
SURVEILLANCE DE LA FERTILITE CHIMIQUE DES SOLS AGRICOLES AVEC LA BDAT

Swiderski, C.¹, Saby NPA¹, Lemerrier B.², Eveillard P.³, Louis B.², Arrouays D.¹, Walter C.², Bardy M.¹.

1 : INRA Unité Infosol, US1106, Orléans, France

2 : UMR INRA / AGROCAMPUS OUEST 1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Rennes, France

3 : UNIFA, Le diamant A 92909 PARIS La Défense

INTRODUCTION

Les sols constituent une ressource naturelle non renouvelable. Leurs usages et leur devenir représentent un enjeu collectif majeur, tant pour les activités agricoles ou sylvicoles que pour la préservation de la qualité de notre environnement. Parmi les nombreuses fonctions des sols, on compte le support de la production végétale. Pour remplir cette fonction, les sols doivent être en mesure de fournir les minéraux nécessaires au développement des plantes et d'établir des conditions favorables à la croissance racinaire. L'état des réserves minérales dans les sols et de certains paramètres de fertilité (CEC, pH, MO...) sont de bons indicateurs de leur aptitude à remplir cette fonction. Ils traduisent la capacité des sols à soutenir une forte productivité végétale et à bien valoriser les apports de fertilisants minéraux et organiques.

Le programme « Base de Données des Analyses de Terre » (BDAT) est un programme du Groupement d'Intérêt Scientifique sol qui vise à capitaliser les résultats d'analyses de terre réalisées par les laboratoires agréés par le Ministère de l'Agriculture. Réalisées majoritairement à la demande des agriculteurs, ces analyses leur permettent de suivre notamment l'état des réserves minérales des parcelles agricoles. Ce programme s'inscrit dans la valorisation collective de ces analyses sur les horizons de surface des sols cultivés. Les applications sont diverses et peuvent se classer en trois catégories : cartographie, surveillance et relations entre paramètres. En terme de cartographie, de nombreuses synthèses statistiques spatiales à petite échelle ont été réalisées et ont déjà mis en évidence de grandes structures pour beaucoup de paramètres (Lemerrier et al., 2008b; Lemerrier et al., 2009; Saby et al., 2004; Schwartz et al., 1997; Walter et al., 1997). Ces cartographies ont aussi l'avantage de caractériser la variabilité locale. En terme de surveillance, la mise en évidence de variations temporelles des propriétés des sols est aussi envisageable, en faisant l'hypothèse d'une distribution aléatoire des échantillons au sein des entités géographiques et d'une indépendance de l'échantillonnage entre les deux périodes (Lemerrier et al., 2008a; Lemerrier et al., 2008b; Lemerrier et al., 2009; Lemerrier et al., 2006; Saby et al., 2008). Cependant, à l'échelle nationale, les évolutions temporelles des propriétés des sols sont bruitées par la variabilité locale et la diversité des systèmes de

production. De ce fait, le niveau régional semble plus adapté à la détection de telles évolutions et à l'estimation de leur significativité par des moyens statistiques. Enfin, il est possible d'appréhender à l'échelle du territoire nationale des relations statistiques entre les propriétés du sol. Arrouays et al. (2006) ont ainsi décrit les liens entre teneur en matière organique et texture des sols.

L'enjeu du statut acido-basique des sols est important, les sols ayant tendance à s'acidifier dans de nombreux contextes pédo-climatiques. L'acidification des sols est un phénomène naturel, amplifié par l'activité humaine. Elle résulte de la lixiviation des bases sous l'effet de l'infiltration de l'eau dans le sol et des pratiques agricoles : lixiviation de nitrate, exportation de cations par les cultures, transformation des engrais produisant des protons. Dans le contexte où les sols et la roche-mère sont naturellement acides, l'homme réalise des amendements pour limiter, voire corriger l'acidification. Un pH trop bas peut en effet bloquer la disponibilité de certains éléments minéraux ou générer des toxicités. Concernant la gestion des parcelles agricoles, les agriculteurs et les conseillers recherchent le meilleur compromis entre les moyens à mettre en œuvre pour entretenir ou redresser le pH du sol, et l'acceptation des risques encourus du fait d'un pH faible, variable selon les types de cultures.

Le redressement du pH d'une parcelle se raisonne en besoin en bases, exprimé en valeur neutralisante (VN). Les amendements basiques sont caractérisés par leur VN, c'est-à-dire leur capacité à neutraliser l'acidité du sol. Par exemple, 1 kg de CaO (oxyde de calcium,) équivaut à 1 unité VN et 1 kg de MgO (oxyde de magnésium,) à 1,4 unité VN. La quantité d'unités de VN à apporter peut être calculée à partir de la valeur du pH ou du taux de saturation de la CEC. Selon l'état hydrique et l'activité biologique du sol, le pH varie de façon importante : jusqu'à plus ou moins 0,5 voire 1 unité au cours de l'année. Par conséquent, l'évaluation de la dose d'amendement à apporter est basée sur le taux de saturation de la CEC estimé et ciblé.

Nous proposons ici d'étudier la fertilité chimique des sols agricoles et notamment leur état acido-basique en valorisant les données de la BDAT. Le statut acido-basique des sols agricoles non calcaires qui pourraient présenter un déficit de pH a été étudié. Pour cela, la relation entre le pH et le taux de saturation de ces sols a été caractérisée, puis la distribution spatiale des indicateurs de fertilité du sol a été cartographiée. Des évolutions temporelles ont également été recherchées. Enfin, les besoins en VN ont été quantifiés à travers des simulations et ce pour deux objectifs de pH : 6,3 et 6,8.

MATERIEL ET METHODE

LES ANALYSES DE TERRE

L'utilisation par les laboratoires fournisseurs de données de méthodes d'analyses normalisées a facilité le regroupement des analyses au sein d'une base de données unique. Avant leur intégration dans la base, les analyses subissent une procédure de validation en trois étapes : (i) validation informatique et harmonisation des unités, (ii) validation analytique (méthodes, horizon de surface de sols cultivés...) et (iii) validation géographique (localisation).

Cette étude a été menée sur les résultats d'analyse des paramètres de fertilité issus de la base pour la période 1996-2010 :

- Le **pH** dans l'eau mesuré à l'aide d'une électrode en verre dans une suspension de sol dilué à 1:5 (norme NF ISO 14235, AFNOR, 1999) ;
- La **CEC** est mesurée principalement par la méthode Metson décrite dans la norme AFNOR NF X31-130. Cette mesure peut aussi être renseignée dans la base selon la méthode Riehm. Elle est estimée en $\text{cmol}^+.\text{kg}^{-1}$;
- Enfin, les **cations échangeables** (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) sont mesurés selon la norme NF X 31 – 108, et exprimés en $\text{cmol}^+.\text{kg}^{-1}$.

En plus de ces paramètres bruts, le **taux de saturation** (S/T) du sol a été calculé en négligeant la contribution du cation Na^+ .

Les sols calcaires ont été exclus du jeu de données, leur pH ne faisant *a priori* pas l'objet d'un pilotage. D'après le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 2009), les sols calcaires présentent des pH supérieurs à 7,3 et des taux de calcaire total supérieurs à 5 %. Ainsi, les analyses de la BDAT supérieures à ces deux seuils ont été écartées des deux premières phases de ce travail.

RELATION PH ET TAUX DE SATURATION

La relation S/T et pH est à la base des préconisations pour le pilotage du statut acido-basique des sols agricoles (COMIFER, 2009). Une modélisation statistique de cette relation a été entreprise. Elle repose sur le recours à un ajustement robuste des paramètres d'un modèle linéaire classique. Nous avons retenu pour cela l'estimateur dit « M » (Hubert, 1964), qui permet de minimiser l'influence des valeurs aberrantes. Nous avons également décliné cette modélisation en distinguant successivement les différents cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+) dans le calcul du taux de saturation.

CARTOGRAPHIE

Les analyses de la BDAT sont localisées sur le territoire national par la commune de la parcelle où l'échantillon a été prélevé ou par la commune où se situe le siège de l'exploitation agricole. Seulement 7,5 % dispose des coordonnées permettant de les localiser plus précisément. Ce type de géoréférencement contraint fortement la production de cartes d'évolution des paramètres pédologiques. Une solution simple consiste à regrouper ces analyses par entités spatiales et par période temporelle. Le recours à la commune dans ce type d'exercice n'est pas recommandé. Les cartes produites sont en effet plus difficiles à lire car fortement marquées par les zones sans information et le nombre de déterminations disponibles par commune et par période est souvent faible. De plus, pour garantir l'anonymat des détenteurs des parcelles analysées, l'INRA s'engage auprès des laboratoires à ne pas diffuser les résultats à l'échelle communale. Nous avons retenu dans cette étude un découpage du territoire national correspondant aux **petites régions agricoles (PRA)**. Elles ont été définies en 1946 pour mettre en évidence des zones agricoles homogènes. La PRA couvre un nombre entier de communes. Les distributions statistiques des indicateurs de fertilité des sols sont caractérisées dans ces unités à l'aide de descripteurs statistiques non paramétriques. Ces estimateurs sont robustes et peu sensibles aux valeurs extrêmes qui peuvent être présentes dans la base de données.

DETECTION D'ÉVOLUTIONS TEMPORELLES

L'analyse de l'évolution temporelle s'appuie sur la méthodologie développée par Lemerrier et al (2006) sur le phosphore et le carbone organique (CO) en Bretagne et mise

en œuvre par Saby et al. (2008) sur le CO en Franche-Comté. Elle consiste à appliquer des techniques de ré-échantillonnage dites de *Monte-Carlo* sur les données brutes, préalablement à la mise en œuvre des analyses statistiques. En effet, l'application de tests statistiques nécessite que l'échantillonnage de chaque PRA soit comparable dans le temps et l'espace. Pour plus de détails, le lecteur peut se reporter à l'ouvrage des auteurs de Gruijter et al.(2006) qui offre une très bonne synthèse sur les approches statistiques disponibles pour la détection d'évolutions spatio-temporelles. Une des contraintes majeures à l'utilisation des données brutes réside dans l'existence d'un biais potentiel difficile à estimer, notamment lié à une importante variabilité spatiale et temporelle des informations.

L'objectif est de simuler un échantillonnage dans lequel le nombre d'analyses est constant pour chaque PRA entre les deux périodes. On procède au tirage aléatoire de 80% des données disponibles au sein de la période la moins bien pourvue. On répète pour cela 1 000 tirages avec remise. Les évolutions sont testées statistiquement à l'échelle d'une PRA par le test de Wilcoxon. Le niveau de significativité du test est fixé à 5%. En fin de simulation, on compte pour chaque PRA, le nombre de fois où le test s'est révélé significatif. On décide au final de la significativité d'une évolution au sein de la PRA si au moins 75 % des tests se sont révélés positifs. Enfin, dans tous les cas, la PRA doit posséder au moins cinq communes présentant au moins 10 analyses à chaque période.

QUANTIFICATION DES BESOINS EN VALEUR NEUTRALISANTE

Le besoin en valeur neutralisante a été quantifié à l'aide de l'équation suivante :

$$VN = \Delta S/T \times CEC \times 0,28 \times DA \times Prof \quad (1)$$

Où $\Delta S/T$ représente la différence entre le S/T cible et le S/T estimé, DA correspond à la densité apparente de terre fine qui est fixée à 1,25, Prof est la profondeur variant selon le type d'occupation du sol (30 cm pour les vignes et les vergers ; 24 cm pour les grandes cultures et les légumes ainsi que dans le cas où aucune information sur l'occupation du sol est disponible). Cette formule ne tient pas compte de la teneur en éléments grossiers.

Les simulations pour deux objectifs de pH (6,3 et 6,8) consistent à traduire chaque détermination de pH de la BDAT des sols dits non calcaires en équivalent taux de saturation à partir de la relation entre le pH et le taux de saturation établie dans la première partie de ce travail. Il est alors possible de déduire le $\Delta S/T$ permettant de calculer la VN nécessaire. En faisant l'hypothèse que la distribution des pH issue de la BDAT est représentative de celle des sols agricoles d'une PRA, on en déduit le pourcentage de sols à redresser, la quantité moyenne de VN à apporter par PRA et le total pour le territoire.

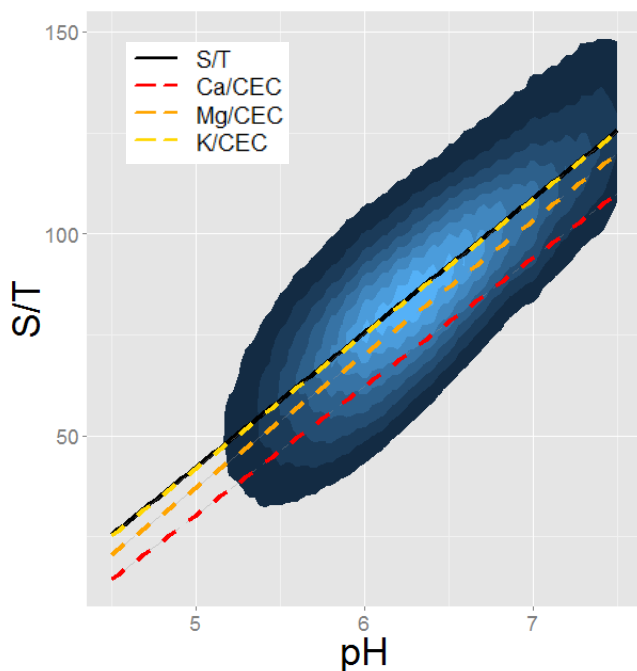
RESULTATS ET DISCUSSION

RELATION PH ET TAUX DE SATURATION

La figure 1 et le tableau 1 présentent les résultats de la modélisation de la relation entre le pH et le S/T. 695 976 résultats d'analyses ont été mobilisés et sont représentés sur le graphique. La forte densité d'information nécessite une représentation adaptée. Nous avons eu recours à une estimation de densité locale à l'aide d'un noyau 2D. La dispersion du nuage montre que la variabilité du pH pour une même valeur de S/T est importante : elle est supérieure à 1 unité de pH. On observe que la pente de la droite du modèle est influencée

essentiellement par le calcium. Les autres cations ne contribuent qu'à rehausser l'ordonnée à l'origine de la courbe (et donc à l'augmentation du taux de saturation par une constante). Le calcium donne donc la forme globale de la relation S/T – pH et l'ajout des autres cations fait augmenter le taux de saturation pour un pH donné. Le magnésium apporte néanmoins une contribution importante à la valeur du taux de saturation pour certains sols. Ceci traduit l'usage d'amendements dolomitiques (notamment en Bretagne).

Tableau 1 : Coefficients et ordonnées à l'origine des différents modèles linéaires entre le pH et contribution des cations au calcul du taux de saturation. Les modèles sont ajustés sur les données de la BDAT.



	Pente de la droite	Ordonnée à l'origine
Ca		-129
Ca+Mg	33	-128
Ca+Mg+K	33	-125
S/T	33	-124

Figure 1 – Contribution des trois cations dans le calcul du S/T projetée sur les données de la BDAT (696976 résultats). Le dégradé de bleu représente la densité d'information avec en clair la zone où se concentre le plus de résultats d'analyse de terre.

EVOLUTION DU STATUT ACIDO-BASIQUE

La figure2 présente en trois vignettes les résultats de la procédure de détection des évolutions du pH entre les périodes 1996-1999 et 2005-2010. Le tableau 2 synthétise ces résultats en incluant les évolutions du pH en termes de surfaces totales, agricoles et arables(en ha).

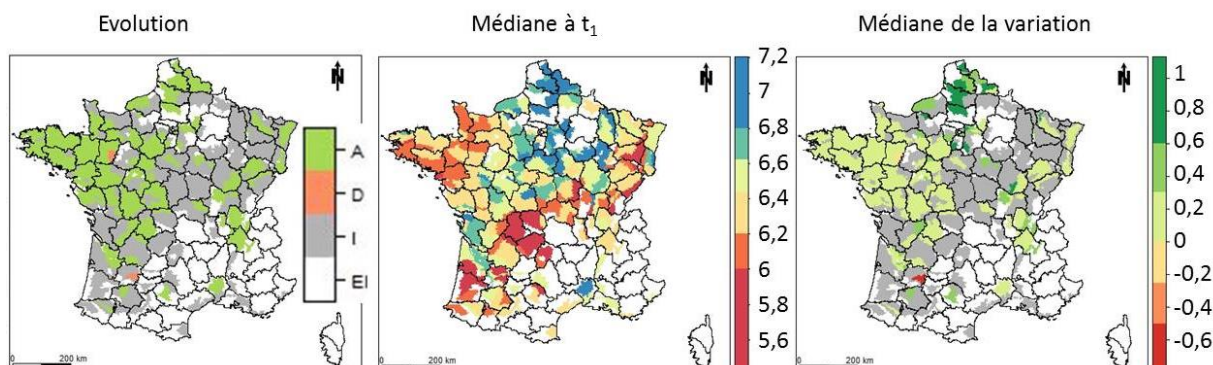


Figure 3 : Détection des évolutions pour le pH eau entre 1996-1999 et 2005-2010. « Evolution » correspond à la carte des résultats du test statistique (A : augmentation ; D : diminution ; I : indéterminé ; EI : éléments insuffisants), « Médiane à t_1 » correspond à la médiane pour la période 96-99 et « médiane de la variation » correspond à la carte des médianes des évolutions constatées lors de la procédure de rééchantillonnage.

Tableau 2 – Synthèse des résultats de la procédure de détection d'évolution temporelle menée sur les pH entre 1996-1999 et 2005-2010 et sur les données de la BDAT. Les résultats sont rapportés aux surfaces.

	Nombre de PRA	% effectif	% surface	% SAU	% Terres arables
Augmentation	185	19.4	28.6	36.2	39.8
Diminution	2	0.2	0.3	0.5	0.4
Indéterminé	258	27.1	35.7	37.8	38.2
Absence de données	508	53.3	35.4	25.6	21.6

Les régions montagneuses et le bassin méditerranéen sont peu fournis en données ou présentent des sols calcaires exclus de l'étude. Présentées dans la première vignette, les évolutions significatives de pH représentent à peine 20% de la surface du territoire et s'observent principalement en Bretagne, sur une zone Nord-Ouest Sud-Est allant de la Loire Atlantique à la Vienne, en Alsace et au sud de la Moselle, dans les plaines au pied du massif Jurassien, dans la vallée de la Dordogne et de façon plus sporadique dans quelques PRA du Sud-Ouest et très majoritairement dans le sens d'une augmentation des teneurs. Seulement deux PRA enregistrent une acidification significative des sols (en Mayenne et dans le Lot et Garonne). La deuxième vignette présente la médiane des pH par PRA au cours de la dernière période. Les médianes vont de 4,9 à 7 (les analyses au pH supérieur à 7,5 ont été isolées pour ce test), les sols les plus neutres se retrouvent dans le bassin parisien alors que les plus acides se localisent dans les Landes et le Limousin. La dernière vignette présente enfin la valeur moyenne de l'évolution entre les deux périodes. Ces dernières évoluent aux extrêmes de - 0,7 points de pH à +1,1 point. En comparant les deux dernières cartes, on voit que les augmentations de pH se retrouvent globalement sur toutes les gammes de pH alors que les PRA enregistrant une diminution significative sont des régions à pH plutôt élevés.

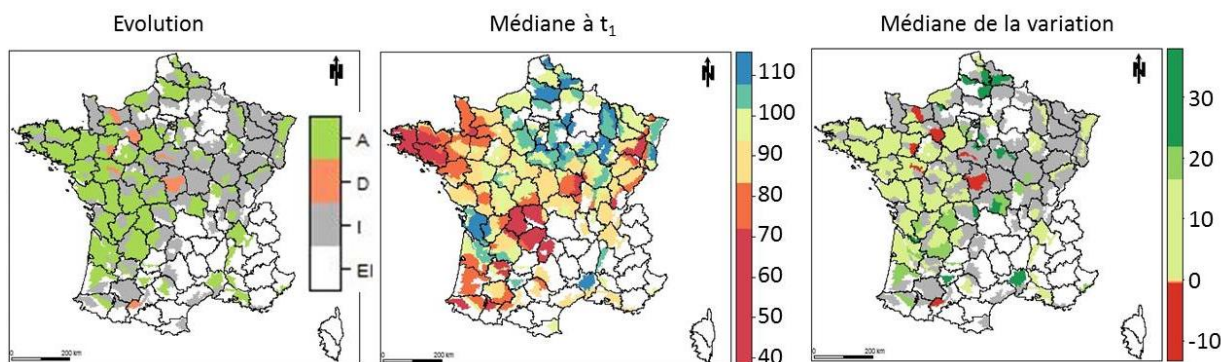


Figure 4 : Résultat de la procédure de détection des évolutions pour le S/T eau entre 1996-1999 et 2005-2010. « Evolution » correspond à la carte des résultats du test statistique (A : augmentation ; D : diminution ; I : indéterminé ; EI : éléments insuffisants), « Médiane à t_1 » correspond à la médiane pour la période 96-99 et « médiane de la variation » correspond à la carte des médianes des évolutions constatées lors de la procédure de rééchantillonnage.

Les conclusions à propos des taux de saturation sont semblables aux conclusions tirées plus haut pour les pH. On notera toutefois que deux nouvelles PRA montrent une diminution significative : il s'agit d'une PRA dans le Calvados et dans la Haute-Saône. Les taux de saturation s'étalent sur une gamme de valeurs allant de 34 à 118. Les PRA au pH neutre ont des S/T plus élevés. Les variations de S/T entre 1996-1999 et 2005-2010 vont de -13,3 points à + 37,9 et des augmentations moyennes notoires sont observées en Haute-Vienne, dans l'Allier, le Nord et en Vendée.

Il est difficile de savoir à quoi attribuer cette augmentation parmi différentes causes possibles : meilleur pilotage des intrants azotés, diminution des dépôts atmosphériques acidifiants soufrés, meilleure gestion des amendements basiques... En Angleterre et au Pays de Galles, Kirk et al. (2010) ont également observé une augmentation des pH des 1978 à 2003. Ils attribuent une partie de cette augmentation à une diminution des retombées atmosphériques (N et S).

LES BESOINS EN VN

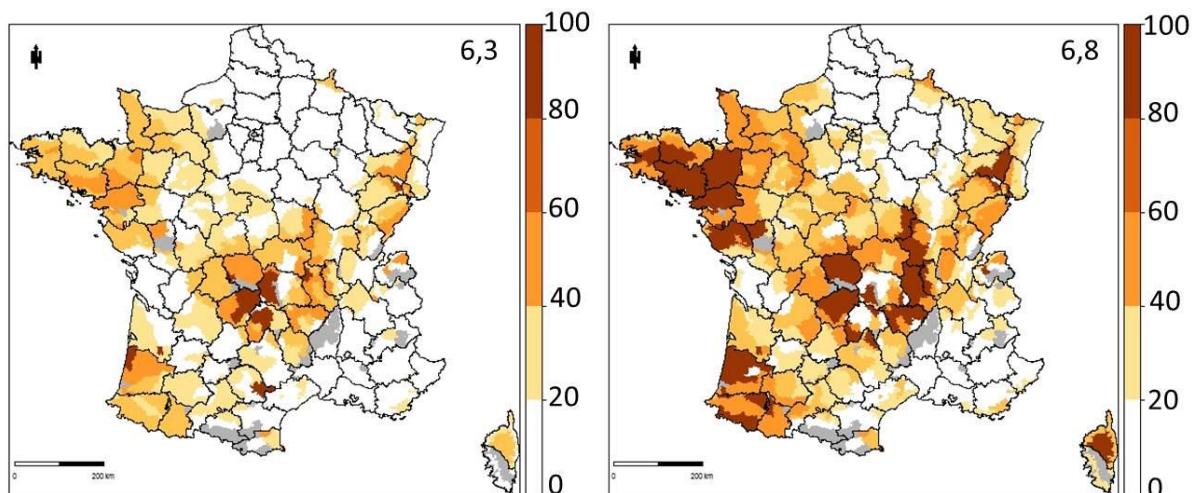


Figure 5 : Pourcentage des analyses nécessitant un redressement de pH par PRA pour les deux objectifs fixés à 6,3 ou 6,8. Ces calculs tiennent compte de toutes les analyses réalisées dans la PRA entre 2005 et 2010.

La figure 5 spatialise l'estimation des besoin en VN tirée du pourcentage du nombre d'analyses de la BDAT présentant un S/T inférieur au S/T objectif parmi l'ensemble des résultats disponibles par PRA sur la période 2005-2010. On constate que les principaux sols à redresser se situent en Bretagne, en Pays-de-la-Loire, dans les Landes, le massif central et dans le sud du massif des Vosges. Il est possible d'estimer un besoin global en VN pour le territoire national en multipliant le besoin moyen par PRA et sa surface en terre arable. Pour tenir compte de la charge en cailloux, nous avons corrigé la somme totale par le pourcentage de cailloux moyen des sols non calcaires (d'après le RMQS : 12,5%). Nos calculs estiment à 4 millions et 10 millions de tonnes de VN pour les objectifs 6,3 et 6,8 respectivement. De nombreuses incertitudes, qu'il reste à quantifier, accompagnent ces chiffres (recours au pH sans prendre en compte la variabilité inter-et intra annuelle, manque de représentativité possible de la BDAT dans certaines régions comme le sud de la France). D'autre part, on ne parle ici que de redressement sans s'interroger sur les besoins pour satisfaire l'entretien du statut acido-basique à sa valeur optimale. Ces estimations sont à

mettre en regard des 1,6 millions de tonnes de VN livrées annuellement dans les amendements minéraux basiques (ANPEA, 2012).

CONSTITUTION DE LA BASE BDAT

La BDAT a été construite selon une méthodologie qui s'apparente plus à une démarche d'enquête que d'une prospection pédologique organisée (Saby et al., 2004). Il faut garder à l'esprit certaines précautions lors de l'interprétation des résultats. En effet, l'échantillonnage est non maîtrisé et il dépend essentiellement des motivations des agriculteurs pour choisir les parcelles à échantillonner, les paramètres à analyser et la fréquence du recours à l'analyse. Des aspects techniques (les analyses constituent-elles un moyen de raisonner *a priori* la fertilisation des terres ou de faire le diagnostic d'un problème ?) mais aussi stratégiques (impact de la politique commerciale des laboratoires ou de l'influence de conseillers agricoles de secteur) entrent en ligne de compte dans ces choix. De plus, le fait que seule la commune d'origine des échantillons de terre analysés est connue et l'agrégation au niveau d'une PRA des résultats ne permettent pas de garantir une distribution spatiale homogène des analyses. La stratégie d'échantillonnage et la localisation peu précise des échantillons introduisent des biais statistiques qu'il est difficile d'estimer. Cependant, la procédure de ré-échantillonnage mise en œuvre et le très grand nombre d'analyses disponibles permettent de limiter ces biais, sans toutefois s'en affranchir complètement.

Sur une grande partie du territoire, nous ne parvenons pas à démontrer statistiquement des évolutions. Ceci ne signifie pas qu'elles n'existent pas. En effet, les zones où nous montrons des évolutions sont également celles qui sont le plus fournies en analyses. Le nombre de déterminations est un facteur important lors de l'établissement des statistiques et il est probable que dans beaucoup de cas il soit encore insuffisant pour détecter une tendance. Ceci plaide en faveur d'une poursuite de la capitalisation des données.

Le géoréférencement précis des prélèvements de terre constitue une perspective intéressante de traitement des données de la BDAT. Les laboratoires fournissent de plus en plus fréquemment des données localisées précisément, ce qui permettra de vérifier les hypothèses de base de l'analyse temporelle que sont l'indépendance des jeux de données comparés et la répartition spatiale aléatoire des échantillons. Dans le cas contraire, il serait possible de tenir compte alors de la corrélation spatiale et temporelle dans des modèles statistiques plus complexes (Brus and de Gruijter, 2012).

Cette étude à vocation d'inventaire ne saurait en rien remplacer l'analyse de terres des parcelles agricoles qui reste le seul outil d'aide à la décision adapté à l'échelle d'une exploitation agricole. La variabilité inter- et intra-annuelle du pH n'est notamment pas prise en compte dans cette étude et pourrait introduire des biais dans les évolutions constatées ainsi que dans les calculs des besoins en VN. Cependant, la date précise du prélèvement n'est souvent pas disponible. L'indicateur du taux de saturation S/T s'avère également indispensable à l'analyse.

CONCLUSIONS

De par la quantité très importante de données validées et datées qui la constituent, la BDAT est un outil clé du dispositif national de connaissance et de surveillance des sols, et permet d'évaluer l'impact des activités humaines sur cette ressource.

Les besoins en VN ont été établis par PRA à partir d'une règle de passage calculée entre le pH des sols agricoles et leur taux de saturation. Cependant cette règle n'est valable que dans un domaine de validité compris entre 4.5 et 7.5 de la valeur du pH. La CEC est principalement saturée par le calcium échangeable.

Les évolutions temporelles de ces deux paramètres du sol ont montré une tendance à l'augmentation du pH (et donc du taux de saturation). Pourtant, une grande partie du territoire montre un déficit en bases conduisant à un besoin en valeur neutralisante de 4 millions et 10 millions de tonnes pour des objectifs de redressement à 6,3 et 6,8 respectivement.

Préserver les sols du risque d'acidification est un objectif important dans la stratégie européenne de protection des sols. La correction de l'acidité des sols cultivés présente de nombreux avantages tant pour la production agricole que pour la protection de l'environnement.

REMERCIEMENTS

Le programme BDAT est financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol qui regroupe les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie, l'ADEME, l'IGN, l'INRA et l'IRD. Nous remercions l'ensemble des laboratoires agréés par le ministère de l'agriculture qui ont bien voulu participer à ce programme en fournissant les données.

BIBLIOGRAPHIE

- ANPEA, 2012. Statistiques de livraisons d'amendements minéraux basiques <http://www.anpea.com/livraisons-de-fertilisants/livraisons-d-amendements.html>.
- Arrouays, D., Saby, N., Walter, C., Lemercier, B., Schwartz, C., 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use Manag* 22, 48-51.
- Brus, D.J., de Gruijter, J.J., 2012. A hybrid design-based and model-based sampling approach to estimate the temporal trend of spatial means. *Geoderma* 173, 241-248.
- COMIFER, 2009. Le chaulage, des bases pour le raisonner. In: COMIFER (Ed.). www.comifer.asso.fr, pp. 110.
- de Gruijter, J.J., Brus, D.J., Bierkens, M.F.P., Knotters, M., 2006. *Sampling for Natural Resource Monitoring*. Springer. Heidelberg
- Hubert, P.J., 1964. Robust Estimation of a Location Parameter. *Annals of Mathematical Statistics* 101, 35-73.
- Kirk, G.J.D., Bellamy, P.H., Lark, R.M., 2010. Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. *Global Change Biology* 16(11), 3111-3119.
- Lemercier, B., Arrouays, D., Follain, S., Saby, N.P.A., Schwartz, C., Walter, C., 2008a. Broad-Scale Soil Monitoring Through a Nationwide Soil-Testing Database. *Digital Soil Mapping With Limited Data*, 273-+.
- Lemercier, B., Gaudin, L., Walter, C., Aurousseau, P., Arrouays, D., Schwartz, C., Saby, N.P.A., Follain, S., Abrassart, J., 2008b. Soil phosphorus monitoring at

- the regional level by means of a soil test database. *Soil Use Manag* 24(5), 131-138.
- Lemercier, B., Walter, C., Arrouays, D., Aurousseau, P., Follain, S., Michaud, A., Saby, N.P.A., Sarr, J.B., Schwartz, C., Vertes, F., 2009. Phosphorus storage in soil: monitoring and analysis at national and regional scales. *Oceanis*, Vol 33, No 1 And 2 33(1-2), 103-122.
- Lemercier, B., Walter, C., Schwartz, Saby, N., Arrouays, D., Follain, 2006. Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Etude et Gestion des Sols* 13(3), 165-179.
- Saby, N., Schwartz, C., Walter, C., Arrouays, D., Lemercier, B., Roland, N., Squidant, H., 2004. Base de Données des Analyses de Terre : procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Etude et Gestion des Sols* 11(3), 235-253.
- Saby, N.P.A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemercier, B., Follain, S., Walter, C., Schwartz, C., 2008. Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004. *Soil Use Manag* 24(3), 254-262.
- Schwartz, C., Walter, C., Claudot, B., Bouedo, T., Aurousseau, P., 1997. Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 I. constitution d'une banque de données cantonale. *Etude et Gestion des Sols* 4(3), 20-30.
- Walter, C., Schwartz, C., Claudot, B., Bouedo, T., Aurousseau, P., 1997. Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Etude et Gestion des Sols* 4(3), 12-44.