d'incertitude dans chaque approche : évolution des stocks ou bilan des flux. Par exemple on pourrait se poser la question s'il n'y a pas des biais régionaux systématiques dans l'estimation de l'équivalence P-Joret/P Olsen ou P Dyer/P Olsen qui ferait qu'on surestimerait ou sous-estimerait systématiquement un P Olsen estimé d'analyse ancienne, créant un "tendance" qui ne serait qu'un artefact.

Traiter les données BDAT non en deux phases longues mais en davantage de périodes (si le nombre de données est suffisant) confirmerait ou infirmerait certaines tendances identifiées ici.

IV. Conclusions

Ce projet a été conduit dans le cadre d'un partenariat en l'INRA et l'UNIFA. Il avait deux objectifs principaux :

- mettre en évidence des évolutions de teneurs en P, K et Mg avant et après 2004 ;
- estimer les conséquences de ces évolutions de teneurs sur les états de fertilité (disponibilité) en P, K et Mg.

Notre démarche a consisté à mettre en œuvre des outils d'analyse spatio-temporelle et un outil d'interprétation agronomique (RegiFert®) sur les données collectées dans le cadre du programme BDAT du GIS Sol.

Après avoir effectué un état des lieux des données disponibles par canton et petite région agricole, nous avons élaboré une méthode pour produire un indicateur permettant de synthétiser les données de phosphore mesurée par les différentes méthodes. De ce fait, une fonction de passage des données Dyer ou Joret-Hébert vers un indicateur équivalent de la méthode Olsen a été produite.

La fonction de passage en équivalent Olsen obtenue est peu biaisée et a permis l'obtention d'un jeu de données phosphore équivalent Olsen permettant de comparer les teneurs en phosphore avant et après 2004.

Un nombre important de résultats (cartes, graphiques et tableaux) a été produit durant cette étude. Des cartes permettent de comparer l'évolution des teneurs du potassium échangeable, du magnésium échangeable et du phosphore extractibles par canton et par petite région agricole avant et après 2004.

Celles-ci ont mis en lumière des évolutions de teneurs contrastées selon les régions et les paramètres étudiés. Ainsi, l'évolution des teneurs en potassium est indéterminée sur une majorité des zones agricoles en France sauf en régions Bretagne, Normandie, Centre et Lorraine où on note une diminution significative des teneurs après 2004.

Concernant les teneurs en magnésium c'est plutôt une augmentation qui est remarquée sur les régions Nord-Pas-de Calais, Picardie, Champagne-Ardenne, Limousin, et Bretagne.

Les teneurs en phosphore ont diminué dans une majorité de petites régions agricoles réparties en région Centre, Bretagne, Normandie, Picardie, Champagne-Ardenne, Lorraine, Bourgogne et Franche-Comté.

D'autre part, les cartes illustrant la disponibilité en élément nutritif P, K et Mg (fertilité) montrent une tendance similaire à l'évolution des teneurs à savoir une diminution de la disponibilité en K localisée dans les régions du Centre-Ouest, une augmentation en Mg dans les régions du Nord-Est de la France et enfin une diminution assez importante de la disponibilité en phosphore dans beaucoup de régions françaises. Ces évolutions, sont encore

limitées et ne sont pas signe de risque de carence à grande échelle ; elles doivent toutefois inciter, surtout pour le phosphore, à une certaine vigilance.

V. Bibliographie

AFNOR « Qualité des sols » 1999, volumes 1 & 2

Benjamini, Y., Hochberg, Y., 1995. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *J. R. Stat. Soc. Ser. B* 57, 289–300

COMIFER 1993. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures, groupe PK (Castillon P., Colomb B., Decroux J., Diab M., Fardeau J.-C., Laurent F., Masse J., Plet P., Villemin P.), 28 p., Comifer Paris

Denoroy P., Dubrulle P., Villette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M., Marin-Lafèche A., Pellerin F., Pellerin S., Boiffin J., 2004. RegiFert, interpréter les résultats des analyses de terre, 128 p., INRA Editions

Follain S, Schwartz C, Denoroy P, Villette C, Saby NPA, Arrouays D, Lemercier B, Walter C: A method for assessing available phosphorus content in arable topsoils over large spatial scales. *Agron Sustain Dev* 2009, 29(2):371-379

Martin MP, Wattendbach M, Smith P, Meersmans J, Jolivet C, Boulonne L, Arrouays D., 2009: Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences*, 8:1053 1065.

Merelle F. 1998, l'analyse de terre aujourd'hui ; GEMAS, 178 p.

Servain F., Sagot S., 2014. Evolution des teneurs en éléments fertilisants des sols agricoles : les limites des enquêtes et des statistiques réalisées à partir des bases de données. 12èmes Journées d'Etude des Sols, 30 juin - 4 juillet 2014, Le Bourget du Lac

UNIFA. Evolution des bilans régionaux de fertilisation en France de 1988 à 2013 pour le phosphore, le potassium et le magnésium (en ligne sur www.unifa.fr)

VI. Annexes

A. Règle d'interprétation de l'évolution de la répartition en classes de fertilité

L'interprétation agronomique (diagnostic) exprime la nécessité plus ou moins forte de fertiliser pour permettre aux cultures prévues d'exprimer leur potentiel de production suivant l'état initial du sol tel que caractérisé par l'analyse. Elle comprend un nombre limité de modalités, le système d'expression devant être assez simple pour en faciliter la communication.

La méthode choisie se base sur les principes de l'interprétation d'analyse « RégiFert » (Denoroy *et al.*, 2004), elle-même basée sur les principes proposés par le Comifer (1993). L'affectation d'une analyse à une classe diagnostique est basée sur la situation de la valeur de l'analyse par rapport à des valeurs-seuil notées L1 et L2 dans RegiFert.

Il existe 3 classes diagnostics exprimant le potentiel de fertilité : fort, moyen et faible.

Le tableau 6 compare l'ordre des classes pour une PRA donnée selon la fréquence de chaque classe diagnostic. Par exemple « faiblefortmoyen » signifie que la classe diagnostic du potentiel de fertilité dominant d'une PRA considérée est « faible », puis de façon secondaire « fort » et dans une moindre importance « moyen ». (En fréquence cela pourrait être 50% diagnostic « faible », 30% diagnostic « fort » et 20% diagnostic « moyen »).

Concernant l'interprétation :

- A signifie augmentation
- D signifie diminution
- S signifie pas de changement dans l'ordre (Stable)

Tableau 6 : Règle d'interprétation de l'évolution de la répartition en classes de fertilité

Ordre des fréquences des diagnostics avant 2004	Ordre des fréquences des diagnostics après 2004	Interpretation
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	S

Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	S
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	S
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	S
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	S
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	A

Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	S
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D
Faiblefortmoyen	Fortmoyenfaible	D

B. Relation entre les méthodes P

Nous avons utilisé les médianes du rapport Phosphore Dyer/Phosphore Olsen ou Phosphore Joret/Phosphore Olsen par classe de pH et de CEC présentées dans les tableaux 6 et 7. Les tableaux ont été recalculés avec les données de la BDAT mises à jour (jeu de données F).

Ces tableaux sont le résultat d'une utilisation des données du jeu de données F pour recalculer les rapports entre mesures de P suivant la grille de lecture proposée par Schwartz & Julien, il s'agit d'une méthode d'harmonisation que nous avons testé avant l'utilisation de la fonction de pédotransfert calculée à partir du logiciel R.

Tableau 7 : Variation de la médiane du rapport Dyer/Olsen avec le pH et la CEC (en haut à gauche de chaque cellule est noté le nombre de résultats correspondant)

P_Dyer/P_Olsen	pH	5,9	6,5
CEC	6522	2,85	13707
			3,53
			7106
			3,76
9	9228	2,95	22481
			3,67
			9908
			4,05
12	9128		18754
			4,13
			6008
			4,35

Tableau 8 : Variation de la médiane du rapport Joret/Olsen avec le pH et la CEC (en haut à gauche de chaque cellule est noté le nombre de résultats correspondant)

P_Joret/P_Olsen	pH	7,5	8,0
CEC	16660	1,82	3395
			2,32
			6346
			3,41
9	16726	1,76	4696
			2,18
			8353
			3,03
13	13193		10066
			1,71
			21715
			2,49

C. Résultats à l'échelle cantonale

Potassium

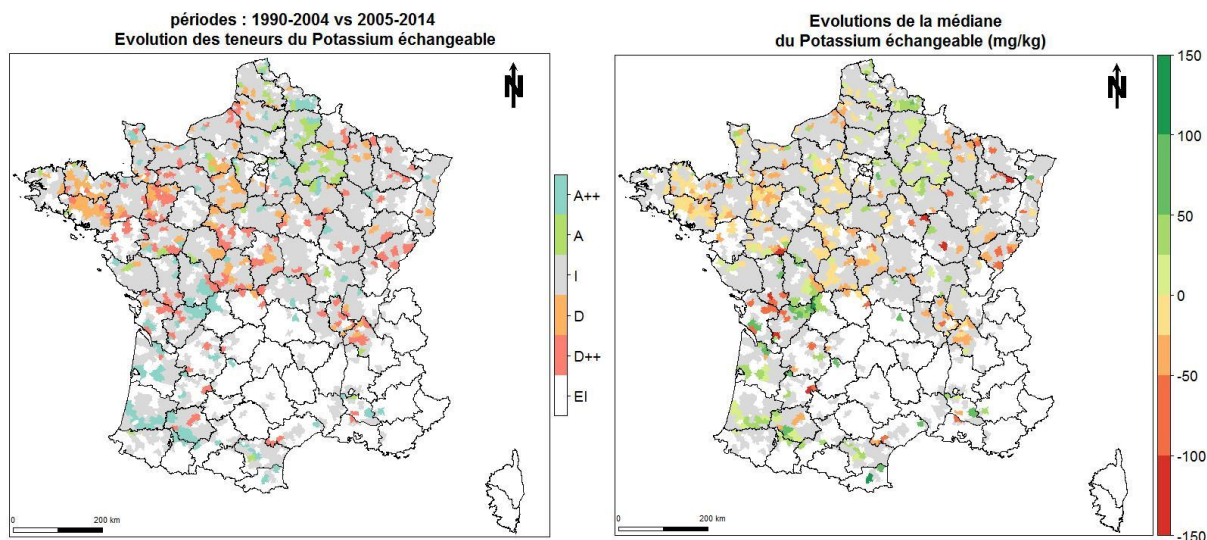


Figure 46 : Résultat du test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs (à droite).

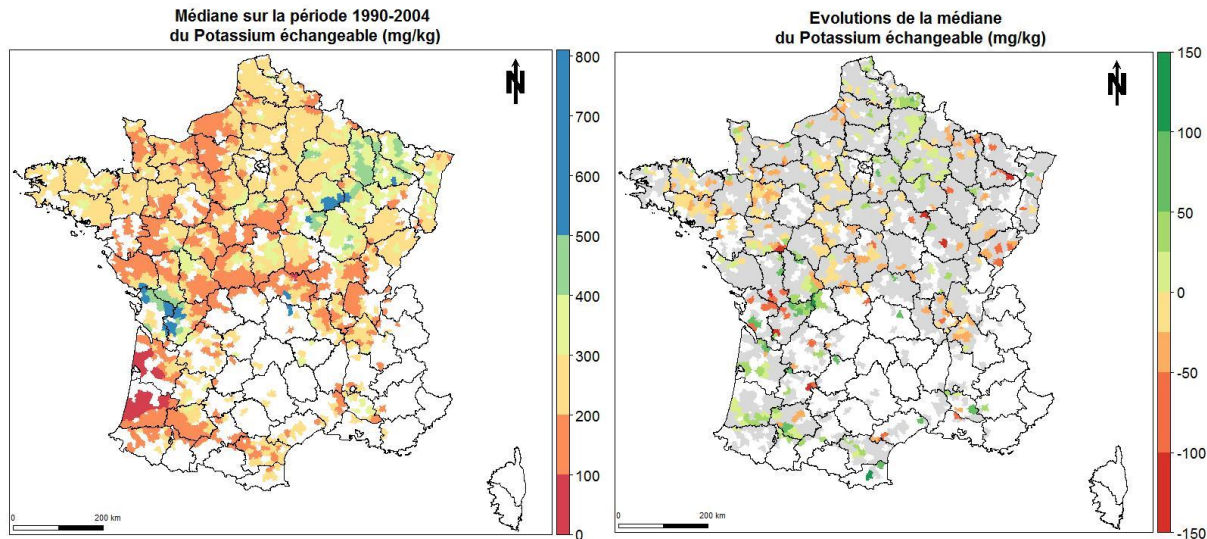


Figure 47 : médiane du potassium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite).

Magnésium

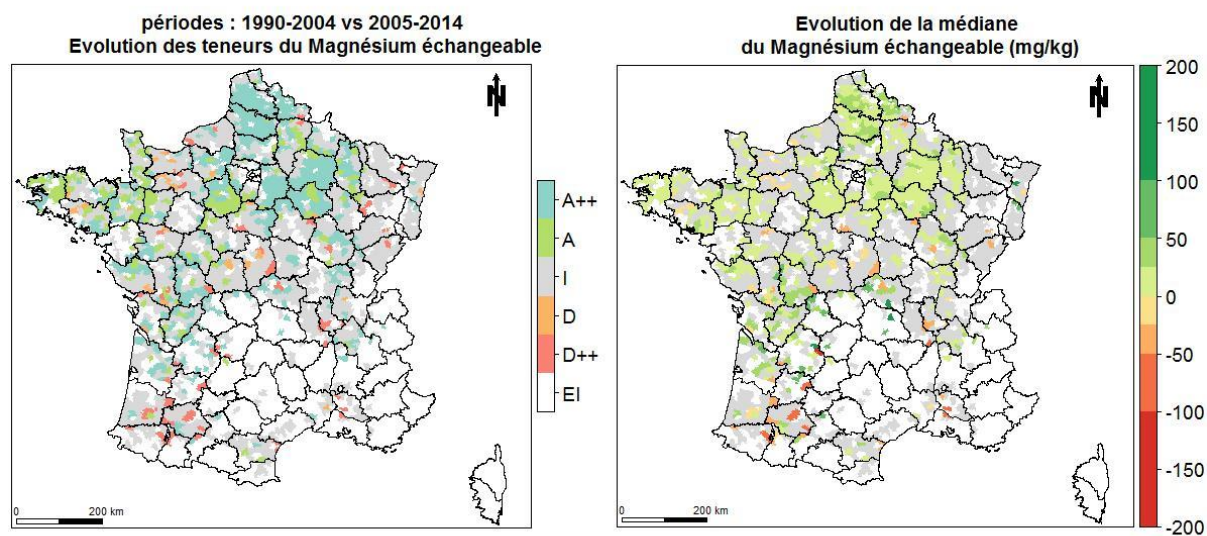


Figure 48 : Résultat du test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs (à droite).

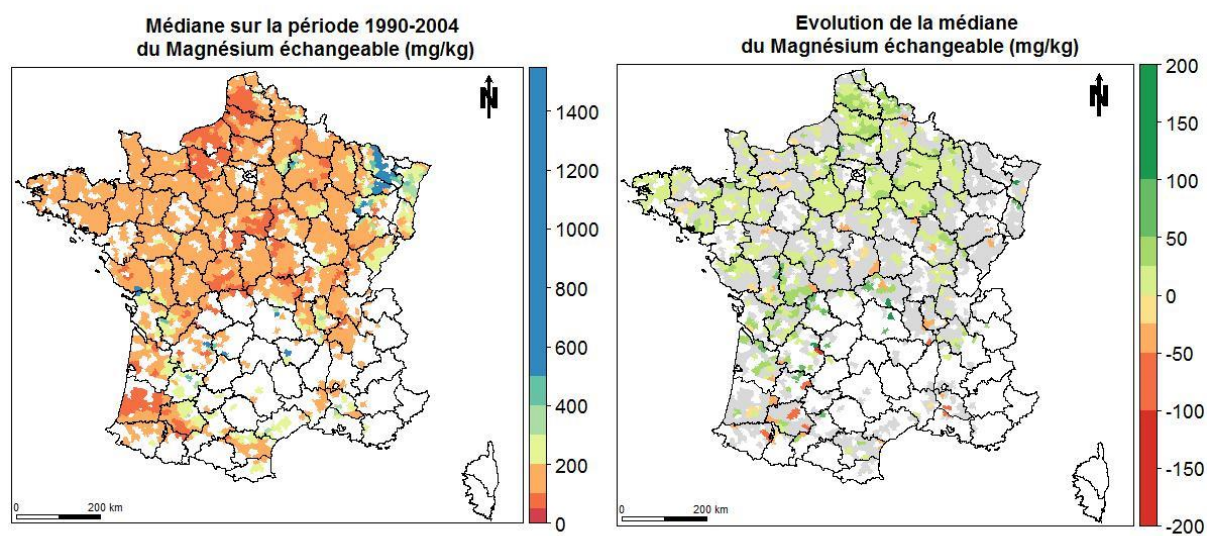


Figure 49 : médiane du magnésium échangeable sur la période 1990-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite).

Phosphore équivalent Olsen

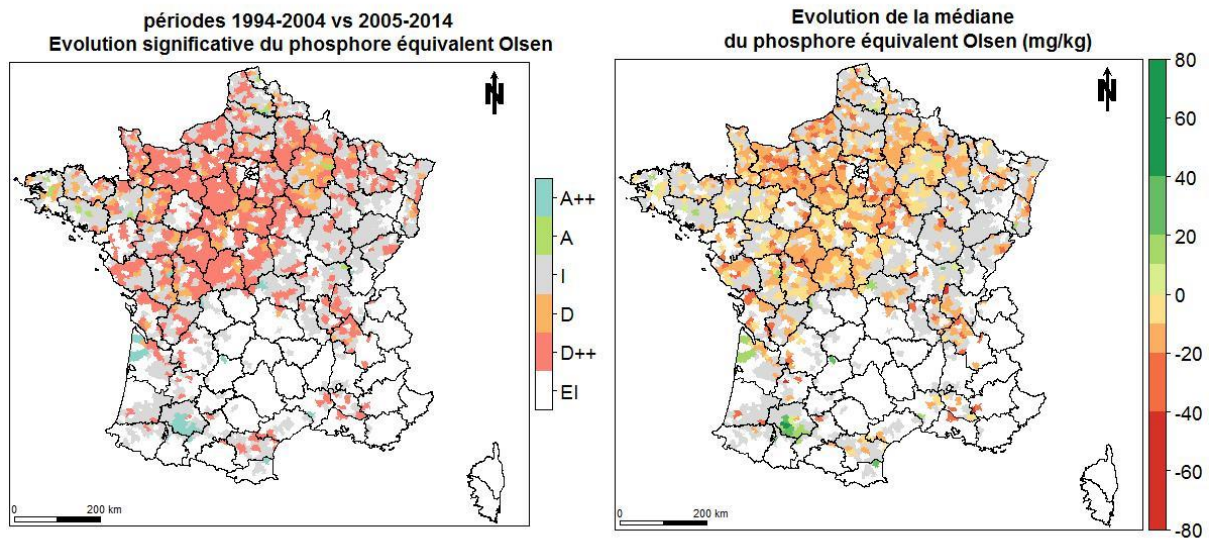


Figure 50 : Résultat du test statistique (à gauche) et évolution de la médiane des teneurs (à droite).

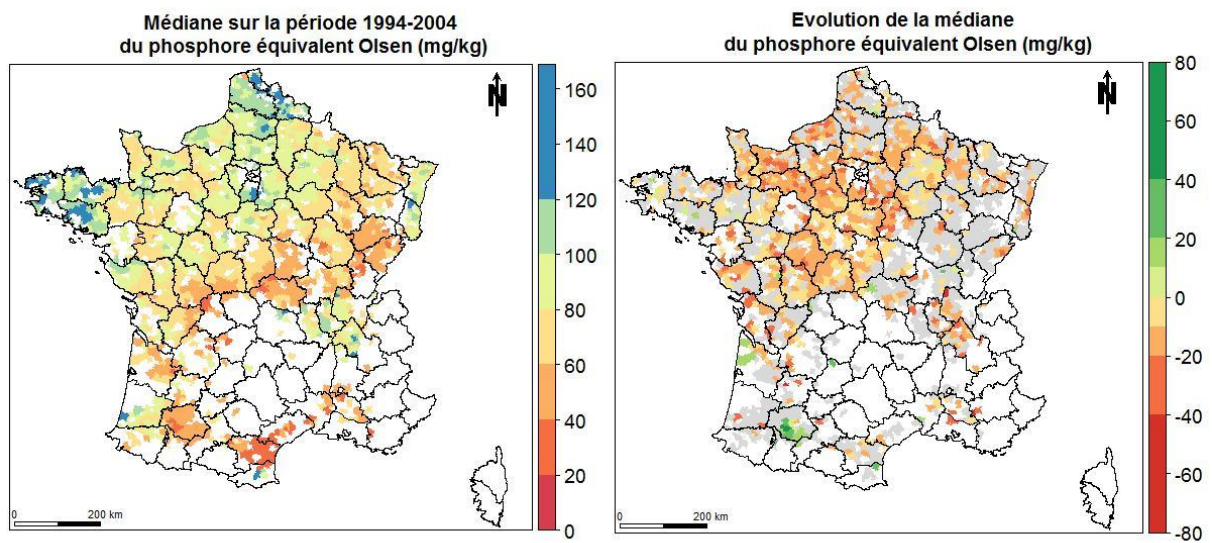


Figure 51 : médiane du phosphore équivalent Olsen sur la période 1994-2004 (à gauche) et évolution de la médiane entre les 2 périodes (à droite).

D. Carbone

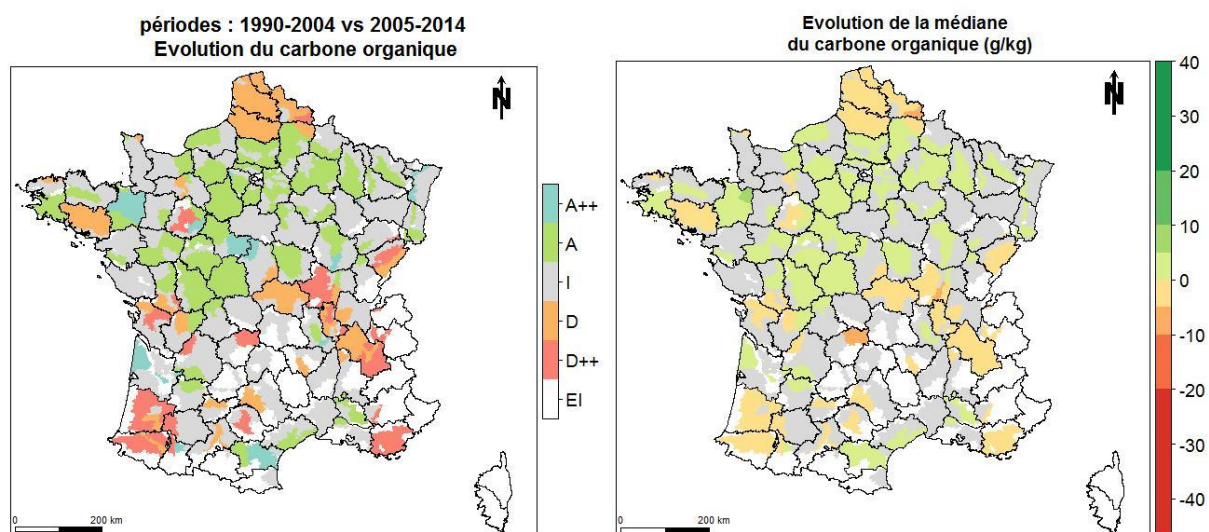


Figure 52 : évolution des teneurs en carbone organique

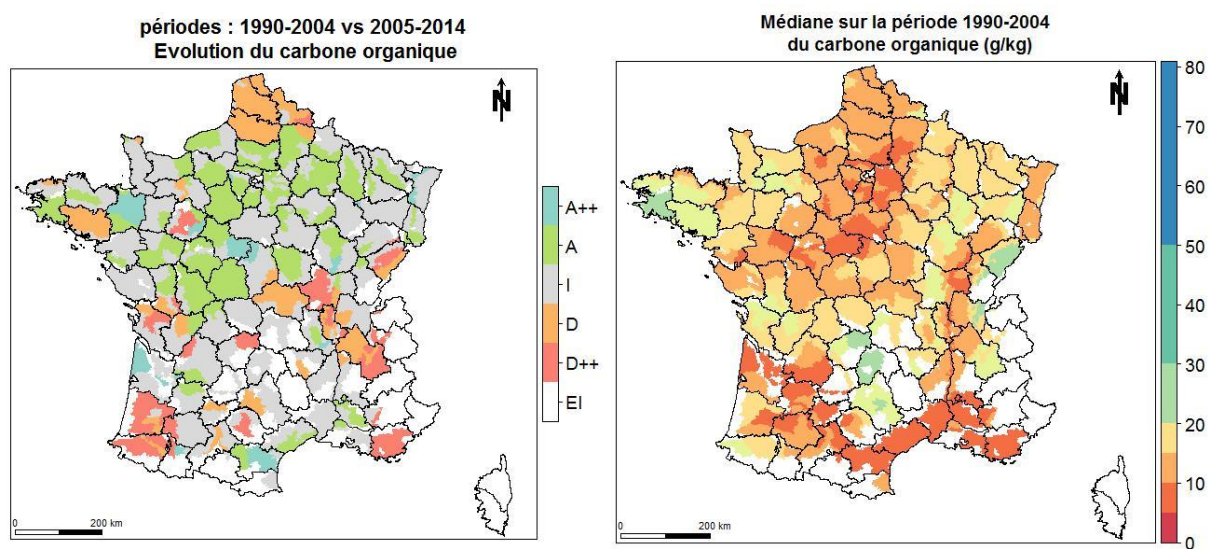


Figure 53 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane du carbone organique à la première période (à droite)

E. K/CEC

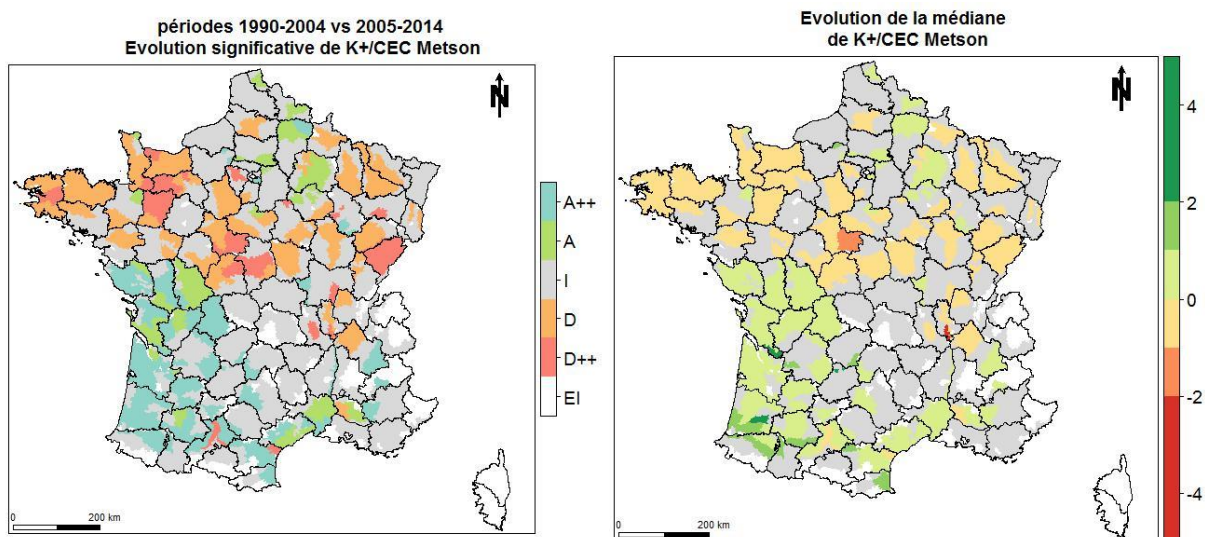


Figure 54 : évolution du rapport K+/CEC (unité : mole de charge/mole de charge)

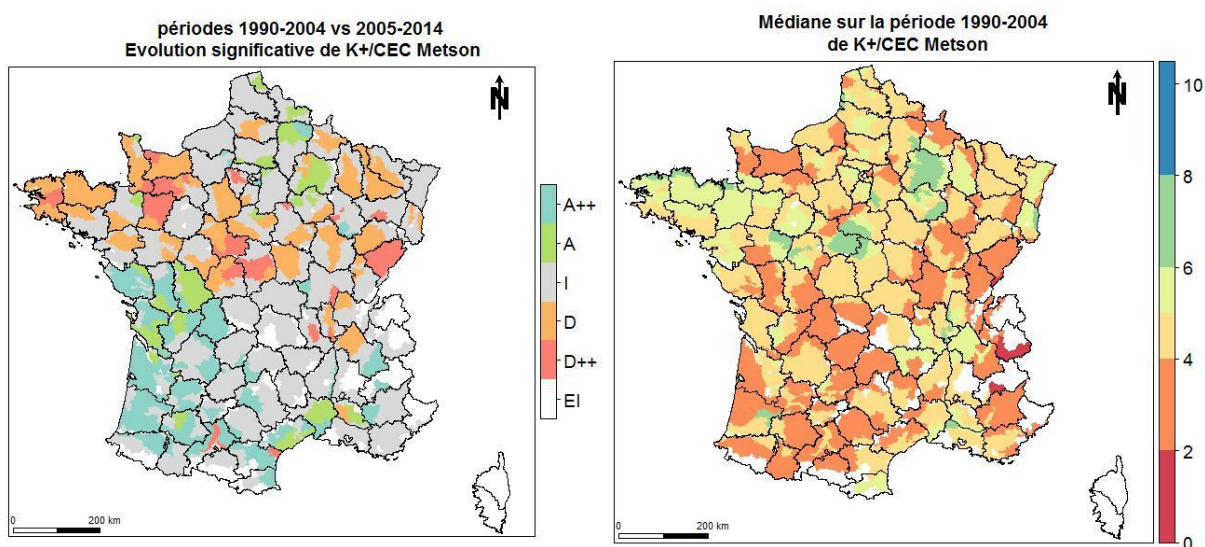


Figure 55 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane du rapport K+/CEC à la première période (à droite)

F. Mg/CEC

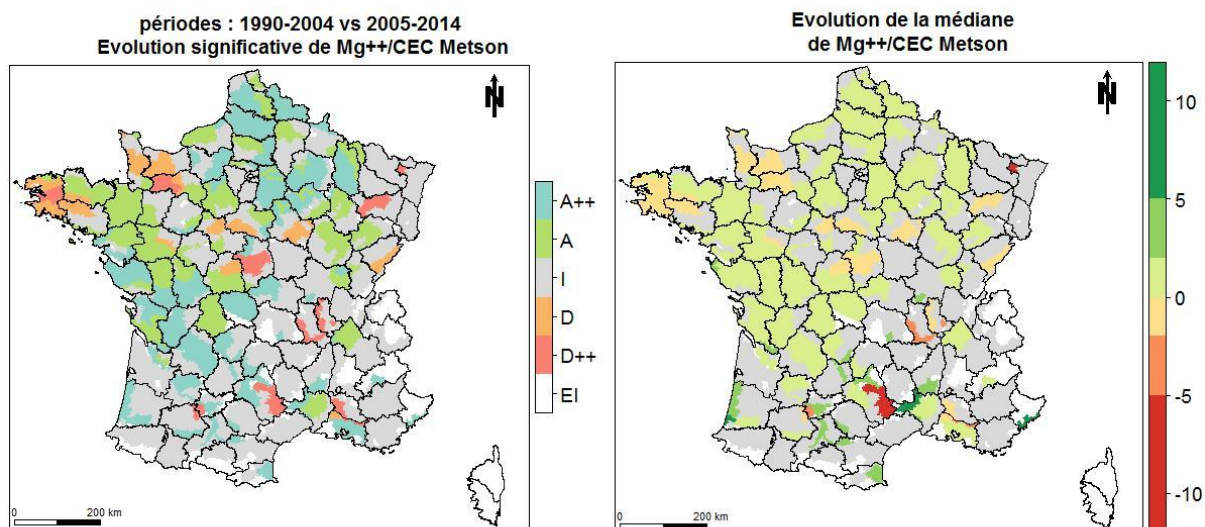


Figure 56 : évolution du rapport Mg⁺⁺/CEC (unité : mole de charge/ mole de charge)

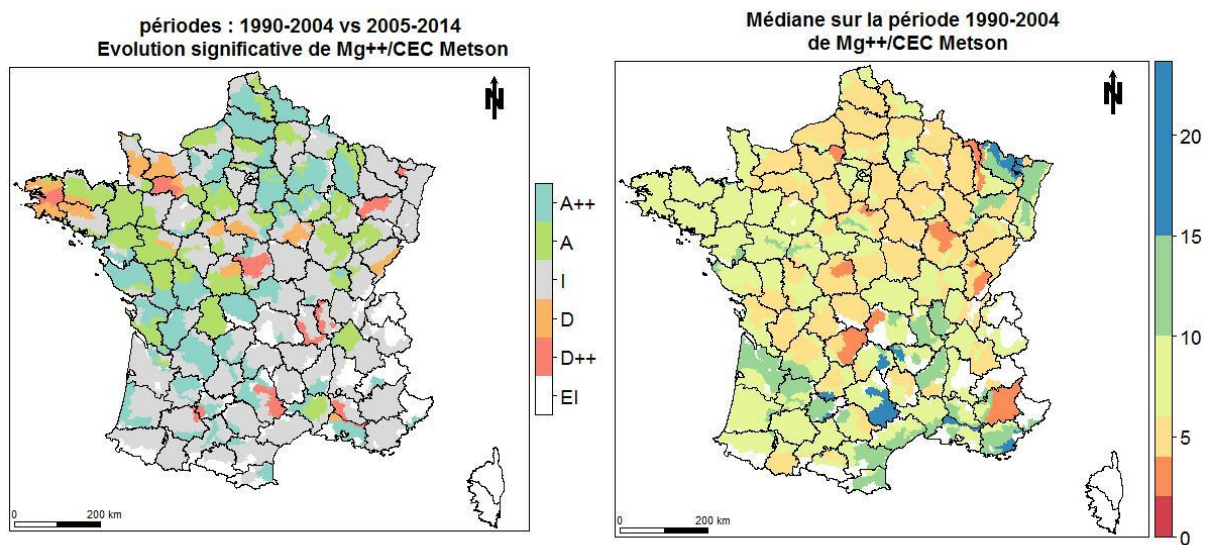


Figure 57 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane du rapport Mg⁺⁺/CEC à la première période (à droite)

G. CEC

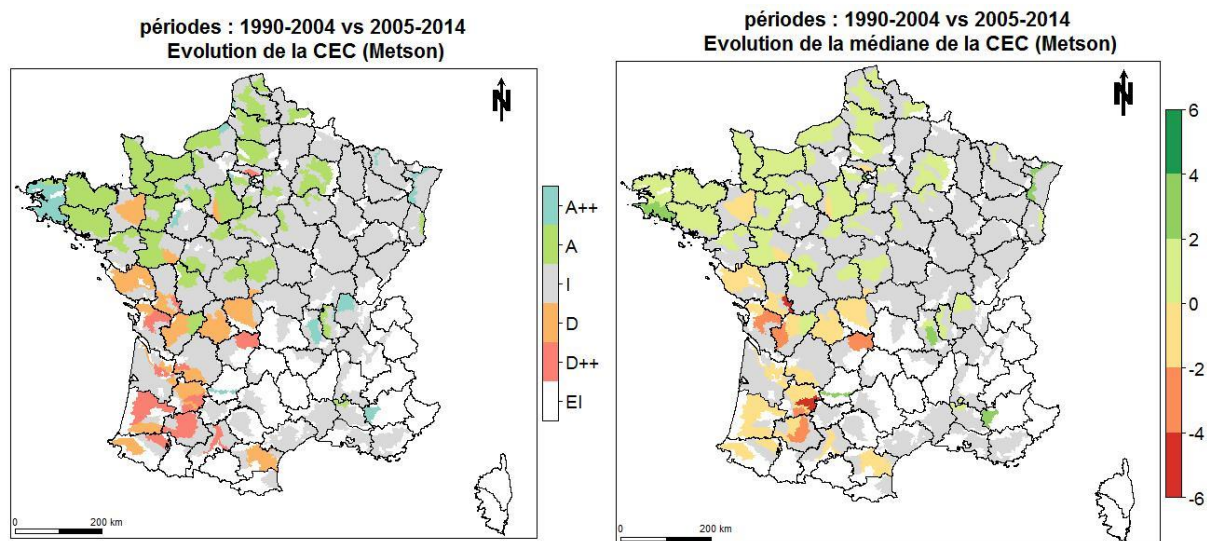


Figure 58 : évolution de la CEC entre les 2 périodes

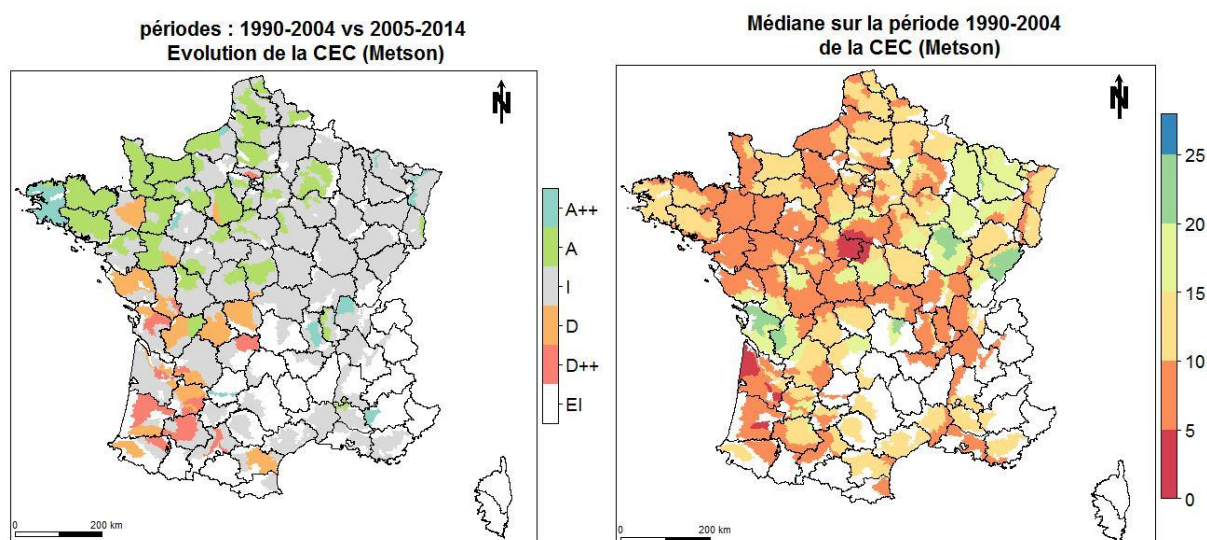


Figure 59 : résultat du test d'évolution (à gauche) et médiane de la CEC à la première période (à droite)

H. Synthèse de l'évolution de la fertilité (avec le nombre d'hectares par type d'évolution)

Tableau 9 : tableau de synthèse de l'évolution de la fertilité (avec le nombre d'hectares de SAU par type d'évolution)

évolution de la fertilité	Augmentation		Indéterminée		Diminution		Pas assez de données	
	SAU (ha)	% SAU	SAU (ha)	% SAU	SAU (ha)	% SAU	SAU (ha)	% SAU
K2O	668105	2,49	21782960	81,16	1609449	6,00	2778609	10,35
MgO	1852843	6,90	21969402	81,86	238269	0,89	2778609	10,35
P2O5 équiv. Olsen	549990	2,05	18350492	68,37	4769255	17,77	3169386	11,81