

Le cuivre extrait à l'EDTA dans les sols de France

Probabilités de carences et de toxicités selon la BDAT

D. Baize⁽¹⁾, N. Saby⁽¹⁾ et C. Walter⁽²⁾

(1) INRA, Science du Sol et INFOSOL, BP 20619, 45166 Olivet Cedex

(2) Agrocampus-INRA Rennes, UMR SAS, 65 rue de St Brieuc, CS84215, 35042 Rennes

RÉSUMÉ

L'analyse du cuivre extrait par l'action d'une solution d'acétate d'ammonium en présence d'EDTA (Cu_{EDTA}) sur un échantillon de terre est faite régulièrement en France. Ces analyses sont demandées par les agriculteurs pour juger des risques de carences en zones pédogéochimiquement sensibles ou pour estimer l'état de contamination des sols sous vignes.

Grâce aux 174 000 résultats d'analyse rassemblés dans la "base de données des analyses de terre" (BDAT), des cartes ont pu être réalisées, par cantons, pour juger de la répartition des teneurs faibles, supposées signaler des dangers de carences pour les cultures les plus sensibles comme les céréales. D'autres cartes présentent la localisation des teneurs relativement élevées, faisant apparaître nettement les grands secteurs viticoles.

Des indices de pression anthropique ont été définis pour la viticulture (IPAV) et pour l'élevage porcin (IPAP) puis calculés par cantons. Les valeurs de ces indices ont été confrontées à des valeurs statistiques de Cu_{EDTA} (quartiles supérieurs) dans deux régions l'une viticole (Bordelais et aire d'appellation Cognac), l'autre pratiquant l'élevage porcin intensif (sept départements du Grand Ouest). Les corrélations sont bien meilleures pour les indices IPAV que pour les indices IPAP.

La BDAT, malgré ses imperfections (vastes secteurs non renseignés), permet d'avoir une vue d'ensemble sur l'état des sols français en ce qui concerne l'oligo-élément cuivre. Les secteurs où se situent les plus fortes probabilités de carences sont clairement localisés. On constate que les sols agricoles de Bretagne ne connaissent plus ces risques tout en demeurant encore fort éloignés des niveaux admis comme seuils de toxicité.

Mots clés

Cuivre EDTA, sols, BDAT, carence, toxicité, France.

SUMMARY**EDTA-EXTRACTED COPPER IN FRENCH SOILS:****Probability of deficiency and toxicity according to the national soil-test database**

The EDTA soil tests for copper (Cu_{EDTA}) are commonly used in France for assessing "available" copper. These soil tests are performed at farmers' request in order to evaluate the risk of copper deficiency in pedo-geochemically sensitive areas or to evaluate the level of contamination of the vineyards soils.

Using the 174,000 results of Cu_{EDTA} soil test gathered in the national soil test database (in French BDAT) the repartition of low values at the administrative cantonal level was mapped. These low values ($< 2 \text{ mg kg}^{-1}$) are supposed to indicate a high risk of deficiency for the more sensitive crops such as cereals. Quite high values ($> 60 \text{ mg kg}^{-1}$) were also mapped, pointing up clearly wine-growing areas.

Indicators of anthropogenic pressures have been defined for vineyards (IPAV) and for pig farming (IPAP) and then calculated at the cantonal level. The values of these indicators were compared for each canton with the upper quartiles of Cu_{EDTA} . This comparison was performed for two regions, a wine-growing area (AOC Bordeaux and Cognac) and Brittany, a region with intensive pig farming and slurry spraying. These comparisons showed better correlation for IPAV indicator than those for IPAP.

Taking into account sampling and statistical bias, the database BDAT appears a relevant tool for soil properties monitoring such as the available copper. The areas with higher probability of copper deficiency are clearly located. The results exhibit that the agricultural soils of Brittany do not know any more these risks while remaining still far from the levels admitted as thresholds of toxicity.

Key-words

EDTA extracted-copper, soils, copper, deficiency, toxicity, France.

RESUMEN**EL COBRE EXTRAÍDO CON EDTA EN LOS SUELOS DE FRANCIA : Probabilidades de falta y de toxicidad según la BDAT**

Se hace regularmente en Francia, el análisis del cobre extraído por la acción del acetato de amonio en presencia de EDTA (Cu_{EDTA}) sobre una muestra de tierra. Los agricultores piden estos análisis para jugar del riesgo de falta en zonas pedogeoquímicamente sensibles o para estimar el estado de contaminación de los suelos bajo viñas.

Gracias a los 174000 resultados reunidos en la "base de datos de los análisis de tierra" (BDAT) mapas fueron realizadas, por cantones, para jugar de la repartición de los contenidos ligeros, supuestos indicar peligros de faltas para los cultivos los más sensibles como los cereales. Otros mapas presentan la localización de los contenidos relativamente elevados que hacen aparecer los grandes sectores vitícolas.

Se definieron índices de presión antrópica para la viticultura (IPAV) y para la ganadería porcina (IPAP) luego calculados por cantones. Los valores de estos índices fueron confrontados a valores estadísticos de (cuartillas superiores) en dos regiones, una vitícola (de Burdeos y del área de apelación Cognac) la otra que practica la ganadería porcina intensiva (siete departamentos del Gran Oeste). Las correlaciones mucho mejores para los índices IPAV que para los índices IPAP.

La BDAT, a pesar de sus imperfecciones (inmensos sectores sin datos), permite tener una vista de conjunto sobre el estado de los suelos francés que concierne el oligoelemento cobre. Los sectores donde se sitúan las más fuertes probabilidades de faltas son claramente localizados. Se constata que los suelos agrícolas de Bretaña no conocen más estos riesgos pero se quedan alejados de los niveles admitidos como umbrales de toxicidad.

Palabras clave

Cobre EDTA, suelos, BDAT, toxicidad, Francia.

Les études relatives aux oligo-éléments et aux métaux traces ont débuté à l'occasion de constats de carences juste après la dernière guerre. Aujourd'hui, les travaux de recherche sont plutôt orientés vers les éventuels excès de ces mêmes éléments, les dangers potentiels pour notre chaîne alimentaire et les toxicités en terrains pollués. Des objectifs de rendement en moyenne très élevés ou le recours à des cultivars très productifs mais plus sensibles aux carences ou sub-carences, nécessitent cependant une surveillance de l'état chimique des sols, non seulement pour les éléments majeurs (N, P, K), mais aussi pour les oligo-éléments.

D'après Thevenet (1985), les premières carences en cuivre ont été signalées sur céréales en France dans les années 1950 (Coppenet en Bretagne, Redlich dans les Landes de Gascogne). D'autres ont ensuite été mises en évidence dans les années 1960 (Duval en Basse Normandie) et dans les années 1970 (Thevenet en Sologne et Pays Fort). Par la suite se sont manifestés des cas de plus en plus fréquents en particulier en sols calcaires ("terres de groies" du Poitou-Charentes, sols argileux et calcaires de l'Est, terres crayeuses de Champagne) ainsi que dans certains limons sableux ("terres de brandes" et "bornais" de la région Centre, Sologne bourbonnaise). Cette augmentation aurait été essentiellement en relation avec la suppression d'autres facteurs limitants et avec l'augmentation des besoins liée à l'accroissement des rendements. Les céréales (sauf le seigle) sont particulièrement sensibles à la carence en cuivre.

Cet article est consacré à la présentation de quelques traitements réalisés sur des analyses relatives au cuivre rassemblées dans la "base de données d'analyses de terre" (BDAT). Dans cette base, il n'y a pas de données de cuivre total ou pseudo-total (pour cela voir Baize *et al.*, 2006 ; site <http://etm.oreans.inra.fr>) mais uniquement des résultats d'analyses du cuivre extrait par une solution contenant de l'EDTA (codé Cu_{EDTA}), analyses faites couramment dans de nombreux laboratoires agronomiques à la demande des agriculteurs pour la gestion de leurs parcelles. Seront envisagées successivement les probabilités de carences puis l'existence de teneurs très fortes pouvant constituer un danger de toxicité.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation de la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT)

La BDAT regroupe des résultats d'analyses d'échantillons de terre provenant d'horizons de surface de sols agricoles (Saby *et al.*, 2004). Les paramètres renseignés sont ceux demandés par les agriculteurs pour la gestion de leurs parcelles. La répartition des lieux de prélèvement n'est donc pas maîtrisée et la nature des déterminations est très variable d'un échantillon à un autre. Parmi les oligo-éléments les mieux suivis, figurent Cu, Zn, Mn, B et Fe.

Chaque prélèvement est localisé par la commune de la parcelle d'origine de l'échantillon, avec néanmoins un risque de confusion avec la commune où réside l'agriculteur. La commune est ainsi l'unité territoriale de base de cette base de données. Pour cette étude, nous avons travaillé par cantons, territoires assez grands pour disposer d'un nombre suffisant de valeurs et y calculer des statistiques, mais pouvant être pédologiquement fort hétérogènes. Ont été éliminés des traitements les cantons pour lesquels n'étaient disponibles que 10 valeurs ou moins.

Sur 42 laboratoires d'analyses agréés en France et à la date d'écriture de cet article, 26 ont accepté de collaborer en fournissant leurs fichiers de résultats. La *figure 1* présente le nombre d'analyses de Cu_{EDTA} disponibles par année de 1990 à 2004.

Nous n'avons pas jugé utile de travailler en diachronique sur trois populations quinquennales car nous n'aurions pu comparer valablement que les cantons suffisamment renseignés pour ces trois périodes. Nous n'avons pas travaillé non plus sur l'ensemble des données disponibles toutes années confondues, afin d'éviter le phénomène de retour sur une même parcelle.

Pour la présente étude, nous avons traité seulement les analyses réalisées sur la période 1995-2000 soit 174 826 analyses disponibles pour 6 années.

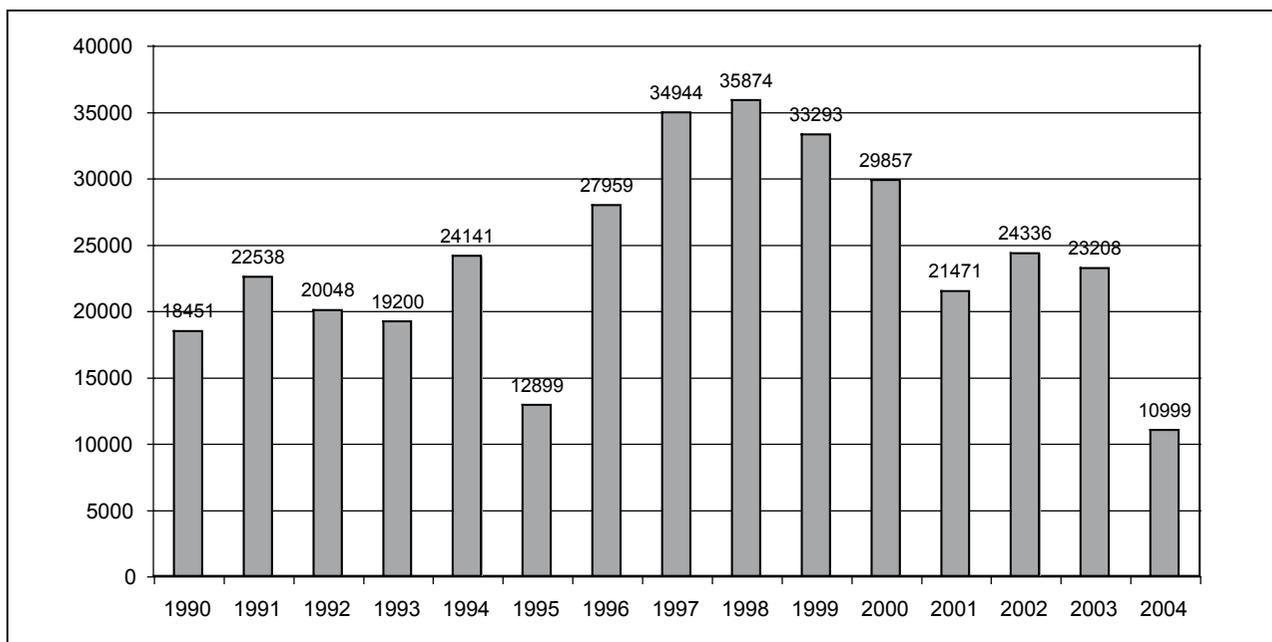
Le cuivre extrait par l'EDTA

Pour évaluer la teneur en cuivre "assimilable" dans les sols, c'est l'extraction des formes solubles par une solution mixte, ajustée à pH 7, d'acétate d'ammonium 1,0 mol.l⁻¹ en présence d'EDTA (norme - NF X31-120 de novembre 1992), qui est réalisée désormais en routine par les laboratoires d'analyses agronomiques. Selon cette norme, la méthode est censée "permettre d'estimer la quantité des oligo-éléments présents dans un sol agricole, susceptibles d'être prélevés par les végétaux qui y sont implantés".

L'intérêt des complexants comme l'EDTA, est de pouvoir mobiliser les métaux déjà complexés du sol (notamment par les matières organiques) et aussi de dissoudre les oxy-hydroxydes fixateurs des éléments en traces qui se trouvent ainsi libérés (Juste, 1983). L'EDTA est donc supposé extraire les formes échangeables du cuivre, celles liées aux matières organiques et celles adsorbées sur ou co-précipitées avec les oxydes de fer et de manganèse (Flores Velez, 1996 ; Chaignon, 2001). Pour Coïc et Coppenet (1989), les quantités de cuivre extraites par l'EDTA sont supérieures à celles des formes échangeables (extraites par des sels neutres) mais restent en bonne corrélation avec le potentiel d'offre du sol.

Choix d'un seuil pour estimer les probabilités de carence pour les cultures sensibles

Dans le passé, le test à l'EDTA a permis de prévoir la déficience en cuivre sur de nombreux essais au champ en différents pays (Loué, 1993). Les teneurs seuils utilisées par les agronomes allaient de 0,75 mg kg⁻¹ (Australie) à 1,6 mg kg⁻¹ (Angleterre - Oliver *et al.*,

Figure 1 - Nombre d'analyses de Cu_{EDTA} disponibles par année dans la BDAT.**Figure 1** - Number of results of Cu_{EDTA} soil tests per year which are available in the Soil-test database.

1996 cité par McGrath, 1997). En Écosse, un seuil critique de 1 mg kg^{-1} a été adopté pour les céréales et de 3 mg kg^{-1} pour les pâturages afin d'obtenir des fourrages non carencés. A la station INRA de Quimper, la grille suivante était utilisée :

- < 1 mg kg^{-1} = "sol très pauvre"
- de 1 à $1,4 \text{ mg kg}^{-1}$ = "sol pauvre"
- de $1,4$ à $1,9 \text{ mg kg}^{-1}$ = "teneur faible".

Pour cette étude, nous avons retenu finalement le seuil de 2 mg kg^{-1} en dessous duquel on peut considérer qu'il y a une forte probabilité de carences liées au sol. Il est évident qu'un tel seuil, unique pour toutes les situations pédoclimatiques françaises est parfaitement contestable. N'oublions pas également la difficulté d'estimer une phytodisponibilité "au champ" avec un tel test sur échantillon de sol séché et tamisé à 2 mm (Juste, 1983). La même critique peut d'ailleurs être formulée pour tous les tests agronomiques classiques dont ceux appliqués au phosphore ou au potassium dits "assimilables".

Indicateurs de pression anthropique

Afin d'estimer l'impact de la viticulture et des élevages porcins qui s'avèrent être les deux principales sources d'apports de cuivre sur les sols français (Robert et Juste, 1997), nous avons fait appel à des données cantonales du Recensement Général de l'Agriculture (RGA) et utilisé deux indicateurs :

Indice viticulture (IPAV) : ratio de la surface exploitée en vignoble, exprimée en hectares, rapportée à la surface agricole utile

(SAU) en hectares. Nous avons retenu les données disponibles les plus anciennes (RGA de 1970), car l'occupation du sol peut changer (arrachage récent des vignes en certains secteurs du Languedoc), mais le cuivre reste et a tendance à s'accumuler.

Indice pour l'élevage porcin (IPAP) : ratio du nombre de porcs (année 2000 - somme des porcs, porcelets, verrats et truies mères) rapporté à la SAU (même année) exprimée en hectares.

Ces deux indicateurs ont été confrontés aux quartiles supérieurs du cuivre extrait à l'EDTA calculés sur la période 1995-2000 pour les cantons disposant de plus de 10 mesures. L'utilisation des quartiles supérieurs permet de mieux appréhender le niveau des teneurs des parcelles les plus contaminées. La mise en œuvre de cette confrontation a d'abord été effectuée sur les 1617 cantons utilisables à l'échelle nationale. Au vu des résultats, très décevants, la confrontation a été limitée aux cantons de deux zones très typées, l'une connue pour son vignoble réputé et ancien, l'autre pour l'importance de l'élevage porcin dans son économie.

L'étude utilisant l'indice IPAV a été restreinte aux départements de la Charente et de la Charente maritime (appellations Cognac et Pineau) et à la Gironde (vins de Bordeaux). En effet, ces trois départements montrent d'une part une forte proportion de la SAU en vignes et d'autre part, un nombre suffisant de déterminations de Cu_{EDTA} .

En ce qui concerne l'indicateur pour l'élevage porcin IPAP, nous avons restreint l'étude à sept départements : Côtes d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine, Morbihan, Maine-et-Loire, Mayenne et

Sarthe. Ces départements du Grand Ouest affichent en effet un nombre de porcs rapporté à la SAU le plus élevé de France.

Pour chaque groupe de cantons, le coefficient de corrélation a été calculé et le graphique de dispersion des données a été tracé afin de quantifier statistiquement le lien existant entre l'indicateur et les quartiles supérieurs (P75) calculés par cantons de la teneur en Cu_{EDTA} .

RÉSULTATS

Carte du nombre d'analyses disponibles par canton (figure 2)

Dans de nombreux secteurs, le nombre d'analyses de Cu_{EDTA} excède 250 par canton pour culminer à plus de 1100 dans cinq cantons du Finistère. La grande abondance de cette détermination peut avoir deux causes (non exclusives) : une tradition locale de danger de carences suscitant une surveillance systématique (cas du Finistère et du Morbihan, de la Champagne crayeuse, des zones de "bornais" et de "limons") et une politique commerciale des laboratoires poussant à faire réaliser cette analyse (par ex. Loiret).

A l'inverse, de très grands territoires apparaissent avec très peu d'analyses (moins de 10 par canton) : il s'agit des départements du Sud-est et du Massif central, du Nord et du Pas de Calais, de l'Île de France et, par exemple, de l'Hérault et de la Sarthe. Ces absences sont liées, en grande partie, à la non collaboration de certains laboratoires d'analyses au cours de la période 1995-2000. Ce biais devra être bien pris en compte pour l'interprétation des autres cartes présentées ci-dessous.

Au total, nous disposons de plus de 174.000 mesures de Cu_{EDTA} . La médiane s'établit à $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$ tandis que les 75^{es}, 90^{es} et 95^{es} percentiles valent respectivement 3,75 - 8,10 et $22,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (tableau 1).

Carte des pourcentages d'analyses de $Cu_{EDTA} < 2 \text{ mg kg}^{-1}$ (figure 3)

L'indicateur retenu et cartographié est le rapport : nombre de valeurs $< 2 \text{ mg kg}^{-1}$ / nombre d'analyses disponibles. C'est donc une estimation de l'abondance des valeurs considérées comme faibles, exprimée en pourcentage. La carte présente en orange les cantons pour lesquels ce rapport vaut entre 75 et 90 % et en rouge ceux où ce rapport excède 90 %. Apparaissent en orange ou en rouge :

- un grand secteur au point de contact de la Vienne, de l'Indre et du Loir-et-Cher ;
- des proportions importantes des départements du Loiret, de l'Yonne, de l'Aube, de la Haute Saône, du Jura, de l'Ain et de l'Isère ;

- la quasi-totalité de la Marne et de la Côte d'Or.

En première approximation, ces secteurs où il peut y avoir souvent des problèmes de carence cuprique sur cultures sensibles correspondent :

- 1°) aux "terres de brandes" et aux sols ingrats de la Brenne (Est de la Vienne, Ouest de l'Indre) ;
- 2°) à des "limons battants" pauvres en éléments traces métalliques (Boischaut nord, Est du Loiret, Nord de l'Yonne) ;
- 3°) aux sols crayeux de la Marne et de l'Aube ;
- 4°) aux sols des plateaux calcaires jurassiques de Côte d'Or, de l'Aube, de la Haute Saône ;
- 5°) aux sols sableux de Sologne.

En revanche, la Manche, l'Ille-et-Vilaine, les Côtes d'Armor, le Finistère et la partie nord du Morbihan apparaissent plutôt en vert (moins de 50 %) ainsi que la Gironde, les Landes, le Lot-et-Garonne, les Pyrénées Atlantiques et le Maine-et-Loire. Cela peut être expliqué par la correction des déficiences par des apports volontaires ou involontaires d'oligo-éléments.

Carte du ratio Cu_{EDTA} / MO (figure 4)

Tous les auteurs insistent sur la nécessaire prise en compte des teneurs en matières organiques pour mieux interpréter le test du cuivre extrait à l'EDTA (Coïc et Coppenet, 1989 ; Laurent *et al.*, 1986). En présence de matières organiques, très peu de cuivre reste en solution car il est surtout complexé avec ces matières organiques lesquelles ont d'autant plus d'effet que le sol contient

Tableau 1 - Données statistiques relatives aux teneurs en Cu_{EDTA} disponibles sur la période 1995-2000 (exprimées en mg kg^{-1}).

Table 1 - Statistical description of the content of Cu_{EDTA} which are available in the database for the 1995 to 2000 period (in mg kg^{-1}).

Nombre total de valeurs	174.826
Vibrisse inférieure	0,01
1 ^{er} décile (P10)	0,96
1 ^{er} quartile (P25)	1,40
Médiane (P50)	2,21
3 ^e quartile (P75)	3,75
9 ^e décile (P90)	8,10
P95	22,9
Vibrisse supérieure	7,27
Nombre d'outliers	19.773
Aplatissement	97,7
Dissymétrie	8,2

moins d'argile et d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse (Decroux, 1990).

Thévenet (1985) et Laurent *et al.* (1986) constatent qu'en sols crayeux la prise en compte du taux de matières organiques (sous la forme d'un ratio Cu_{EDTA} / MO) améliore la prédiction d'un effet positif d'apports de cuivre sur les rendements. Pour la station INRA de Laon, le seuil de carence varierait de 0,8 à 1,2 selon la teneur en matières organiques (cité par Loué, 1993). Pour Coïc et Coppenet (1989), pour les sols du Massif armoricain, on considérerait qu'il y avait carence :

- si $Cu_{EDTA} \leq 2$ ppm (sols dont $MO \leq 7$ %)
- si $Cu_{EDTA} < 1,5$ ppm (sols dont $MO > 7$ %)

Mais aucun auteur ne propose véritablement une (ou des) valeur(s)-seuil pour ce ratio Cu_{EDTA} / MO .

Une troisième carte a été élaborée (figure 4), basée sur la valeur du ratio Cu_{EDTA} (exprimé en $mg\ kg^{-1}$) / taux de matières organiques (exprimé en %).

- 30 254 analyses montrent un ratio $< 0,4$ soit 18,6 % des 162 432 valeurs disponibles.
- 17 255 analyses montrent un ratio $< 0,3$ soit 10,6 % des 162 432 valeurs disponibles.

Cette carte ressemble assez à la précédente (figure 3) mais on voit que de grandes parties de la Bretagne, de la Basse Normandie et de la Charente maritime passent à l'orange (parfois au rouge) ! Dans ces secteurs, il y aurait des sols montrant à la fois des valeurs de Cu_{EDTA} plutôt faibles et des teneurs plutôt fortes en matières organiques. Il en résulterait donc une forte probabilité de carence pour les cultures sensibles.

Carte de localisation des teneurs élevées (figure 5)

Pour Coïc et Coppenet (1989), le risque de phytotoxicité par le cuivre n'apparaîtrait que pour des valeurs de $Cu_{EDTA} > 120\ mg\ kg^{-1}$. Coppenet *et al.* (1993) dans le contexte des sols bretons et sous la pression des épandages de lisiers ont proposé un seuil de toxicité supplémentaire quand $[Cu_{EDTA} + Zn_{EDTA}] > 120\ mg\ kg^{-1}$.

Pour les sols du vignoble du Bordelais, il semble qu'un "seuil de risque toxicité" soit utilisé par certains laboratoires d'analyses pour l'interprétation des teneurs en cuivre extrait à l'EDTA. Ce seuil a été fixé à $50\ mg\ kg^{-1}$ pour une texture sableuse ; à $80\ mg\ kg^{-1}$ pour une texture limoneuse et à $100\ mg\ kg^{-1}$ pour une texture argileuse. Il n'a pas été possible de savoir sur quels travaux ces seuils se fondaient.

Pour élaborer cette carte des "teneurs élevées", une valeur de $Cu_{EDTA} = 60\ mg\ kg^{-1}$ a été choisie arbitrairement, située à mi-chemin du seuil présumé de toxicité (si l'on ne prend pas en compte également le zinc). C'est déjà une valeur très élevée.

Il y a 1018 valeurs supérieures à $110\ mg\ kg^{-1}$ (soit 0,6 %) et encore 819 valeurs $> 120\ mg\ kg^{-1}$ (soit 0,5 %).

3358 teneurs excèdent $60\ mg\ kg^{-1}$ (soit 1,9 % des mesures disponibles à l'échelon national). Elles se concentrent, pour la plupart, dans une centaine de cantons viticoles qui forment un grand ensemble correspondant au Bordelais et à l'aire des crus du Cognac. D'autres ensembles plus petits de cantons se situent en Beaujolais, en Mâconnais, en Côte d'Or (Côte viticole) et en Touraine entre Tours et Blois. Quelques cantons isolés se localisent dans le Haut Rhin, près d'Épernay en Champagne, près d'Orléans dans le Loiret. À l'évidence, les traitements répétés des vignes (plus rarement des vergers) à la bouillie bordelaise sont responsables de ces valeurs élevées. En revanche, la carte est quasiment muette en ce qui concerne les vignobles du Languedoc et du Roussillon (absence de données).

On notera l'absence de valeurs $> 60\ mg\ kg^{-1}$ pour les quatre départements bretons (à l'exception d'un unique canton des Côtes d'Armor), malgré les épandages intensifs de lisiers de porcs. Ceci est surprenant et semble contradictoire avec ce qui a été écrit antérieurement (Rainelli, 1996) : "Aujourd'hui, on constate que 30 % des échantillons de sols analysés en Bretagne dépassent la limite des 120 ppm". À la lecture attentive de cet article, on ne sait pas de quel paramètre il s'agit. Or, en ce qui concerne les sols acides de Bretagne, Coppenet *et al.* (1993) sont formels : une phytotoxicité est à craindre dès que $Cu_{EDTA} > 120\ mg\ kg^{-1}$, ou que $Zn_{EDTA} > 120\ mg\ kg^{-1}$, ou encore que la somme $[Cu_{EDTA} + Zn_{EDTA}]$ excède ce même seuil.

Pour en avoir le cœur net, une interrogation supplémentaire de la BDAT sur ces quatre mêmes départements a été réalisée, impliquant à la fois Cu_{EDTA} et Zn_{EDTA} . Elle a montré que, sur 36.635 échantillons analysés dans la période 1995-2000, il n'y a que 14 cas où la somme $[Cu_{EDTA} + Zn_{EDTA}]$ excède le seuil de $120\ mg\ kg^{-1}$ (aucun cas dans la période 1990-1995).

Une anomalie apparaît dans le département du Pas de Calais, localisée dans le canton de Lumbres et la commune d'Elnes. 11 mesures ont été faites en l'an 2000 dans le cadre d'une seule et même étude. La médiane vaut $49\ mg\ kg^{-1}$ et deux valeurs excèdent $60\ mg\ kg^{-1}$. Malgré une enquête auprès des professionnels locaux, il a été impossible de connaître la cause de ces fortes valeurs (contaminations industrielles, épandages d'effluents agro-alimentaires, porcheries ?). Il est même possible qu'il s'agisse d'une erreur, des teneurs totales ayant pu être confondues avec des quantités de cuivre extraites à l'EDTA.

Comparaison avec deux indicateurs de pression anthropique

L'indicateur pour la viticulture IPAV a été confronté aux troisièmes quartiles (P75) sur un ensemble de 126 cantons sélectionnés (figure 6). Le coefficient de corrélation calculé s'élève à 0,74. Il montre l'existence d'un effet de la viticulture sur les teneurs en Cuivre extrait à l'EDTA.

Figure 2 - Nombre d'analyses de Cu_{EDTA} disponibles par cantons pour la période 1995-2000.

Figure 2 - Map of the number of results of Cu_{EDTA} soil tests per canton for the 1995 to 2000 period.

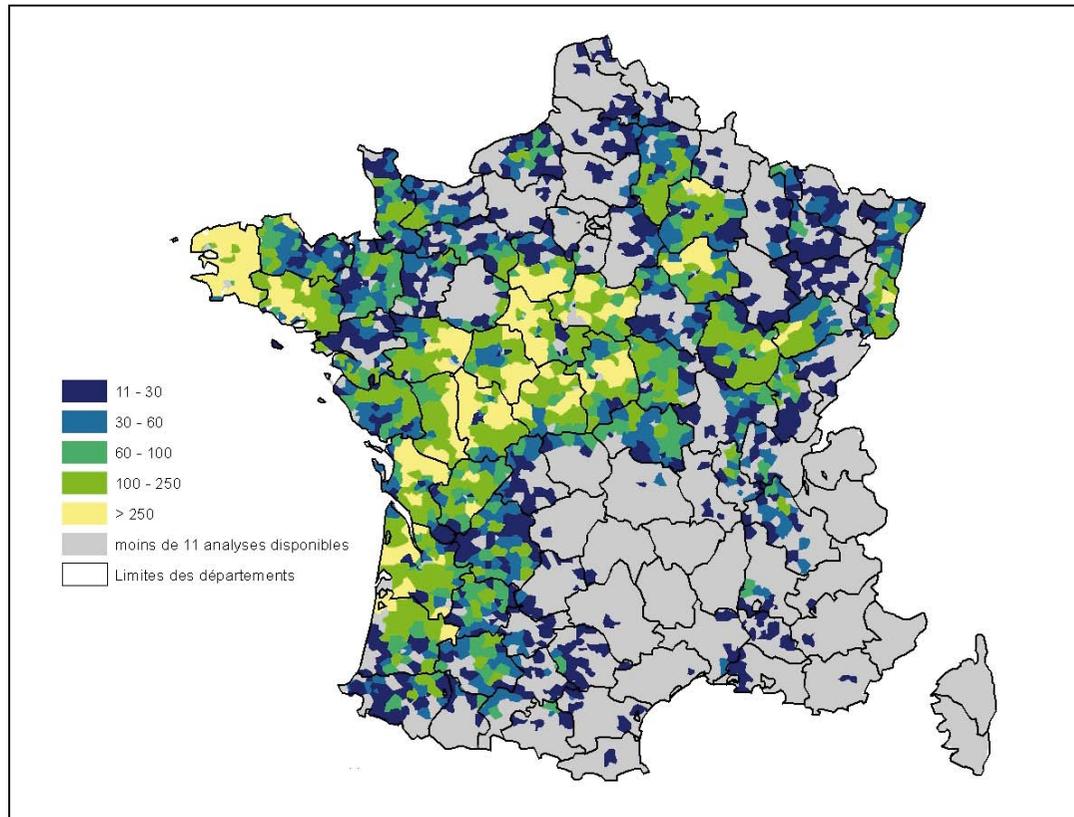


Figure 3 - Pourcentage de valeurs de Cu_{EDTA} $< 2 \text{ mg kg}^{-1}$ par rapport au nombre d'analyses disponibles (par cantons). Possibilité de carences en cuivre.

Figure 3 - Map of the percentage per canton of the number of Cu_{EDTA} $< 2 \text{ mg kg}^{-1}$ in comparison with the number of results of Cu_{EDTA} soil tests. Possible differences in copper.

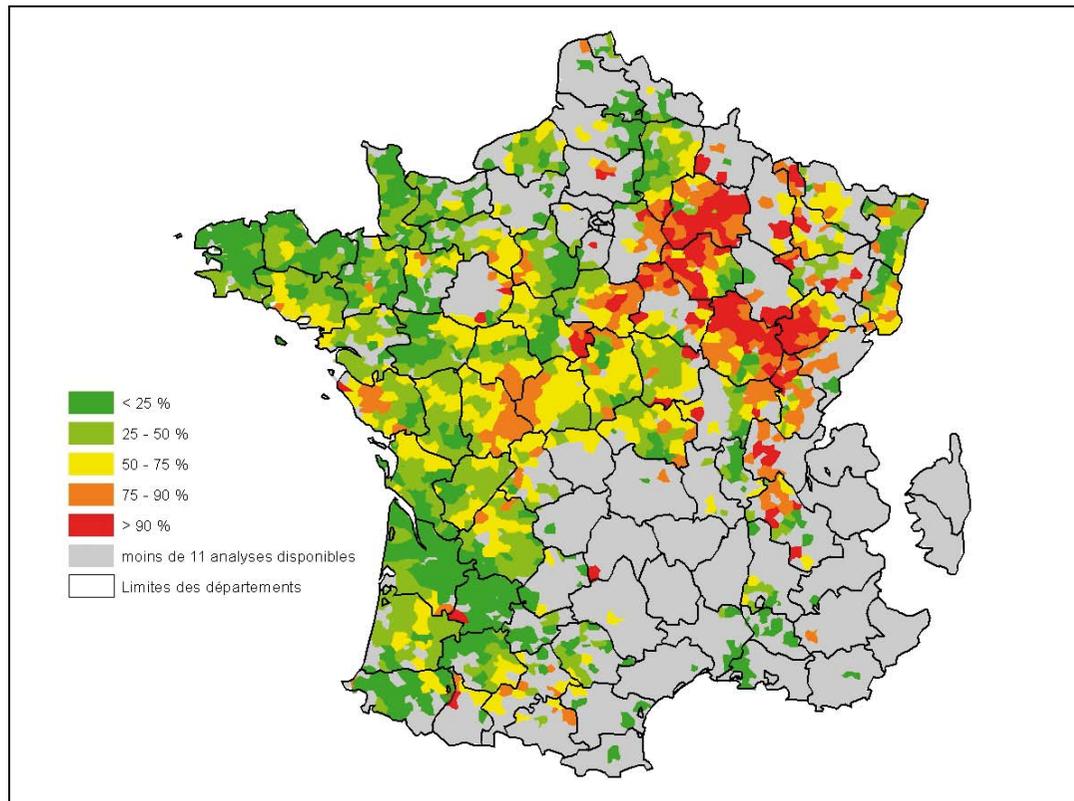


Figure 4 - Médiane cantonale du ratio entre la valeur de Cu_{EDTA} et la teneur en matières organiques.

Figure 4 - Map of the median of the Cu_{EDTA} content to organic matter content ratio, calculated per canton.

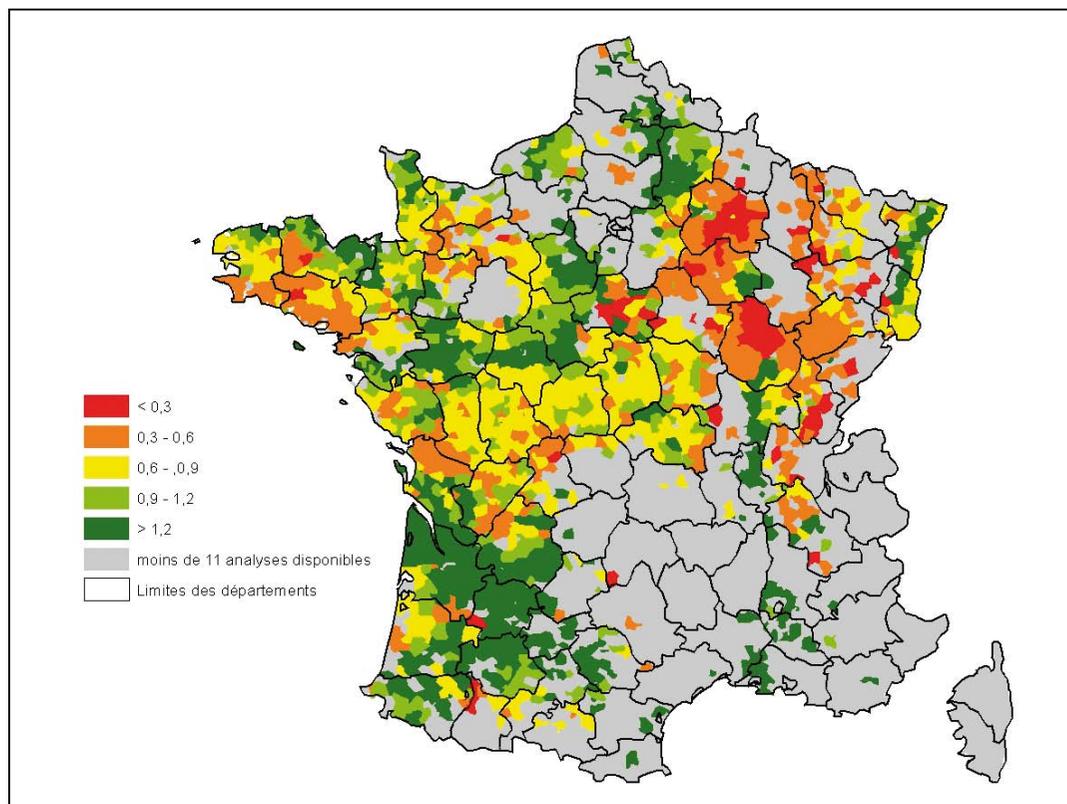
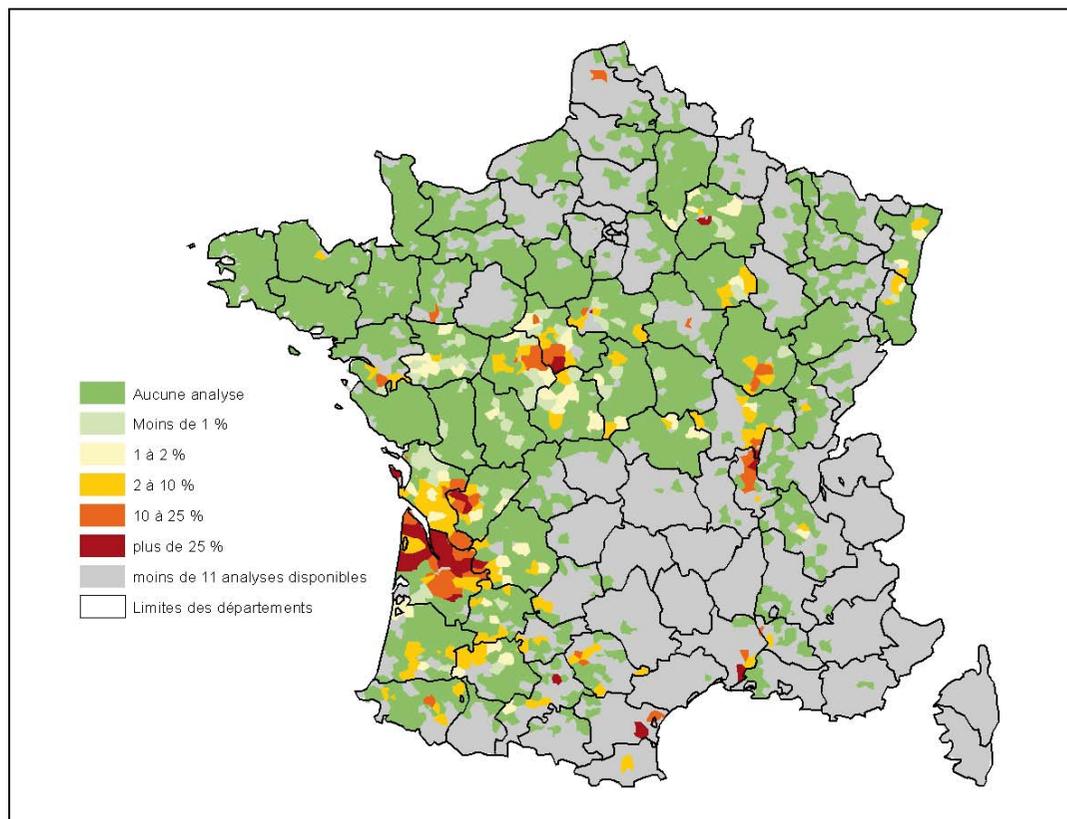


Figure 5 - Pourcentage des valeurs de Cu_{EDTA} > 60 mg kg^{-1} par rapport au nombre d'analyses disponibles (par cantons).

Figure 5 - Map of the percentage per canton of the number of Cu_{EDTA} > 60 mg kg^{-1} in comparison with the number of results of Cu_{EDTA} soil tests.



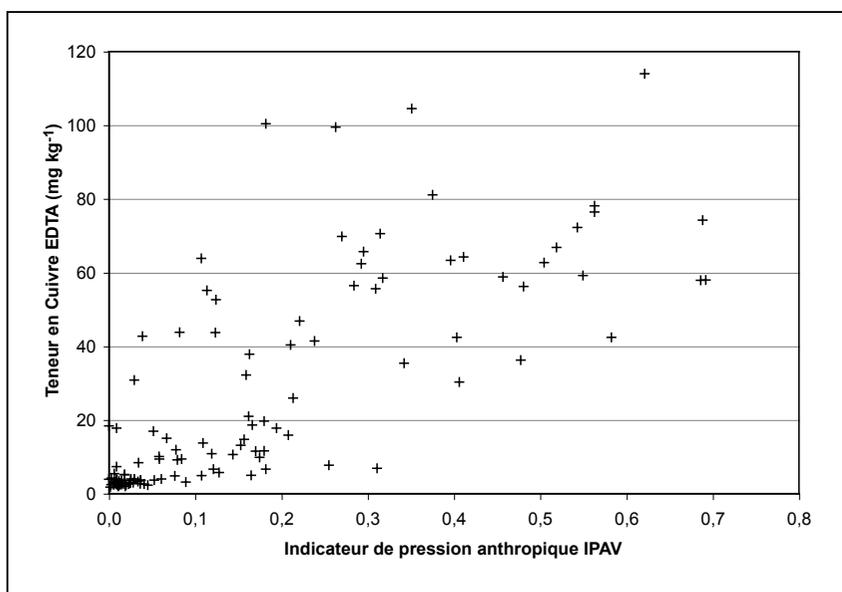


Figure 6 - Quartiles supérieurs de la teneur en Cu_{EDTA} calculés par cantons sur la période 1995-2000 en fonction du ratio entre les surfaces exploitées en vignobles et la SAU (sources RGA 1970). Le calcul a été fait pour 126 cantons des départements 16, 17 et 33.

Figure 6 - Upper quartile of the Cu_{EDTA} content calculated per canton over the 1995 to 2000 period regarding the ratio between the vineyards area to the usable agricultural area. The statistics were performed for 126 cantons (about 23,000 km²).

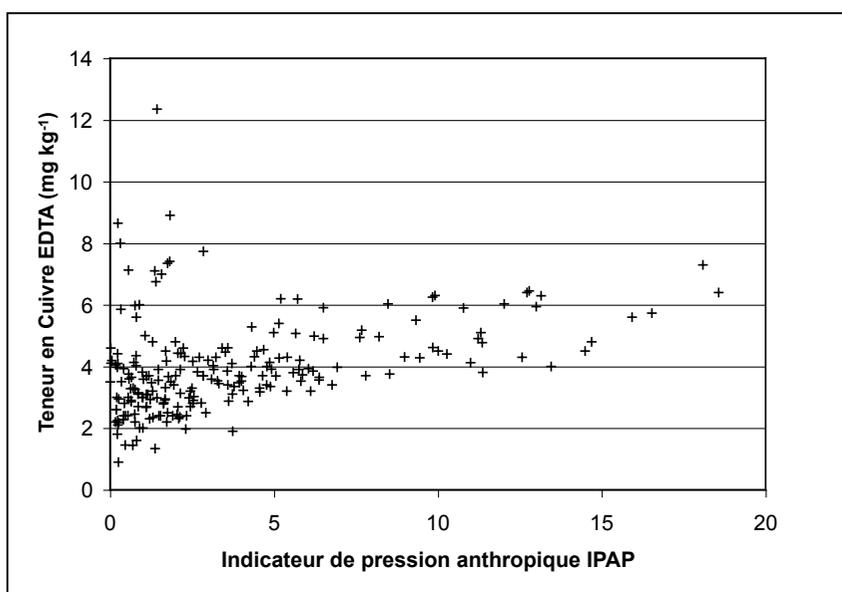


Figure 7 - Quartiles supérieurs de la teneur en Cu_{EDTA} calculés par cantons sur la période 1995-2000 en fonction du ratio entre le nombre de porcs du canton et la SAU (sources RGA 2000). Le calcul a été fait pour 220 cantons des départements bretons (22, 29, 35 et 56) ainsi que des départements 49, 53 et 72.

Figure 7 - Upper quartile of the Cu_{EDTA} content calculated per canton over the 1995 to 2000 regarding the ratio between the number of pigs to the usable agricultural area. The statistics were performed for 220 cantons (about 46,000 km²).

L'indicateur pour l'élevage porcin IPAP a été confronté aux valeurs P75 à partir d'un ensemble de 220 cantons (*figure 7*). Le coefficient de corrélation calculé ne s'élève qu'à 0,38. Cette valeur n'indiquerait qu'un faible effet des élevages porcins sur ces valeurs P75 des teneurs en Cu_{EDTA} . Mais 16 cantons pour lesquels IPAP est faible (< 3) et les valeurs P75 sont élevées (> 5,5) ont retenu notre attention. Ils sont la cause de la mauvaise qualité du lien (en leur absence, le R vaudrait 0,68). Six d'entre eux, situés dans le département du Maine et Loire en rive gauche du fleuve, correspondent à des secteurs de viticulture (coteaux du Layon) et/ou d'arboriculture fruitière.

L'impact de la viticulture dans le Bordelais et dans la région d'appellation Cognac semble donc beaucoup plus important que celui de l'élevage porcin dans le Grand Ouest. L'IPAV révèle la longue exploitation des sols de vignobles et l'utilisation cumulée de bouillie bordelaise depuis plus d'un siècle.

La différence d'effet sur les teneurs des sols en cuivre extractible peut être reliée à la fois à l'ancienneté des pratiques et à l'importance des flux de cuivre ainsi générés :

- 100 ans de traitements à la bouillie bordelaise à hautes doses de Cu ;
- vs moins de 40 années de complémentation minérale des aliments pour les porcs.

CONCLUSIONS

L'analyse du cuivre extrait à l'EDTA est faite régulièrement en France pour les agriculteurs afin de juger des risques de carences en zones pédogéochimiquement sensibles. En contexte de sols de vignobles, il s'agit au contraire d'estimer l'état de contamination des sols par le cuivre lequel a un impact non négligeable sur l'activité bactérienne. Il peut y avoir également la crainte d'une toxicité en cas de replantation d'une jeune vigne ou de passage à la céréaliculture.

Mais la réalisation (ou non) d'analyse du cuivre extrait à l'EDTA n'est pas neutre. Un agriculteur a généralement une bonne raison de demander cette détermination. Il s'agit plus souvent de la crainte d'une carence ou d'une sub-carence que celle d'un excès vis-à-vis duquel les moyens d'action sont limités. Par ailleurs, le canton est une unité territoriale commode pour disposer d'un nombre de valeurs suffisant pour calculer des indicateurs robustes comme les médianes ou les quartiles, mais il peut masquer des disparités non seulement pédologiques mais aussi socio-économiques. Dans un même canton, peuvent co-exister des agriculteurs aux situations très contrastées, par exemple de petits éleveurs pratiquant une agriculture extensive et de gros élevages de porcs quasi-industriels. Comment savoir si l'indicateur statistique que nous avons retenu (P75) reflète plutôt la dominance d'un type d'agriculture ou d'un autre ?

Enfin, la BDAT, malgré ses imperfections (vastes secteurs non renseignés), permet de bien mettre en évidence (quantification et localisation) un certain nombre de faits et de tendances. Elle permet de bien visualiser les secteurs où se situent les risques de carences pour des cultures sensibles et montre que les sols agricoles de Bretagne ne connaissent plus guère ces risques et restent encore très éloignés des seuils de toxicité, bien qu'ils aient connu un accroissement sensible de leurs teneurs au cours des dernières décennies (Coppenet *et al.*, 1993 ; Cheverry, 1996).

REMERCIEMENTS

À Olivier Cor (Laboratoire d'analyses COOPAgri-Bretagne) ; Patrice Plet (Chambre régionale d'agriculture de Bretagne) ; Jean Luc Julien (Laboratoire d'analyse du Conseil général de l'Aisne) ; Sandrine Renault et Jean Michel Ecochard (Chambre d'Agriculture de l'Aube) ; Bernard Verbèque (Chambre d'agriculture du Loiret) ; Catherine Cam (Chambre régionale d'agriculture du Poitou-Charentes) ; Philippe Chéry (ENITA Bordeaux) ; Claire Pajot (LCA Blanquefort) ; Mathias Robin (Laboratoire Baron Philippe de Rothschild) pour leurs réponses à nos questions sur la pratique des analyses dans leur département ou leur région.

Nous remercions également l'ensemble des laboratoires qui ont bien voulu participer à ce programme en fournissant leurs données à la BDAT.

Le programme BDAT est financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Agence gouvernementale De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Institut Français de l'Environnement, Institut National de la Recherche Agronomique).

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D., Saby N., Deslais W., Bispo A. et Feix I., 2006 - Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols. Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Étude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 181-200.
- Chaignon V., 2001 - Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas des sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse. Univ. Aix-Marseille III. 183 p.
- Cheverry C., 1996 - La science des sols, au service d'une agriculture respectueuse de l'environnement, dans un contexte d'élevage intensif. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 82, n°6, pp. 90-98.
- Coïc Y. et Coppenet M., 1989 - Les oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA, Paris, 114 pages.
- Coppenet M., Golven J., Simon J.C., Le Corre L. et Le Roy M., 1993 - Évolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère. *Agronomie*, 13, pp. 77-83.
- Decroux J. 1990 - Stratégies de corrections en culture en matière d'oligo-éléments. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 76, 2, pp. 179-203.
- Flores Velez L. M., 1996 - Essai de spéciation des métaux dans les sols : cas du cuivre dans les vignobles. Thèse, Paris XII, 132 p.
- Juste C., 1983 - Problèmes posés par l'évaluation de la disponibilité pour la plante des éléments-traces du sol et de certains amendements organiques. *Science du Sol*, 2, pp. 109-122.
- Laurent F., Taureau J., Thévenet G. et Bregeon F., 1986. Méthodologie pour un diagnostic des situations carencées en cuivre. *Perspectives agricoles*, n° 100, pp. 27-39.
- Loué A., 1993 - Oligo-éléments en agriculture. 2^e éd. SCPA - Nathan, 577 pages.
- McGrath S.P., 1997 - Behaviour of trace elements in terrestrial ecosystems. *Contaminated Soils*, Paris (France) May 15-19, 1995. Ed. INRA Paris (Les colloques n° 85), pp. 35-54.
- Oliver M.A., Webster R. and McGrath S.P., 1996 - Disjunctive kriging for environmental management. *Environmetrics*, 7, pp. 333-358.
- Rainelli P., 1996 - Pollution des sols. *Problèmes économiques. Étude et Gestion des Sols*, 3-4, pp. 307-317.
- Robert M. et Juste C., 1997 - Stocks et flux d'éléments traces dans les sols du territoire. Actes des Journées Techniques "Épandage des boues résiduaires. Aspects sanitaires et environnementaux". ADEME. 5-6 juin 1997. pp. 192-205.
- Saby N., Schwartz C., Walter C., Arrouays D., Lemerrier B., Roland N., Squidant H., 2004 - Base de données des analyses de terre : procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Étude et Gestion des Sols*, 3, pp. 235-253.
- Thévenet G., 1985 - Normes d'interprétation des teneurs en cuivre des sols calcaires. *Perspectives agricoles*, n° 89, pp. 20-24.