

Estimations précises des besoins en chaux dans le Massif Armoricaïn

R.A. Viscarra Rossel, A. Pérez Hoyos et C. Walter

UMR INRA-ENSAR Sol, Agronomie, Spatialisation
65 rue de Saint-Brieuc, CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France

RÉSUMÉ

Cette étude évalue une approche, jusque-là peu utilisée en France, d'estimation des besoins en carbonate de calcium (BEC), fondée sur un modèle de réponse tenant compte de la mesure du pH dans la solution-tampon de Woodruff (1948) et de l'objectif de pH final visé. Douze sols cultivés ou sous prairie naturelle ont été retenus dans cette étude provenant de contextes pédoclimatiques variés du Massif armoricaïn et offrant une large gamme de variation de propriétés physico-chimiques : le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ varie de 4,3 à 6,7 et la teneur en carbone organique est comprise entre 1,0 et 4,4 %. Une technique d'incubation au laboratoire est utilisée pour calibrer le modèle et constitue la méthode de référence d'évaluation du BEC. Les courbes expérimentales croissantes reliant le $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ en fin d'incubation aux quantités de CaCO_3 initialement apportées, sont utilisées pour dériver différents niveaux de BEC selon les objectifs de pH retenus. La mesure du pH dans la solution-tampon de Woodruff ($\text{pH}_{\text{tampon}}$) est très étroitement liée au BEC déterminé par incubation, le coefficient de détermination étant de l'ordre de 0,93, ce qui justifie son emploi par la suite pour prédire de façon rapide les BEC. Un modèle régressif de surface de réponse prenant en entrée l'objectif de pH et la mesure de $\text{pH}_{\text{tampon}}$ est ajusté aux données expérimentales d'incubation, permettant d'évaluer le BEC de façon continue selon ces deux critères. Pour évaluer la robustesse de cette approche, un second ajustement a été établi en regroupant le jeu de données acquis sur les sols du Massif armoricaïn avec des données existantes pour des sols du sud-est australien. Les prédictions de ce second modèle induisent des erreurs de prédiction plus importantes que le modèle issu des seules données du Massif armoricaïn, mais sont du même ordre de grandeur. Une dernière méthode de prédiction des BEC, fondée sur une fonction de pédotransfert (FPT) tenant compte de la CEC et du taux de saturation, couramment utilisée en France, a également été mise en œuvre et comparée aux approches précédentes. Il apparaît que la méthode utilisant la mesure de $\text{pH}_{\text{tampon}}$ et le modèle de prédiction établi spécifiquement pour les sols du Massif armoricaïn, fournit les estimations les plus proches des valeurs de référence obtenues par incubation ; la méthode FPT mettant en jeu la CEC et le taux de saturation fournit des estimations également positivement corrélées aux résultats de référence, mais biaisées et avec des erreurs importantes.

La démarche est mise en œuvre sur une parcelle de 4 hectares du bassin de Rennes, régulièrement chaulée avec une dose uniforme déduite de l'analyse d'un échantillon composite prélevé sur la parcelle. Les $\text{pH}_{\text{tampon}}$ ont été mesurés aux 62 nœuds d'une grille triangulaire de 25 m de côté. Les données d'estimation en chaux résultant de la mise en œuvre du modèle de prédiction ont fait l'objet d'une analyse géostatistique qui montre que la gamme des BEC au sein de la parcelle est très large, s'étageant de 0,5 à 4,5 t/ha de CaCO_3 .

Mots clés

Sol, chaulage, acidité, prédiction, Bretagne

SUMMARY

ACCURATE PREDICTIONS OF SOIL LIME REQUIREMENT IN THE ARMORICAN MASSIF

A single-factor response surface calibration model (Equation 1) for the Woodruff lime requirement buffer, was used to predict the lime requirements of acid soils in the Armorican Massif (France) (Figure 1). Twelve soils with widely varying properties (Table 1) were used in the study and their lime requirements determined by a soil: CaCO_3 incubation experiment. These data were used to calibrate the model (Figure 2) and were also the reference method to which model-based predictions of lime requirement were validated against. The use of soil properties as predictors of lime requirement was investigated (Figure 3, Table 2). Amongst some commonly measured soil properties, pH accounted for the largest proportion of the variation in lime requirements, suggesting that soil pH is a good indicator of whether or not a soil should be limed (Figure 3a). The relationship was not strong enough to use soil pH as a predictor of lime requirement. The Woodruff lime requirement buffer pH ($\text{pH}_{\text{buffer}}$) measurements accounted for 93 % of the variation in lime requirements, hence its use for determinations of lime requirement (Figure 3b). The response surface calibration model (Equation 5) was used for predictions of lime requirement to four different target $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ values (Figure 4). The aim of response surface models is to find the values of the terms that produce a maximum or minimum expected response. Predictions of lime requirement were validated against the reference incubation method. A second response surface model was derived from the combination of two data sets; one from the present study and one from south-eastern Australia (Equation 6). Its predictions were compared and validated against the reference incubations. Model-independent validations were achieved using the statistical technique for error and bias estimations called leave-one-out (jackknife) cross-validation. Predictions of lime requirement from a pedotransfer function (PTF) currently used to predict lime requirements in France (Equation 2) were also compared and validated. The (local) response surface model derived from the soils of the study area produced the most accurate predictions of lime requirement while the PTF was inaccurate (and highly biased) (Figures 5 and 6). Predictions of lime requirement from the combined response surface model were less accurate but as precise as predictions from the locally derived response surface model (Figures 5 and 6). Although the response surface model is empirical, the buffer methodology accounts for the chemical processes and interactions between soil properties that affect the lime requirement of soil. We suggest this data set be a starting point for a soil database of Woodruff $\text{pH}_{\text{buffer}}$ measurements and incubation lime requirements from all relevant regions in France. The methodology is simple and could be easily implemented. The aim of this database would be to eventually collate all data and produce a more robust model that may be used to derive accurate and precise predictions of lime requirement. Finally, geostatistical analysis of lime requirements to a target $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ of 6 was conducted (Table 3) and a variable-rate lime application map was derived (Figure 7) to illustrate the inefficiency of single-rate lime applications.

Key-words

Soil, liming, acidity, prediction, Brittany

RESUMEN

ESTIMACIONES PRECISAS DE LOS REQUERIMIENTOS EN CAL PARA SUELOS ÁCIDOS DEL MACIZO ARMORICAN

Los suelos de Bretaña, en el macizo Armorican (Francia), se caracterizan por ser de origen ácido, por tanto, se decidió elaborar un modelo regresivo de tipo « response surface » que, junto con la disolución tampón de Woodruff, puede ser utilizado para la determinación de los requerimientos en cal de estos suelos. Para la realización de este modelo, se tomaron doce suelos, con propiedades distintas, cuyos requerimientos en cal fueron determinados después de someterlos a un periodo de incubación con diferentes cantidades de carbonato cálcico. Después del periodo de incubación, se realizó un análisis correlativo entre los requerimientos en cal y las propiedades de los suelos, el cual indicó, correlaciones significativas entre ambos. Principalmente se comprobó que hay una buena correlación con el pH, el cual puede ser utilizado para saber si un suelo tiene que ser o no encalado, sin embargo no puede ser empleado para la predicción de los requerimientos en cal, ya que la relación no es lo suficientemente alta. Se comprobó que la medida del pH en la disolución tampón de Woodruff ($\text{pH}_{\text{buffer}}$) estaba estrechamente ligada con los requerimientos en cal determinados mediante las incubaciones, teniendo un coeficiente de determinación de 0.93, hecho que justifica su empleo para la predicción de los requerimientos en cal.

Mediante el $\text{pH}_{\text{buffer}}$, los requerimientos en cal determinados por las incubaciones y cuatro valores de pH final seleccionados, se elaboró un modelo regresivo de tipo « response surface » y sus predicciones fueron validadas con los resultados de las incubaciones. Se realizó también un modelo « response surface » calculado a partir de la combinación de los datos de este estudio y de datos de un estudio precedente en el sud-este de Australia, cuyas predicciones fueron validadas. Todas las predicciones fueron validadas independientemente con los resultados obtenidos por las incubaciones mediante la técnica de « leave-one-out (jackknife) cross-validation ». Una función de pedotransfer (FPT) de cálculo de requerimientos en cal, normalmente utilizada en Francia fue también comparada y validada. El uso de la FPT fue bastante inexacto. El modelo regresivo del presente estudio produjo las predicciones más exactas de los requerimientos en cal. El modelo combinado produjo resultados más inexactos, pero que pueden considerarse comparables con los cálculos del modelo cali-

brado con los datos franceses. Por tanto, aunque el modelo sea empírico, el uso de las disoluciones tampones parece integrar los diferentes procesos químicos y las interacciones entre las propiedades del suelo que afectan los requerimientos en cal de un suelo ácido. Entonces, sugerimos la creación de una base de datos formada por medidas de pH_{buffer} de Woodruff y de requerimientos en cal calculados mediante incubación de las regiones más relevantes de Francia. De esta forma se podrá obtener un modelo más preciso y fiable para la aplicación en los suelos ácidos franceses.

Como fase final, se decidió determinar los requerimientos en cal de una parcela de cuatro hectáreas situada en las proximidades de Rennes. Para ello se utilizó el modelo « response-surface » de Bretaña y se hizo un análisis geoestadístico, que permitió realizar un mapa por krigado, el cual, puede ser utilizado para la aplicación de forma variable de la dosis de cal, evitando de esta forma, las carencias y los excesos que se producen cuando el encalado se administra uniformemente.

Palabras claves

Suelo, encalado, acidez, predicción, Bretaña.

L'acidité des sols est un problème qui affecte en France le Massif Central, l'Aquitaine, les Vosges et le Massif armoricain (Walter *et al.*, 1997). Les processus d'acidification des sols ont été largement étudiés et décrits (Coppenet *et al.*, 1986; Helyar et Porter, 1989; Van Breemen, 1991; Dambrine, 2001). Les principales causes d'acidité des sols en Bretagne sont: (i) le faible pouvoir tampon des sols issus de roches-mères de type granite, schiste, gneiss ou limon éolien; (ii) l'importance de processus produisant de l'acidité (nitrification, apports atmosphériques) et (iii) la perte d'éléments liée à l'importance du drainage hivernal (Coppenet, 1969, Bussièrès, 1981; Duval, 1989). L'acidité des sols affecte les propriétés biologiques, chimiques et physiques des sols: les bactéries du sol croissent lentement en sol acide (Robson and Abbot, 1989); une phytotoxicité peut apparaître en lien avec des concentrations croissantes d' Al^{3+} et Mn^{2+} (Kamprath, 1970); des carences nutritives peuvent être induites par l'effet antagoniste de Al^{3+} et Ca^{2+} (Huang *et al.*, 1995). Par ailleurs, l'aération du sol peut être réduite par une diminution de la stabilité structurale liée à l'impact de l'acidité sur l'aggrégation des sols (Uexküll et Mutert, 1995). L'ensemble de ces facteurs peut conduire à une baisse significative de la production agricole.

De nombreuses méthodes sont disponibles pour évaluer le besoin en chaux d'un sol acide. Les méthodes de titration du sol par $Ca(OH)_2$ et les incubations de sol en présence de $CaCO_3$ sont les méthodes de laboratoire les plus précises pour déterminer ce besoin. Cependant, ces méthodes sont longues de mises en oeuvre et ne sont généralement utilisées que dans des études de validation ou pour calibrer des modèles (Shoemaker *et al.*, 1961; Aitken *et al.*, 1990; Viscarra Rossel et McBratney, 2000, 2001). La mesure de l'aluminium échangeable (Kamprath, 1970) est également utilisée pour évaluer le besoin en chaux bien que la technique soit peu précise (Oates et Kamprath, 1983; van Raij, 1991; Aitken, 1992). Des méthodes spectrométriques de prédiction du pH et du besoin en chaux ont été testées et sont en cours de développement (Viscarra Rossel *et al.*, 2001). Cependant, les méthodes les plus cou-

rantes comprennent l'emploi de fonctions de pédotransfert (FPT) qui déterminent le besoin en chaux selon une fonction d'une ou plusieurs propriétés du sol (Pionke *et al.*, 1968; Bourrié et Arousseau, 1987; Gustafsson, 1999; CELAC, 2000) et les méthodes fondées sur des solutions-tampon (par exemple, les solutions-tampon de Woodruff) (Woodruff, 1948), Mehlich (Mehlich, 1976) ou Shoemaker (Shoemaker *et al.*, 1961).

Les principales critiques adressées aux méthodes FPT sont la précision moindre de leurs estimations et la nécessité d'intégrer plusieurs variables prédictives, ce qui induit des coûts supplémentaires d'échantillonnage et d'analyse (Evans *et al.*, 1997; Viscarra Rossel et McBratney, 2001). Les méthodes de solution-tampon ont été évaluées par de nombreux auteurs et sont considérées comme étant les plus rapides et les plus précises pour estimer les besoins en chaux d'un sol acide. (McLean *et al.*, 1978; Tran et van Lierop, 1981, 1982; Aitken *et al.*, 1990; Viscarra Rossel et McBratney, 2001). Laveau et Juste (1982) ont testé la solution-tampon de Shoemaker sur des sols sableux des Landes et ont suggéré qu'il s'agissait d'une technique adéquate pour piloter le chaulage des sols vers des pH proches de la neutralité. La détermination du besoin en chaux par des solutions-tampons est fondée sur la mesure du changement de pH du tampon (pH_{tampon}) (généralement conçu pour être proche de la neutralité) lors de son mélange avec un sol acide. En premier lieu, un modèle de calibration est déduit des besoins en chaux d'un ensemble de sols, déterminés par des expériences d'incubation en présence de $CaCO_3$ en fonction des pH_{tampon} mesurés par ailleurs. Les premiers modèles de ce type correspondaient à de simples régressions linéaires entre les besoins en chaux et les pH_{tampon} . Cependant, un certain nombre d'études ont amélioré ces modèles par la mise en oeuvre de fonctions quadratiques (Tran et Van Lierop, 1981, 1982; Aitken *et al.*, 1990) et plus récemment par des régressions de surface de réponse (Massart *et al.*, 1989; Viscarra Rossel et McBratney, 2001; 2000).

Le chaulage des sols acides du Massif armoricain repose actuellement sur l'application d'une dose unique d'amendement calcaïque

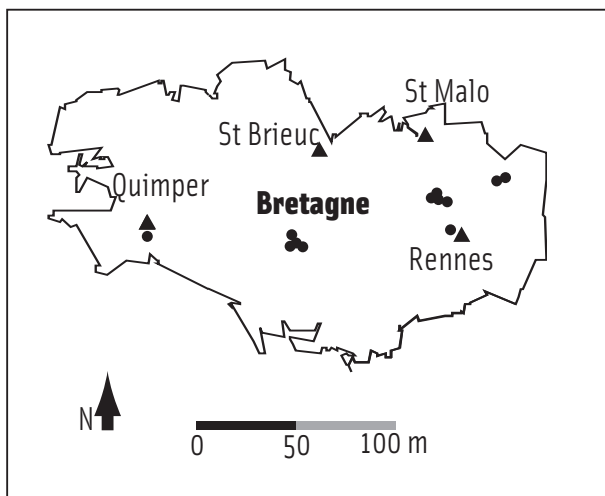
sur l'ensemble d'une unité de gestion. Généralement, cette unité est définie par les limites de parcelle indépendamment de la surface considérée. Les recommandations sont fondées sur des observations empiriques ou sur l'analyse d'un nombre réduit d'échantillons, généralement mélangés en un échantillon composite unique, qui conduit à une dose unique d'application. Bien que les parcelles de la région soient relativement petites (2 – 16 ha), l'application d'une telle dose unique conduit à des zones au sein de la parcelle qui ont été sous- ou sur-chaulés. Ces erreurs d'application découlent de l'absence de prise en compte des variations spatiales du pH du sol et des besoins en chaux au sein de la parcelle (Linsley et Bauer, 1929; Borgelt *et al.*, 1995; Evans *et al.*, 1997; Gustafsson, 1999; Viscarra Rossel et McBratney, 2000). Ainsi, des doses uniques d'application n'optimisent ni la productivité végétale, ni la gestion de la ressource. En modulant les intrants, la démarche d'agriculture de précision vise à résoudre ces problèmes.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

1. établir un modèle de prédiction du besoin en chaux fondé sur l'emploi de la solution-tampon de Woodruff (WRF), qui soit adapté aux sols du Massif armoricain ;
2. tester la méthodologie en combinant deux jeux de données, l'un issu de la présente étude, l'autre provenant du sud-est de l'Australie ;
3. comparer les prédictions de ce modèle aux estimations de référence provenant d'une expérimentation d'incubation de sol en présence de CaCO_3 et à celles dérivées d'une FPT utilisée en France ;
4. utiliser ce modèle pour estimer le besoin en chaux en tout point d'une parcelle et en déduire une carte de modulation des apports en chaux.

Figure 1 - Localisation des douze sites de prélèvement en Bretagne au sein du Massif armoricain.

Figure 1 - Twelve sampling locations situated across Brittany in the Armorican Massif, France



METHODES

Caractéristiques de l'échantillonnage

Douze horizons de surface de sols (0 - 200 mm) présentant des propriétés très contrastées (*tableau 1*) ont été prélevés en Bretagne au sein du Massif armoricain, France (*figure 1*). Le pH des échantillons de sol a été analysé dans une solution aqueuse ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) et dans une solution de CaCl_2 0.01M ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$), dans les deux cas selon un rapport 1/5 (ISO 10390). La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée selon la méthode Metson après extraction à l'acétate d'ammonium à pH 7 (norme NF X 31-130) et la granulométrie a été établie par sédimentation. Les cations échangeables Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} et Na^+ ont été extraits à l'acétate d'ammonium et l'aluminium échangeable selon la méthode utilisant KCl 1M. Le carbone organique (CO) a été déterminé par combustion (ISO 10694). Toutes ces méthodes sont décrites dans AFNOR (1996). Le besoin en chaux de ces sols a été déterminé par des incubations de sol en présence de CaCO_3 .

Les incubations Sol : CaCO_3

Après séchage et tamisage à 2 mm, les douze sols ont été incubés avec des quantités variables de CaCO_3 de qualité analytique, pur à 99,9 %. Ainsi, des sous-échantillons de 50 g ont été incubés avec des quantités de CaCO_3 équivalentes à 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, et 15 t CaCO_3 /ha. Les conversions en tonnes de CaCO_3 par ha ont été établies en supposant une masse volumique de 1,3 g.cm⁻³ et en supposant une incorporation uniforme de la chaux sur une épaisseur de 200 mm. Les sols ont été humidifiés jusqu'à une humidité proche de la capacité au champ, en remplaçant l'eau évaporée de façon hebdomadaire. Après les 30 premiers jours d'incubation, les échantillons ont été séchés, broyés et tamisés avant de les humidifier à nouveau. Cela a été effectué pour obtenir la dissolution complète de CaCO_3 et son mélange intime avec le sol. Les échantillons ont été incubés pendant un total de 62 jours.

Les courbes de pouvoir tampon des sols et la détermination du besoin en chaux à partir des incubations

Le $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ des échantillons incubés de sol a été mesuré à la fin de la période d'incubation. La combinaison de ces valeurs pour différents ratios sol/ CaCO_3 a permis d'établir la courbe de pouvoir tampon de chaque sol. Ces courbes ont ensuite été utilisées pour estimer la quantité de CaCO_3 nécessaire pour augmenter le pH initial du sol jusqu'à un objectif de pH de 5,5 [BEC(5,5)], 6,0 [BEC(6,0)], 6,5 [BEC(6,5)] et 7,0 [BEC(7,0)] (*figure 2b*). Ces données de besoin en chaux ont servi à établir un modèle de prédiction de surface de réponse et à comparer et valider des prédictions de besoin en chaux (Cf. infra).

Le pouvoir tampon (PT) de chaque sol a été estimé par l'inverse de la pente linéaire de chaque courbe, comprise entre $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 4 et 7 (*figure 2a*).

Mesures du pH_{tampon} de Woodruff

La méthode du tampon de Woodruff (WRF) (Woodruff, 1948) a été utilisée dans cette étude, car elle a été considérée comme la plus précise pour estimer des besoins en chaux dans une étude comparant des sols avec un large spectre de pouvoir tampon (Viscarra Rossel et McBratney, 2001 ; 2000). La solution-tampon est constituée de 8 g de p-nitrophénol, 40 g de d'acétate de calcium et de 0,62 g d'oxyde de magnésium, par litre d'eau. Le pH de la solution résultante est ajusté à pH 7,0 ± 0,05 par ajout de HCl dilué ou MgO selon les besoins (Woodruff, 1948). Un délai de 24 heures avant usage permet une stabilisation de la solution-tampon de Woodruff (WRF). Les mesures de pH_{tampon} ont été réalisées dans le surnageant d'une solution sol/tampon selon un rapport 1/2 après agitation du mélange pendant 15 minutes et 5 mn de repos.

Un modèle de surface de réponse pour déterminer le besoin en chaux

Un modèle de surface de réponse tenant compte de l'objectif de pH_{CaCl2} et du pH_{tampon} mesuré a été ajusté aux données de besoins en chaux issues des expériences d'incubation (Figure 2a). Le modèle de prédiction a la forme suivante :

$$BEC(t/ha) = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y + \beta_3x^2 + \beta_4xy + \beta_5y^2 + \varepsilon \quad Eq. 1$$

où BEC est le besoin en chaux, les β_i représentent les para-

mètres du modèle, x est le pH_{tampon} et y est l'objectif de pH après chaulage, $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ est un terme d'erreur de distribution normale de moyenne nulle et de variance (σ^2). La théorie des modèles de surface de réponse et leur mise en œuvre sont décrites par Massart *et al.* (1989).

Un modèle de surface de réponse combinant des données françaises et australiennes

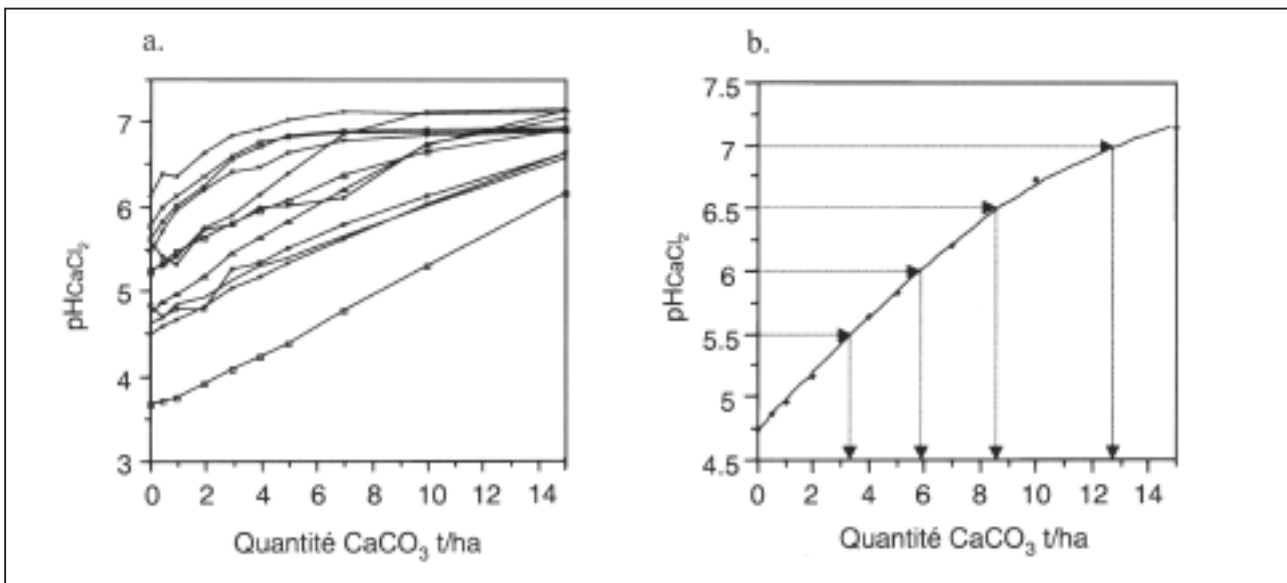
Un modèle de surface de réponse a été également établi en combinant deux jeux de données : celui issu de cette étude et celui de Viscarra Rossel et McBratney (2001), qui ont développé cette approche de modèles de surface de réponse des besoins en chaux dans le sud-est de l'Australie.

Le modèle est le même que celui donné par l'équation 1, cependant le nombre total de sols a été de 34 (22 sols australiens + 12 sols de cette étude) pour chacun des jeux de données correspondant aux quatre objectifs de pH_{CaCl2}, i.e. 5,5, 6,0, 6,5 et 7,0. Ces données ont été combinées pour examiner les différences entre les deux modèles et voir si le modèle combiné permet des estimations plus précises des besoins en chaux pour les sols acides du Massif armoricain et ceux du sud-est de l'Australie.

La fonction de pédotransfert pour déterminer le besoin en chaux

Figure 2 - (a.) Evolution du pH_{CaCl2} en fonction des quantités de CaCO₃ apportées pour les douze échantillons de sol considérés ; (b.) évolution du pH_{CaCl2} en fonction des quantités de CaCO₃ pour un échantillon, montrant comment sont définis les besoins en carbonate de calcium avec des objectifs de pH_{CaCl2} de 5,5, 6,0, 6,5 et 7,0.

Figure 2 - (a.) Soil buffering capacity curves for each of the twelve different soil samples used the experiments, (b.) buffering capacity curve for one of the 12 soils, showing the amount of lime needed to raise the acidic soil pH_{CaCl2} to target pH_{CaCl2} values of 5.5, 6.0, 6.5 and 7.0



Bourrié et Arousseau (1987) ont proposé une fonction linéaire pour déterminer le besoin en chaux en France, basée sur la CEC et la différence entre un objectif de taux de saturation du complexe d'échange et le taux de saturation initial du sol acide. Le Comité d'Etudes Liaison et Amendements Minéraux Basiques (CELAC) (CELAC, 2000) a proposé d'améliorer les prédictions de besoin en chaux en incluant des variables additionnelles dans la fonction originale de Bourrié et Arousseau (1987), selon :

$$\text{BEC}_{\text{FPT}} \text{ (t/ha)} = \text{Eq 2}$$

$$\frac{\text{CEC (TSS-TSI)} \times 280d(100 - Cx) \times 1,3}{100\ 000\ 000} \times \frac{0,0001008}{0,00005608}$$

où BEC_{FPT} est le besoin en chaux déterminé par la fonction de pédotransfert (FPT), TSI est le taux de saturation initial, TSS est le taux de saturation souhaité, dont le choix dépend du type de culture envisagé, d est la profondeur d'incorporation (200 mm), et Cx est le pourcentage de cailloux (estimé ici à 3 %). Pour les sols de cette étude, la relation entre le $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ du sol et TSI a été utilisée pour calculer TSS pour des objectifs de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 5,5, 6, 6,5 et 7. Nous avons en effet été capables d'estimer TSS pour chacun des objectifs de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, en utilisant la régression linéaire : $\text{TSI} = -97,36 + 32,45 \text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ ($r^2 = 0,81$).

Comparaison et validation des prédictions de besoins en chaux

La quantification des erreurs de prédiction et des biais éventuels du modèle de surface de réponse a été établie par une procédure de rééchantillonnage de type « leave-one-out jackknife » décrite par Efron and Tibshirani (1993). Celle-ci suppose d'exécuter chacun des modèles de prédiction construits à partir de $n-1$ sols et de prédire le besoin en chaux du sol retiré de l'analyse. De ce fait, la validation des modèles est indépendante de la phase de leur construction car elle est menée sur des échantillons non pris en compte dans la calibration. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le besoin en chaux de chaque sol ait été prédit pour tous les objectifs de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, i.e. 5,5, 6,0, 6,5 et 7,0. L'exactitude, la justesse et la fidélité (AFNOR, 1994) des prédictions de besoin en chaux ont été comparées pour les modèles de surface de réponse et pour les FPT. L'exactitude des prédictions a été mesurée par l'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=i}^n (\text{BEC}_p - \text{BEC}_i)^2} \quad \text{Eq 3}$$

où BEC_p est la prédiction du besoin en chaux par le modèle et BEC_i est le besoin en chaux établi par les expériences d'incubation. La justesse a été quantifiée par l'erreur moyenne (ME) :

$$\text{ME} = \frac{1}{n} \sum_{j=i}^n (\text{BEC}_p - \text{BEC}_i) \quad \text{Eq 4}$$

La fidélité a été estimée par l'écart-type de l'erreur moyenne (SDE)

Les erreurs de prédiction (i.e. les résidus) des modèles de surface de réponse ainsi que des FPT ont été représentées pour chaque objectif de pH. Une surface de réponse de l'erreur au carré a ainsi pu être établie en fonction de l'objectif de pH et du $\text{pH}_{\text{tampon}}$ permettant de déterminer les zones de prédiction les plus incertaines du besoin en chaux. Cette surface fournit en effet une estimation continue de l'incertitude du modèle de besoin en chaux.

Analyse spatiale des besoins en chaux

62 échantillons d'horizons A (0 – 200 mm) ont été prélevés aux nœuds d'une grille triangulaire de 25 m de côté, adaptée à une parcelle de 4 ha située près de Rennes. En chaque nœud, un échantillon composite a été réalisé à partir de 3 prélèvements effectués dans un rayon d'un mètre. Au laboratoire, le sol a été séché, broyé et tamisé à 2 mm. Le $\text{pH}_{\text{tampon}}$ WRF a été mesuré comme précédemment décrit et le besoin en chaux requis pour un objectif de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 6 a été déterminé en utilisant le modèle de surface de réponse. Le variogramme expérimental a été calculé et ajusté de façon optimale par un modèle exponentiel (Webster et Oliver, 1990). Ce modèle a été utilisé dans un krigeage-bloc (Burgess et Webster, 1980) permettant de prédire les besoins en chaux aux nœuds d'une grille de 2,5 m de côté. Les interpolations ont été moyennées selon des blocs de 10 m. Un minimum de 30 mesures a été utilisé pour chaque estimation et une carte krigée des besoins en chaux pour un objectif de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 6 a ainsi été établie sur l'ensemble de la parcelle.

RESULTATS ET DISCUSSION

Le *tableau 1* récapitule les statistiques descriptives des douze sols utilisés dans cette étude, ainsi que leurs besoins en chaux déduits de l'expérience d'incubation et des courbes de pouvoir tampon des sols (*figure 2*).

Les sols retenus ont des propriétés très variables (*tableau 1*) et à ce titre ont été considérés adaptés à la calibration d'un modèle de prédiction du besoin en chaux, même si seuls douze sols furent retenus. Nous proposons que ces échantillons représentent l'amorce d'une base de données de sol, couvrant l'ensemble des régions de France, permettant d'établir un modèle plus robuste pour des prédictions fiables et précises du besoin en chaux. La large gamme de variation des besoins en chaux dans la région d'étude (*tableau 1*) souligne la nécessité du développement d'une telle méthode. Les besoins en chaux correspondant à différents objectifs de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 5,5, 6,0, 6,5 et 7,0 ont été calculés à des fins comparatives et pour permettre de retenir différents objectifs de redressement selon les cultures envisagées.

Prédictions des besoins en chaux à partir d'autres propriétés du sol

Les mesures de $\text{pH}_{\text{tampon}}$ expliquent 93 % de la variation des besoins en chaux, ce qui conforte l'emploi de la méthode par solu-

tion-tampon pour estimer ces besoins en chaux (Tran et van Lierop, 1981, 1982). Parmi les propriétés du sol habituellement utilisées pour inférer les besoins en chaux de sols acides, le pH du sol explique la plus large proportion de la variabilité de BEC (*figure 2a*). Le coefficient de corrélation R^2 est plus élevé que celui relevé dans des études antérieures (Pionke *et al.*, 1968; Aitken *et al.*, 1990; Viscarra Rossel et McBratney, 2001) et suggère que le pH du sol est un bon indicateur pour savoir si un sol doit être chaulé ou non. Par contre, le pH du sol n'est pas pertinent pour quantifier le besoin en chaux.

La CEC du sol explique 38 % de la variation du besoin en chaux (*figure 3c*). Les sols avec une CEC élevée sont également riches en carbone organique. Ces sols nécessitent de plus grandes quantités de chaux pour neutraliser l'acidité présente. Le calcium échangeable et l'aluminium échangeable ne sont apparus que faiblement corrélés aux variations de besoins en chaux (*figures 3e et 3f*).

Certains travaux préconisaient de baser la détermination des besoins en chaux sur l'inactivation des effets toxiques de l'aluminium échangeable (Kamprath, 1970). Cependant, l'absence d'une relation claire entre l'aluminium échangeable et le besoin en chaux (*figure 3f*) montre le caractère inapproprié des déterminations du besoin en chaux basées uniquement sur ce critère. Aitken *et al.* (1995) et Viscarra Rossel et McBratney (2001) ont présenté des résultats analogues. Par ailleurs, Aitken *et al.* (1995) ont indiqué que les doses de chaux nécessaires pour réduire l'aluminium échangeable à des teneurs prédéfinies étaient très supérieures à celles calculées à partir des valeurs d'aluminium échangeable, même quand un facteur de chaulage de 2, suggéré par Kamprath (1970), était utilisé.

Le *tableau 2* récapitule les corrélations entre les propriétés du

sol et le besoin en chaux.

Dans une certaine mesure, le besoin en chaux dépend de l'ensemble des propriétés du sol listées dans le *tableau 2*. Néanmoins, aucune de ces relations, excepté pour le pH_{tampon} , n'apparaît suffisante pour prédire le besoin en chaux. Le pH_{tampon} est corrélé de façon positive avec le pH du sol, le calcium échangeable, et de façon négative avec l'aluminium échangeable, le PT et la CEC (*i.e.* la propriété du sol la plus importante vis-à-vis du besoin en chaux) (*tableau 2*). Ces corrélations significatives avec diverses propriétés du sol expliquent pourquoi la solution-tampon WRF, et de façon plus générale les méthodes utilisant des tampons sont considérées comme les plus appropriées pour évaluer de façon rapide le besoin en chaux (Viscarra Rossel et McBratney, 2001).

De fortes corrélations négatives sont observées entre le besoin en chaux et le pH du sol (*tableau 2*). Le besoin en chaux est positivement corrélé à PT, à la CEC, à l'aluminium, au carbone organique et à l'argile (*tableau 2*). La corrélation positive entre PT et le besoin en chaux indique que des sols ayant un faible pouvoir tampon nécessitent de plus faibles quantités de chaux que des sols avec un pouvoir tampon élevé. Les courbes du pouvoir tampon des douze sols sont présentées dans la *figure 2*. Généralement, les sols ont un pouvoir tampon plus élevé au-delà de pH 7, en raison de la présence de carbonates, et en deçà de pH 4, du fait de la présence d'aluminium, que dans la gamme de variation intermédiaire de pH 4 à 7. Magdoff et Bartlett (1985) ont avancé des résultats similaires, *i.e.* leurs sols avaient un pouvoir tampon plus élevé à des pH faibles (<4) et forts (>7) qu'entre ces deux valeurs. Les effets antagonistes des concentrations élevées de l'aluminium sur le calcium sont observés sur les *figures 3e, 3f* et dans le *tableau 2*.

Tableau 1 - Statistiques des propriétés physico-chimiques des sols de l'expérience d'incubation (n = 12)

Table 1 - Soil property statistics for the soils used in the incubation experiment (n = 12)

	Moyenne	Ecart-type	Min.	Médiane	Max.
pH_{CaCl_2}	5,12	0,67	3,67	5,25	6,14
pH_{H_2O}	5,54	0,75	4,32	5,44	6,68
pH_{tampon}	6,64	0,22	6,16	6,70	6,88
PT [§]	6,02	1,63	3,99	5,88	9,40
Carbone orga. dag/kg	2,1	1,12	1,0	1,5	4,4
CEC mmol(+)/kg	92,3	23,5	60,9	85,4	140,3
Ca mmol(+)/kg	48,3	18,3	5,4	38,3	78,3
Al mmol(+)/kg	3,9	8,5	0,5	1,0	30,6
Argile dag/kg	17,1	2,76	14,0	16,45	23,3
BEC _{inc} (5,5) Mg/ha	3,24	3,56	0,0	1,10	11,22
BEC _{inc} (6,0) Mg/ha	5,26	4,52	0,39	4,28	14,16
BEC _{inc} (6,5) Mg/ha	8,40	5,21	1,10	8,83	17,1
BEC _{inc} (7,0) Mg/ha	12,74	5,22	4,9	13,49	20,03

§ PT correspond au pouvoir-tampon du sol en Mg CaCO₃/200 mm sol/unité pH

Figure 3 - Représentations du besoin en carbonate de calcium par incubation pour un $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ désiré de 6,5 en fonction du (a.) $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; (b.) du pH dans le solution tampon Woodruff ($\text{pH}_{\text{tampon}}$); (c.) de la CEC Metson; (d.) du carbone organique; (e.) du calcium échangeable et (f.) de l'aluminium échangeable.

Figure 3 - Relationship between (a.) soil $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, (b.) Woodruff (WRF) pHbuffer, (c.) Metson cation exchange capacity (CEC), (d.) organic carbon (OC), (e.) exchangeable calcium, (f.) aluminium, and incubation determined lime requirements to a target $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ of 6.5 (LR(6.5))

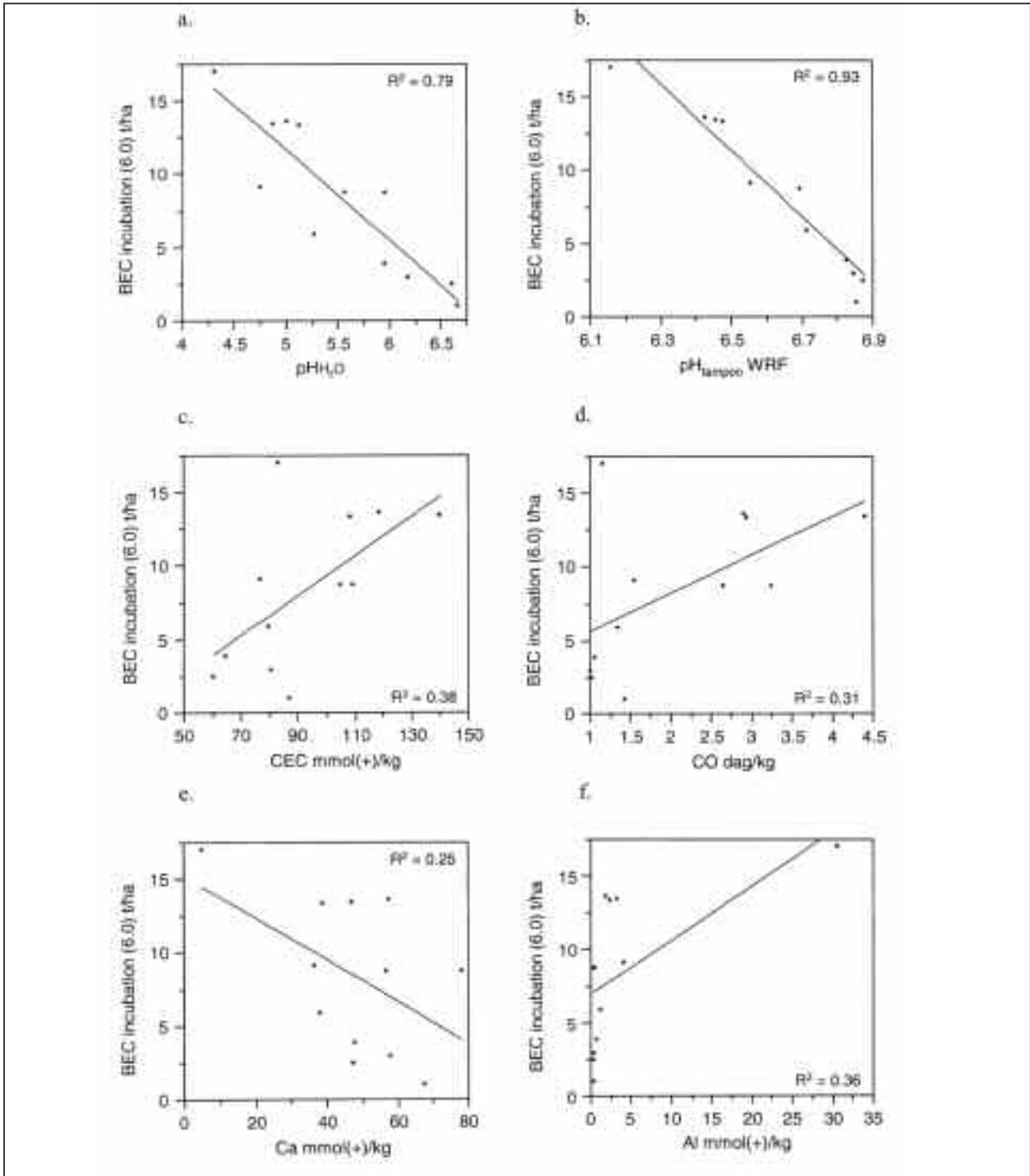


Tableau 2 - Corrélations entre le besoin en carbonate de calcium par incubation pour un objectif de pH de 6,0, et diverses propriétés du sol (n = 12)

Table 2 - Lower half of correlation matrix for incubation lime requirements to a target pH_{CaCl_2} of 6.0 (Inc. LR) and soil properties (n = 12)

	BEC _{inc}	pH _{CaCl₂}	pH _{H₂O}	pH _{tampon}	PT	CO	CEC	Ca	Al
pH _{CaCl₂}	-0,91								
pH _{H₂O}	-0,89	0,94							
pH _{tampon}	-0,96	0,96	0,91						
PT	0,67	-0,39	-0,42	-0,58					
CO	0,56	-0,24	-0,35	-0,37	0,82				
CEC	0,61	-0,29	-0,39	-0,47	0,84	0,94			
Ca	-0,5	0,72	0,63	0,64	0,11	0,3	0,23		
Al	0,6	-0,75	-0,61	-0,75	0,08	-0,19	-0,08	-0,79	
Argile	0,55	-0,37	-0,41	-0,39	0,52	0,77	0,67	0,22	0,01

Le modèle régional de surface de réponse pour la détermination du besoin en chaux

Viscarra Rossel et McBratney (2001 ; 2000) ont établi pour le sud-est de l’Australie des modèles de prédiction du besoin en chaux à un seul ou à deux facteurs. Le modèle à deux facteurs estime le besoin en chaux non pas uniquement à partir du pH_{tampon} et de l’objectif de pH, mais également à partir du pH_{CaCl₂} initial. Néanmoins, cette variable additionnelle et le modèle à deux facteurs n’avaient pas amélioré significativement (p > 0,05) les prédictions du besoin en chaux (Viscarra Rossel et McBratney, 2000).

De ce fait, seul un modèle à facteur unique, dont la surface de réponse est indiquée dans la figure 4, a été établi pour les sols du Massif armoricain.

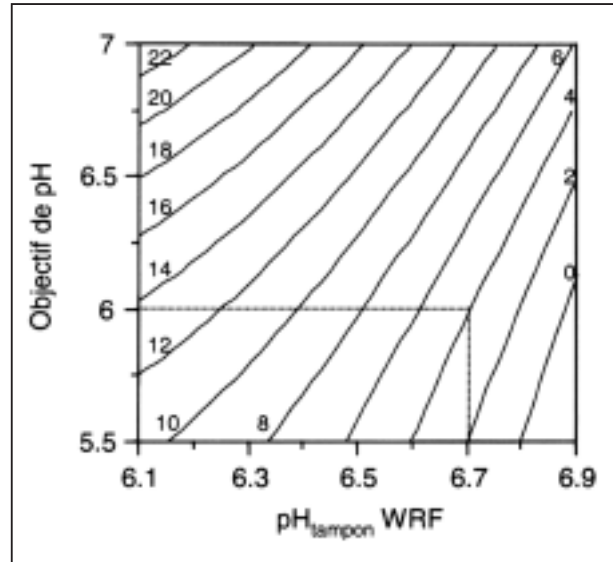
Les besoins en chaux peuvent être estimés graphiquement par simple lecture de la figure 4 ou calculés plus précisément en employant le modèle de l’équation 5:

$$BEC_{SR\text{ Bretagne}} (t/ha) = -403,78 + 132,76x + 6,71 y - 9,78x^2 - 3,9xy + 2,05y^2 \tag{Eq. 5}$$

où x est le pH_{tampon} et y est l’objectif de pH_{CaCl₂}. Par exemple, pour chauler un sol acide jusqu’à un objectif de pH_{CaCl₂} de 6 (si ce pH est considéré optimal pour la culture) avec un pH_{tampon} mesuré en ce site de 6,7, l’équation conduit à un besoin de 4,3 t/ha de chaux. L’un des avantages de ce modèle est de pouvoir choisir un objectif quelconque de pH_{CaCl₂} compris entre 5,5 et 7,0 en fonction du type de culture, des potentiels de rendement au sein de la parcelle ou encore de considérations économiques.

Figure 4 - Surface de réponse du besoin en carbonate de calcium (en t/ha de CaCO₃) en fonction de pH dans la solution tampon de Woodruff (pH_{tampon}) et du pH_{CaCl₂} visé.

Figure 4 - Woodruff (WRF) buffer (local) single-factor response surface showing lime requirements in t/ha. The R² of the model was 0.94



Le modèle de surface de réponse à un seul facteur combinant des données françaises et australiennes

Le modèle de surface de réponse du besoin en chaux utilisant les données combinées (BEC_{SR} combinée) est donné par l'équation 6:

$$\text{BEC}_{\text{SR combinée}} \text{ (t/ha)} = -403,99 + 126,45 x + 15,26 y - 9,01 x^2 - 4,55 xy + 1,58 y^2 \quad \text{Eq. 6}$$

Pour l'exemple précédent, *i.e.* un objectif de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 6 et un $\text{pH}_{\text{tampon}}$ mesuré de 6,7, le besoin en chaux prédit par le modèle combiné de l'équation 6 est de 3,78 t/ha. Ainsi, les deux modèles (Eq. 5 et 6) s'avèrent très similaires et les prédictions de chaux comparables, alors que les sols pris en compte dans les deux modèles sont très différents.

Comparaison et validation des prédictions du besoin en chaux

Les besoins en chaux des sols du Massif armoricain prédits à partir du modèle régional (figure 4, Eq. 5) et du modèle combiné (Eq. 6) ont été testés par la méthode de validation croisée précédemment décrite. Ces prédictions ainsi que celles dérivées des FPT (Eq. 2) ont également été comparées aux besoins établis à partir des expériences d'incubation. Ces résultats sont donnés respectivement dans les figures 5a, 5b et 5c.

Les prédictions du besoin en chaux déduites de la surface de réponse établie à partir des sols locaux s'avèrent les plus exactes et les plus fidèles (RMSE = 1,78 t/ha, SDE = 1,79 t/ha) (figure 5a). Les prédictions du modèle combiné sont moins exactes (RMSE

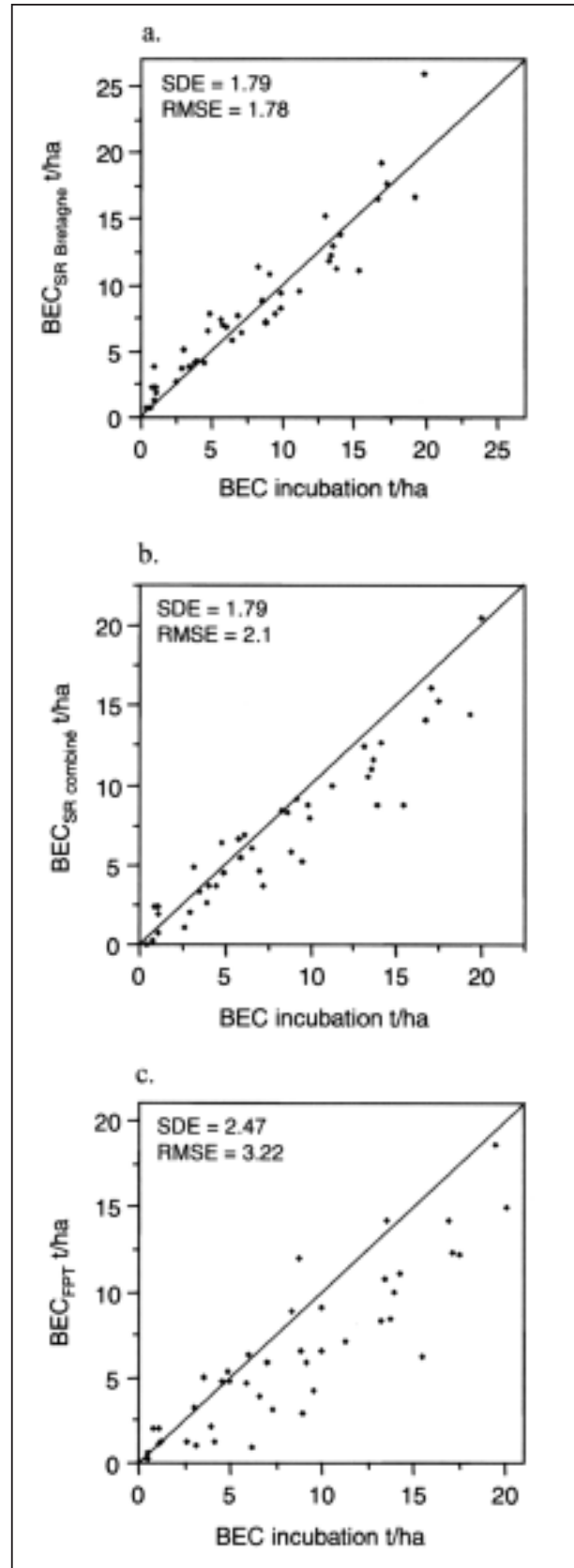


Figure 5 - Prédications du besoin en carbonate de calcium en fonction de valeurs estimées par l'expérience d'incubation. Les prédictions dérivent : (a.) du modèle d'ajustement expérimental établi sur les seules données de Bretagne (BEC_{SR} bretagne); (b.) du modèle d'ajustement expérimental couplant des données de Bretagne et d'Australie (BEC_{SR} combiné); (c.) de la fonction de pédotransfert(FPT) intégrant la CEC, le taux de saturation et l'argile (BEC_{FPT}). L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type de l'erreur (SDE) sont indiqués sur chacun des graphes

Figure 5 - Model predicted versus observed (incubation) lime requirements. Predictions obtained from (a.) the response surface model that uses data from Brittany only (LR_{RS} Brittany), (b.) the combined response surface model that uses data from Brittany and Australian (LR_{RS} Combined) (Australian data from Viscarra Rossel & McBratney (2001)) and (c.) the pedotransfer function (LR_{MF}). The accuracy (RMSE) and precision (SDE) for the predictions is given in each graph.

= 2,1 t/ha), mais ont une fidélité analogue à celle du modèle régional (SDE = 1,79 t/ha (figure 5b). La FPT (Eq. 2) fournit les estimations les moins exactes et fidèles (RMSE = 3,22 t/ha, SDE = 2,47 t/ha). Ce dernier résultat est similaire à celui obtenu par d'autres auteurs ayant également testé des FPT (Viscarra Rossel et McBratney, 2001).

Une représentation continue de l'incertitude d'estimation du besoin en chaux est fournie par la superposition de la surface de réponse du carré de l'erreur de prédiction à celle du besoin en chaux (figure 6a). Par exemple, si le pH_{tampon} mesuré est compris entre 6,4 et 6,8 et que l'objectif de pH_{CaCl_2} est de l'ordre de 5,6 à 6,3 (i.e. des besoins en chaux compris entre 0 t/ha à 9 t/ha, dans le quart inférieur droit de la surface), les prédictions sont les plus précises (figure 6a). Inversement, si le pH_{tampon} est inférieur à 6,4 et que l'objectif de pH est supérieur à 6,25 (i.e. des besoins en chaux supérieurs à 10 t/ha, dans le quart supérieur gauche de la surface), les prédictions de besoin en chaux auront la plus grande incertitude avec des erreurs de prédiction supérieures à 2 t/ha (figure 6a).

Les erreurs de prédiction et les biais de chacun des modèles sont donnés dans les figures 6b à 6d pour des objectifs de pH de 5,5, 6,0, 6,5 et 7,0. Le modèle régional de surface de réponse (Eq. 5; figure 4) produit les prédictions les moins biaisées, en sous-estimant en moyenne les besoins de -0,12 t/ha (figure 6b). Les erreurs sont les plus faibles pour des prédictions pour un objectif de pH_{CaCl_2} de 6,0 et les plus fortes pour un objectif de 7,0 (figure 6b). Le biais du modèle combiné (Eq. 6) est de -1,13 t/ha, l'erreur de prédiction et le biais augmentant avec des objectifs croissants de pH (figure 6c). Les FPT (Eq. 2) produisent les erreurs de prédiction les plus importantes quel que soit l'objectif de pH et sont les plus biaisées du fait d'une sous-estimation moyenne de -2,1 t/ha (figure 6d).

La surface de réponse combinée conduit à des résultats moins précis, mais de façon étonnante produit des prédictions comparables à celle du modèle régional (figures 5a et b). Viscarra Rossel et McBratney (2000) avaient noté que les modèles de surface de réponse, de par leur caractère empirique, ne pouvaient conduire à des prédictions fiables que si elles étaient appliquées à des sols analogues à ceux ayant servi à établir les modèles. La similarité des résultats que nous observons, suggère que malgré ce caractère empirique, la méthode des tampons intègre l'effet des propriétés des sols, de leurs interactions (tableau 2) et les processus chimiques qui affectent le besoin en chaux des sols acides.

Analyse spatiale des besoins en chaux

Les statistiques descriptives du besoin en chaux correspondant à un objectif de pH_{CaCl_2} de 6 sont données dans le tableau 3.

La distribution du besoin en chaux est légèrement asymétrique, la valeur médiane étant de 1,67 t/ha et l'étendue comprise entre 0 et 6 t/ha (tableau 3).

Le variogramme du besoin en chaux établi à partir de la mesure du pH_{tampon} en divers sites de la parcelle considérée et par application du modèle régional, est donné dans la figure 7a. La carte krigée du besoin en chaux pour un objectif de pH_{CaCl_2} de 6,0 est donnée dans la figure 7.b.

Le variogramme du besoin en chaux est croissant jusqu'à une distance de 157 m, suggérant la présence d'une légère tendance le long du versant orienté est-ouest (figure 7b). Néanmoins, l'extraction de cette tendance n'est pas apparue utile, un modèle exponentiel s'ajustant de façon satisfaisante au variogramme. Le rapport entre l'effet de pépite (C0) et le palier (C0+ C) est faible (figure 7a). Ce rapport révèle l'importance de la variabilité à courte distance, éventuellement plus courte que celle du pas d'échantillonnage, ainsi que les effets des erreurs d'échantillonnage et analytiques (Viscarra Rossel et McBratney, 1998). Ce rapport n'étant que de 17 % (figure 7a), on peut considérer que l'échantillonnage et les méthodes analytiques sont satisfaisants.

La distribution des besoins en chaux estimés par krigeage était également asymétrique, avec une valeur médiane de 1,64 t/ha et une étendue comprise entre 0,32 to 4,8 t/ha (tableau 3). Cette étendue plus faible reflète l'effet de lissage opéré par les algorithmes de krigeage (Isaaks et Srivastava, 1989). La carte de besoin en chaux (figure 7b) peut servir pour moduler les doses de chaux appliquées au sein de cette parcelle. L'étendue importante du besoin en chaux au sein d'une parcelle de taille relativement petite souligne l'inefficacité d'une stratégie de dose unique. Par exemple, si une dose moyenne de 2 t/ha était appliquée sur toute la parcelle, des zones sur- ou sous-chaulées seraient induites. Des applications excessives peuvent être coûteuses et éventuellement affecter la disponibilité de certains éléments nutritifs (par exemple, le phosphore). *A contrario*, en cas de dose insuffisante, la disponibilité de certains éléments toxiques, comme l'aluminium, n'est pas entièrement circonscrite et peut affecter des processus physiologiques des plantes et leur rendement.

Tableau 3 - Statistiques descriptives des besoins en carbonate de calcium correspondant à un pH_{CaCl_2} désirée de 6,0 pour les sites de mesure (n = 62) et pour les estimations par krigeage au sein de cette parcelle (n = 6502).

Table 3 - Summary statistics for field lime requirements to target pH_{CaCl_2} 6,0 (LR(6,0)) (n = 62) and for the kriged data (n = 6502).

	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Etendue
BEC(6,0) t/ha	1,87	1,73	1,67	0 – 6,36
BEC(6,0) krigé t/ha	2,0	1,12	1,64	0,32 – 4,8

Figure 6 - Analyse des erreurs de prédiction EP ($BEC_{incubation} - BEC_{modèle}$) selon les sources de données considérées: (a) Surimpression de Ep^2 (tirés en gras) sur le modèle de réponse issu des seules données de Bretagne ($BEC_{SR Bretagne}$) (Cf. fig. 4); Ep en fonction des objectifs de pH_{CaCl_2} de 5.5, 6.0, 6.5 and 7.0 pour: (b) le modèle de réponse issu des seules données de Bretagne ($BEC_{SR Bretagne}$); (c) le modèle de réponse combinant les données de Bretagne et d'Australie ($BEC_{SR Combiné}$); (d) la fonction de pédotransfert (BEC_{FPT}).

Figure 6 - (a.) Response surface of the lime requirement prediction-error squared (dark dashed lines) derived from predictions of the local model that uses data from Brittany only ($LR_{RS Brittany}$), draped over the response surface of lime requirements (faded solid lines) (also given in Figure 4); (b.) residuals of model predicted lime requirements to specific target pH_{CaCl_2} values of 5.5, 6.0, 6.5 and 7.0 for the local response surface model ($LR_{RS Brittany}$); (c.) for the combined response surface model that uses data from Brittany and Australian ($LR_{RS Combined}$) and (d.) for the pedotransfer function (LR_{PTF}).

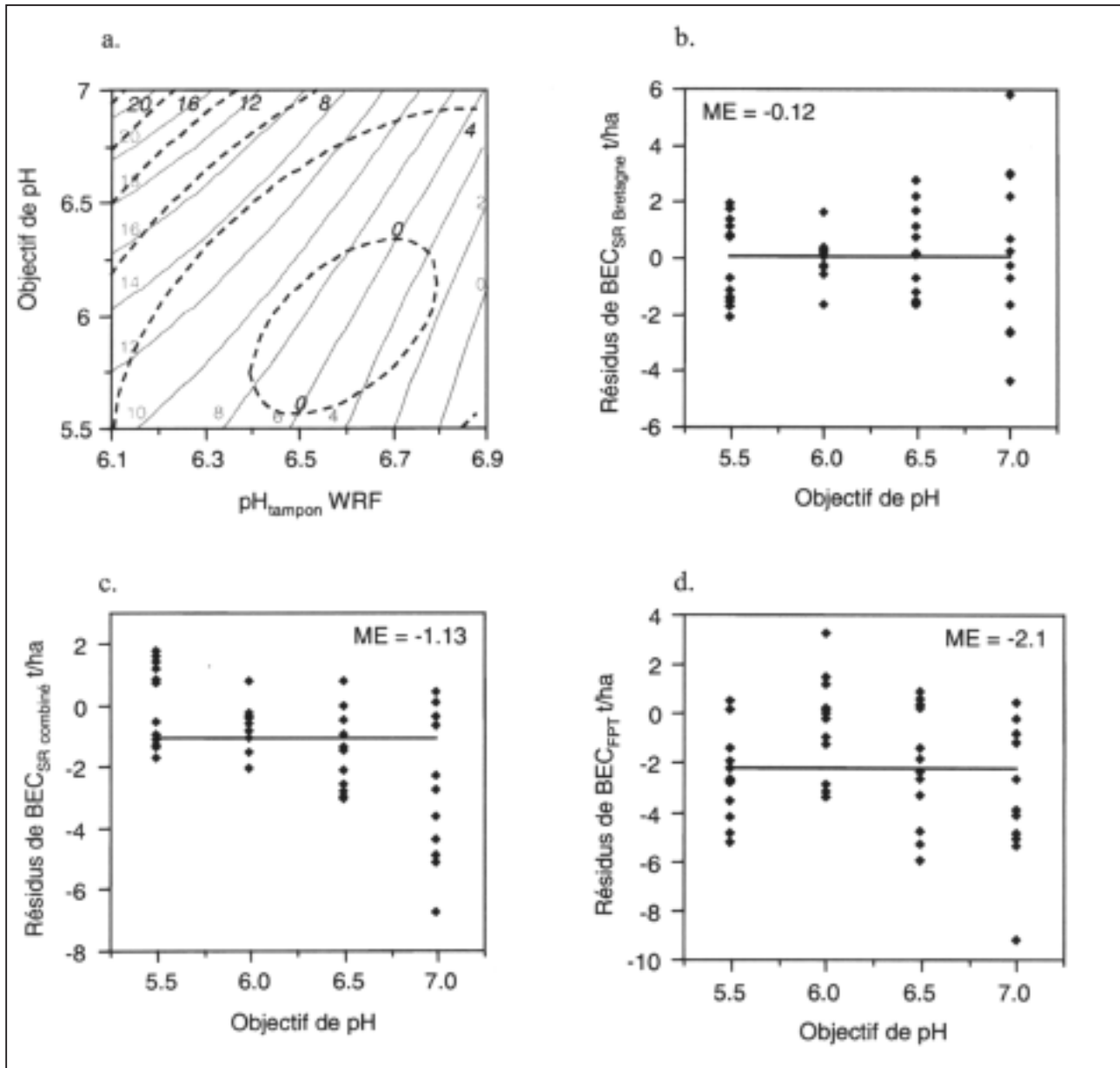
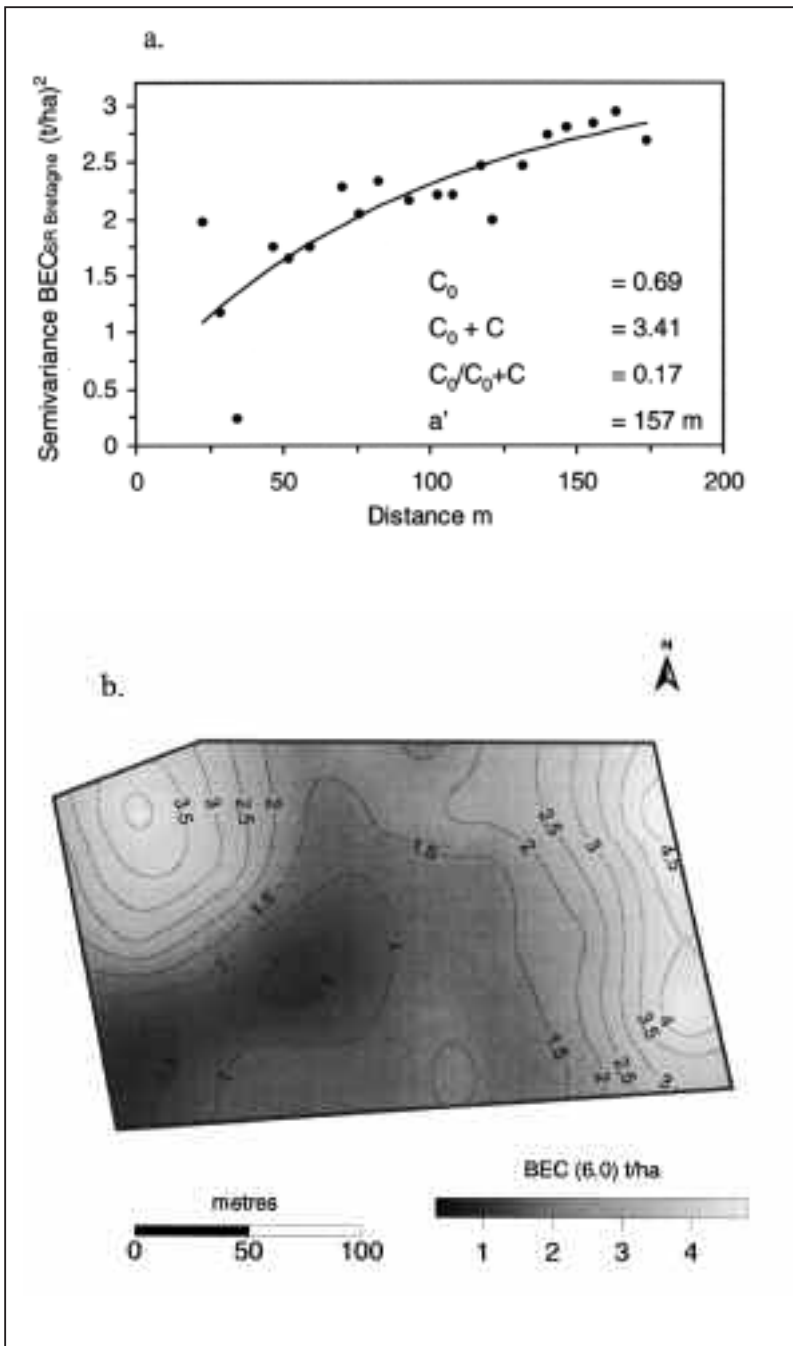


Figure 7 - Analyse géostatistique du besoin en carbonate de calcium au sein d'une même parcelle du bassin de Rennes en considérant un objectif de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 6,0: (a.) variogramme expérimental et modèle exponentiel ajusté (C_0 = pépite; C_0+C palier; a' = la portée effective); (b.) carte du besoin en carbonate de calcium obtenue par krigeage bloc.

Figure 7 - (a.) Experimental semivariogram with fitted exponential model and (b.) block kriged map of for lime requirements to a target $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ of 6.0. In (a.) C_0 is the nugget variance, $C_0 + C$ is the sill variance, a' is the effective range, i.e. the lag at which the semivariance is approximately equal to $(C_0 + 0.95C)$



Conclusion

Le besoin en chaux des sols dépend de différentes propriétés et de leur interaction : parmi d'autres, ces propriétés incluent le pH du sol, son pouvoir tampon, la capacité d'échange cationique, la matière organique, l'aluminium échangeable et la teneur en argile. Ces propriétés prises individuellement ou en association ne permettent pas des estimations précises du besoin en chaux. Cet article introduit en France l'emploi des solutions-tampon et propose la calibration et la mise en oeuvre d'un modèle de surface de réponse qui permet des estimations précises du besoin en chaux. La méthodologie adoptée a permis des prédictions plus fiables du besoin en chaux que la fonction de pédotransfert couramment utilisée en France. La mise au point d'un modèle à partir des données combinées de cette étude et d'un jeu de données du sud-est de l'Australie, a donné des résultats moins précis mais néanmoins comparables à ceux du modèle régional. Ainsi, bien que la modélisation proposée soit de type empirique, la méthodologie des solutions-tampon semble intégrer les interactions entre les propriétés du sol et les processus chimiques qui affectent le besoin en chaux des sols. Pour ces raisons, les prédictions du besoin en chaux ont été plus précises que celles de la fonction de pédotransfert du CELAC. Nous suggérons que ce jeu de données serve de point de départ à une base de données de mesures de $\text{pH}_{\text{tampon}}$ de Woodruff associées à des incubations, portant sur l'ensemble des régions de France. La méthodologie est simple et peu être aisément appliquée. L'objectif de cette base de donnée serait de rassembler les données expérimentales et de produire un modèle plus robuste qui pourrait être utilisé pour estimer de façon précise le besoin en chaux en France. La fonction de pédotransfert actuellement utilisée pour estimer le besoin en chaux s'est avérée biaisée et peu précise. Par ailleurs, la prise en compte de plusieurs propriétés peut conduire à des contraintes de temps et de coût prohibitifs. Enfin, nous avons montré que le modèle de surface de réponse pouvait d'ores et déjà être utilisé pour des prédictions intra-parcellaires du besoin de chaux et pour produire des cartes de modulation des apports en chaux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient sincèrement J.L. Julien et R. Poss, qui par leur lecture détaillée et constructive, ont permis d'améliorer une première version de cet article. Ils sont également reconnaissants à G. Dutin de l'UMR Sol, Agronomie et Spatialisation de Rennes pour son assistance technique.

BIBLIOGRAPHIE

- Afnor 1994 - Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie. Norme NFX07-001, 59 p.
- Afnor., 1996 - Qualité des sols. Recueil de normes françaises. 553 p.
- Aitken R.L., 1992 - Relationships between extractable Al, selected soil properties, pH buffer capacity and lime requirement in some acidic Queensland soils. *Australian Journal of Soil Research* 30: 119-130.
- Aitken R.L., Moody P.W., McKinley P.G., 1990 - Lime requirement of acidic Queensland soils II. *Australian Journal of Soil Research* 28: 703-715.
- Aitken R.L., Woody P.W., Dickson T., 1995 - Field calibration of lime requirement soil tests. In R.A. Date N.J. Grundon, G.E. Rayment and M.E. Probert (Eds.), *Plant and Soil Interactions at Low pH*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. 12-16 September, 1993, Brisbane, Australia. Kluwer Academic Publishers, pp. 65-70.
- Borgelt S.C., Searcy S.W., Stout B.A., Mulla D.J., 1995 - A method for determining spatially variable liming rates. *American Society of Agricultural Engineers Paper No. 89-1034*.
- Bourrieu G., Arousseau P., 1987 - pH et besoin en chaux. Colloques AFES « CEC et fertilisation des sols agricoles », Caen, 19 et 20 novembre, 1987, pp. 155-173.
- Burgess T.M., Webster R., 1980 - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31: 315-331.
- Bussièrès Ph., 1981 - Maîtrise du pH des sols cultivés, par les amendements calcaires. Thèse Docteur-ingénieur. Institut National Polytechnique de Toulouse, pp. 169.
- CELAC 2000 - Amendement basique mode d'emploi. Comité d'études et de liaison des amendements minéraux basiques Hors série-avril. Edit. Comifer.
- Coppenet M., 1969 - Les sols de la Galice comparés aux sols de la Bretagne occidentale. *Science du sol.*, 2: pp. 43-56.
- Coppenet M., Aillot G., Cariou B., Darre J., Haut R., Colomb B., 1986 - Etat calcaire des sols et fertilité: Le chaulage. Edit. Comifer.
- Duval L., 1989 - L'emploi des amendements calcaires dans les sols acides de la Bretagne occidentale. Sur le point de l'élevage. pp. 3-7.
- Dambrine E. 2001 - Acidité et acidification des sols; une introduction. Colloque l'acidification des sols: origine, approche, enjeux et maîtrise. Programme résumés des exposés. Versailles, 4 et 5 avril.
- Efron B., Tibshirani R.J., 1993 - An introduction to the bootstrap. *Monographs on Statistics and Applied Probability* 57. Chapman and Hall Inc, New York.
- Evans E.J., Shield R.S., Mohamed S.B., 1997 - Optimisation of lime application to take account of within-field variation in pH and soil texture. In J.V. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture '97*. Vol. 1: *Spatial Variability in Soil and Crop*. BIOS Scientific Publishers Ltd., UK, pp 103-110.
- Gustafsson K., 1999 - Models for precision application of lime. In J.V. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture '99*, Part 1. Papers presented at the 2nd European Conference on Precision Agriculture. 11-15 July, 1999, Odense, Denmark. Sheffield Academic Press Ltd., Sheffield, UK, pp. 175-180.
- Helyar K.R., Porter W.M., 1989 - Soil acidification, its measurements and the processes involved. In A.D. Robson (Ed.), *Soil Acidity and Plant growth*. Academic Press, Australia, pp. 61-99.
- Huang J.W., Grunes D.L., Kochian L.V., 1995 - Aluminium and calcium transport interactions in intact roots and root plasmalemma vesicles from aluminium-sensitive and tolerant wheat cultivars. In R.A. Date, N.J. Grundon, G.E. Rayment and M.E. Probert (Eds.), *Plant and Soil Interactions at Low pH*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. 12-16 September, 1993, Brisbane, Australia. Kluwer Academic Publishers, pp. 297-301.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989 - An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, USA.
- Kamprath E.J., 1970 - Exchangeable aluminium as a criteria for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceeding*. 34: 252-254.
- Laveau G., Juste C., 1982 - Contribution à la mise au point d'une méthode de détermination rapide du besoin en chaux des sols sableux des Landes. *C.R. Acad. d'agriculture de France*, 68, No. 8, pp. 610-616
- Linsley C.M., Bauer F.C., 1929 - Test your soil for acidity. Circular No. 346, University of Illinois, USA.
- McLean E.O., 1978. Principles underlying the practice of determining lime-requirements of acid soils by use of buffer methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 9(8): 699-715.
- Magdoff F.R., Bartlett J., 1985 - Soil pH buffering revisited. *Soil Science Society American Journal*, 49: 145-148.
- Massart D.L., Vandeginste B.G.M., Deming S.N., Michotte Y., Kaufman L., 1989 - *Chemometrics: a textbook*. Data Handling in Science and Technology. Vol 2., B.G.M. Vandeginste and L. Kaufman (Eds.)
- Mehlich A., 1976 - New buffer pH method for rapid estimation of exchangeable acidity and files requirement of soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 7: 637-652.
- Oates K.M., Kamprath E.J., 1983 - Soil acidity and liming: I. Effect of extracting solution cation and pH on the removal of aluminium from acid soils. *Soil Science Society of America Journal* 47, 686-689.
- Pionke H.B., Corey R.B., Schulte E.E., 1968 - Contributions of soil factors to lime requirement and lime requirement tests. *Soil Science Society of America Journal* 32: 113-117.
- Robson A.D., Abbot L.K., 1989 - The effect of soil acidity on microbial activity in soils. *Soil acidity and plant growth; academic press*. Marrickville, Australia. Pp. 139-165.
- Shoemaker H.E., McLean E.O., Pratt P.F., 1961 - Buffer methods for determining the lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminium. *Soil Science Society of America Proceedings* 25, 274-277.
- Tran T.S., van Lierop W., 1981 - Evaluation and improvement of buffer-pH lime requirement methods. *Soil Science*, 131: 178-188.
- Tran T.S., van Lierop W., 1982 - Lime requirement determination for attaining pH 5.5 and 6.0 of coarse textured soils using buffer-pH methods. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 1008-1014.
- Van Breemen N., 1991 - Soil acidification and alkalization. In B. Ulrich and M.E. Sumner (Eds.), *Soil Acidity*. Springer-Verlag, Germany.
- Van Raij B., 1991 - Fertility of acid soils. In R.J. Wright, V.C. Baligar and R.P. Murrman (Eds.), *Plant and Soil Interactions at Low pH*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. 24-29 June, 1990, Beckley, WV, USA. Kluwer Academic Publishers, pp. 159-167.
- Viscarra Rossel R., McBratney A.B., 1998 - Soil chemical analytical accuracy and costs: implications from Precision Agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 765-775.
- Viscarra Rossel R., McBratney A.B. 2000 - A two-factor empirical deterministic response surface calibration model for site-specific predictions of lime requirement. *Precision Agriculture*, 2, 163-178.
- Viscarra Rossel R., McBratney A.B. 2001 - A response-surface calibration model for rapid and versatile site-specific lime-requirement predictions in south-east

- tern Australia. Australian Journal Soil Research, 39: 185-201.
- Viscarra Rossel R., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J. 2001 - Proximal Sensing of soil pH and lime requirement by mid infrared diffuse reflectance spectroscopy. In G. Grenier and S. Blackmore (Eds), ECPA 2001, Third European Conference on Precision Agriculture, Vol. 1, Agro Montpellier, pp. 497-508.
- von Uexküll H.R., Mutert E., 1995 - Global extent, development and economic impact of acid soils. In R.A. Date, N.J. Grundon, G.E. Rayment and M.E. Probert (Eds.), Plant and Soil Interactions at Low pH. Proceedings of the 3rd International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. 12-16 September, 1993, Brisbane, Australia. Kluwer Academic Publishers, pp. 5-19.
- Walter C., Schwartz C., Claudot B., Bouedo Th., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terr réalisées entre, 1990 et, 1994. Etude et Gestion des sols 4 : 205-220.
- Webster R., Oliver M.A., 1990 - Statistic methods in soil and land resource survey. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Woodruff, C.M., 1948 - Testing soils for lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. Soil Science, 66: 53-63.

