

CARACTÉRISTIQUES DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES CARTOGRAPHIÉS par Sabrina SAVE

1 Arsenic - As

L'arsenic est un métalloïde existant sous forme organique et inorganique mais c'est sa forme inorganique qui prédomine dans les sédiments. Il est particulièrement lié aux oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, et sa persistance dans les sédiments est influencée par les conditions d'oxydo-réduction, le pH et l'activité microbienne (Conseil canadien des ministres de l'environnement 1999a; Fournier 2004). L'arsenic est souvent associé au fer dans ses minerais (pyrites, magnétites, ilménites, etc) (Michel 1987), mais aussi à d'autres métaux comme le cuivre, le plomb ou encore l'étain (Fournier 2004; Smith *et al.* 1998, 153-154; <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/As.pdf>). Sa concentration naturelle dépend fortement du matériau parent. La concentration en arsenic des sols n'excède normalement pas 15ppm mais des concentrations entre 0,2 et 40ppm ont été enregistrées dans des contextes pollués et non pollués (Smith *et al.* 1998). Plusieurs types d'industries modernes peuvent engendrer une pollution à l'arsenic: la manufacture de verre et de céramique, de composants électroniques, de pigments, de cosmétiques et de feux d'artifices; les traitements anti-corrosion des alliages cuivreux; le traitement du bois à l'arsenic; l'agriculture (pesticides, fertilisants, traitements drainants) (Smith *et al.* 1998). L'arsenic a aussi été utilisé comme pesticide dans le processus de tannage (Smith *et al.* 1998, 158). Les élevages de porc et de volaille peuvent aussi être source de pollution à l'arsenic (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/As.pdf>).

Le comportement de l'arsenic dans le sol dépend de sa nature et des propriétés. Dans un sol argileux, l'arsenic est beaucoup plus stable que dans un sol sableux car il sera moins sujet au ruissellement et aux phénomènes de percolation (Fournier 2004). L'arsenic est fortement adsorbé par les argiles, les hydroxydes et la matière organique (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/As.pdf>).

2 Calcium - Ca

Le calcium est un métal alcalino-terreux, jamais présent à l'état pur dans la nature. Cet élément est très abondant sur terre (le 5^e plus abondant) et essentiel dans la formation de la matière organique: os, dents, coquilles (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Ca.pdf>). Le carbonate de calcium est le composant de base des roches calcaires, tandis que le sulfate de calcium constitue les gypses. Dans les roches, il est souvent associé au sodium et au potassium (Gis Sol 2011, p. 64). Le calcium a un fort pouvoir flocculant sur les sols. Il y est souvent au magnésium (Massenet 2010). Il est très mobile dans les sols, excepté en conditions très alcalines (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Ca.pdf>). Le calcium facilite également la mobilité du potassium et la fixation des phosphates (UNIFA 2013a).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en calcium dans des secteurs riches en coquilles de mollusques (Entwistle *et al.* 2007, 411), dans des étables et des zones de stockage de fumier (Oonk *et al.* 2009b, 164; Oonk *et al.* 2009c, 41), dans des zones de séchage de poisson (Holliday et Gartner 2007, 307), dans des foyers utilisés pour la métallurgie et le processus de coupellation où de la cendre d'os était utilisée (Cook *et al.* 2005), dans des foyers domestiques (Jones *et al.* 2010, 44-45; Vos *et al.* 2018, 685; Wilson 2008, 2009), dans des aires de production et d'utilisation de chaux (Middleton et Price 1996, 678), dans des espaces clos et couverts (Middleton et Price 1996, 679), dans des espaces de cuisine (Middleton et Price 1996, 690), dans des dépotoirs (Misarti *et al.* 2011, 1448), et dans des sépultures (Misarti *et al.* 2011, 1452).

3 Chrome - Cr

Le chrome est un métal et un oligo-élément essentiel. La teneur en chrome des sols est fortement influencée par celle de la roche-mère. Certaines roches basaltiques, les moraines et les flyschs alpins ainsi que les roches liasiques (calcaire argileux, marne et argile du Jurassique inférieur)

donnent naissance à des sols riches en chrome (Conseil canadien des ministres de l'environnement 1999b; Gis Sol 2017a). La concentration moyenne des sols en chrome est de 60ppm (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Cr.pdf>).

Le chrome aujourd'hui utilisé dans l'industrie (acier, chromage) est extrait de la chromite, un minerai de fer et de chrome. On le trouve également dans la crocoïte, un chromate de plomb de couleur rouge, utilisé au XIX^e siècle pour l'élaboration de pigments, puis comme réfractaire dans les revêtements de fours. Les rejets anthropiques de chrome, outre la métallurgie, peuvent provenir de la combustion du charbon et du pétrole. Le chrome est également soluble dans l'eau et présent dans les organismes vivants (Chiffolleau 1994) mais il reste peu mobile dans les sols, en particulier en conditions de rédox modérées et en pH neutre (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Cr.pdf>).

4 Cuivre - Cu

Le cuivre est un métal et un oligo-élément. Il tend à s'accumuler dans le sédiment par ses affinités avec les oxydes de fer et de manganèse, et la matière organique (Conseil canadien des ministres de l'environnement 1999c; <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Cu.pdf>). Le cuivre est présent dans la nature sous forme de minerai de cuivre natif, de minerai oxydé ou sulfuré. Les sols naturellement riches en cuivre se trouvent dans les massifs volcaniques de la chaîne des Puys et dans les massifs hercyniens (Gis Sol 2017b). La concentration en cuivre des sols est généralement comprise entre 13 et 24ppm (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Cu.pdf>). Les apports anthropiques sont variés: métallurgie, combustion du carbone, épandage de lisier, fertilisants, etc. Les oxydes de cuivre, les carbonates et les hydroxydes sont peu ou pas solubles dans l'eau, tandis que les chlorures, les nitrates et les sulfates de cuivre le sont fortement.

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en cuivre dans des foyers domestiques (Cook *et al.* 2014; Jones *et al.* 2010, 44-45; Wilson 2009), des amas osseux (Wilson 2008,) et des aires de boucheries (Cook *et al.* 2014; Coronel *et al.* 2014, 268).

5 Fer - Fe

Le fer est présent dans la nature sous forme de minerai, les plus répandus étant la magnétite et l'hématite. C'est le quatrième élément le plus commun de la croûte terrestre et le deuxième métal après l'aluminium (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Fe.pdf>). Chaque kilogramme de croûte terrestre contient en moyenne 45g de fer. Il est très abondant dans les sols où il représente 0,05 à 19% de la composition (Gis Sol 2011, p. 64), avec une moyenne d'environ 2,1% (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Fe.pdf>).

Le fer n'existe pas à l'état pur car il s'oxyde rapidement au contact de l'air. Certains considèrent qu'il est peu mobile dans les sols (Boust *et al.* 1999), d'autres au contraire, très mobilisable (Gis Sol 2011, p. 64).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en fer dans des aires de boucherie (Coronel *et al.* 2014, 267) et des espaces de cuisine (Fernandez *et al.* 2002, 508).

6 Potassium - K

Le potassium est un métal mou. C'est le huitième élément le plus commun de la croûte terrestres, avec une concentration moyenne dans les sols de 1,84% (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/K.pdf>). Le potassium est présent dans les sols sous quatre formes: le potassium des minéraux silicatés, le potassium adsorbé, le potassium rétrogradé et le potassium organique (www.ecosociosystemes.fr/potassium.html). Le potassium des minéraux silicatés provient des micas, feldspaths et de certaines argiles comme les illites. Les sols issus de formation cristalline ou volcanique sont donc plus riches en potassium que les sols calcaires. Le potassium adsorbé est présent en solution dans le sol ou à la surface des complexes argilo-humiques. Le potassium rétrogradé correspond aux ions K⁺ qui se sont fixés à l'intérieur des feuillets d'argile. Cette fixation est d'autant plus importante que le pH est élevé. Le potassium

organique est lié à l'activité microbienne des bactéries qui vivent dans la matière organique. La météorisation des feldspaths engendre un potassium particulièrement soluble mais sa mobilité est généralement affectée par sa rapide fixation aux minéraux argileux et à la matière organique, et par son absorption par les plantes pour leur besoin en croissance (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/K.pdf>). Les fertilisants sont la principale source de pollution moderne au potassium, ainsi que les sels de potassium utilisés dans plusieurs procédés chimiques et médicaux (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/K.pdf>).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en potassium dans des structures de combustion (Dirix *et al.* 2013, 2966; Holliday et Gartner 2007, 307; Middleton et Price 1996, 678; Misarti *et al.* 2011, 1442; Vos *et al.* 2018, 685; Vyncke *et al.* 2011, 2287; Wilson 2009), des aires de séchage de poisson (Holliday et Gartner 2007, 307), des zones de traitement et combustion de certains types de noix (Homsey et Capo 2006, 248), dans des zones dépotoirs (Misarti *et al.* 2011, 1448), dans des amas de fumier, de débris végétaux et de cendres (Oonk *et al.* 2009a, 41; Vos *et al.* 2018, 685).

7 Manganèse - Mn

Le manganèse est un élément relativement abondant dans la croûte terrestre où il est présent en moyenne à une concentration de 600ppm. Il entre dans la composition de différents minéraux comme la pyrolusite, la rhodochrosite et la manganite. Le comportement du manganèse dans le sol est complexe et varie en fonction de différents facteurs environnementaux dont le pH. Bien que les ions Mn^{2+} soient très solubles, le manganèse n'est pas très mobile, tout particulièrement en conditions oxydantes car les ions Mn^{3+} et Mn^{4+} sont des oxydes insolubles. Le manganèse est donc fortement impacté par les conditions rédox et fortement mobile uniquement en conditions anoxiques sous sa forme Mn^{2+} . Les sources anthropiques modernes de manganèse correspondent aux activités minières, à la métallurgie, l'agriculture, et plus récemment à la production de batteries, d'acier, de verre et de produits chimiques (permanganate) (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Mn.pdf>).

Des études archéologiques récentes ont montré des enrichissements en manganèse dans des zones dépotoirs (Misarti *et al.* 2011, 1448), des aires de découpe et séchage de poissons (Misarti *et al.* 2011, 1442), des inhumations (Misarti *et al.* 2011, 1452) et des foyers domestiques (Vos *et al.* 2018, 685).

8 Phosphore - P

Le phosphore est le onzième élément le plus abondant de la croûte terrestre, où il représente 0,1% de son poids. C'est un élément non métallique, lithophile, sidérophile et biophile (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/P.pdf>). Le phosphore, tout comme l'azote et le potassium, est essentiel à la croissance des végétaux et est donc utilisé comme fertilisant. Le phosphore est naturellement présent dans les urines et les excréments (Arte future 2013; Audoin 1991), les os, les plantes et la matière organique (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/P.pdf>).

La géochimie du phosphate est complexe. En environnement acide, à pH compris entre 4 et 6, $H_2PO_4^-$ est la forme dominante. HPO_4^{2-} est la forme la plus abondante en pH neutre, tandis que PO_4^{3-} est le plus stable en conditions alcalines (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/P.pdf>). L'anion phosphate PO_4^{3-} est fixé par les argiles par les ions Ca^{2+} sur les hydroxydes de fer et d'aluminium. Les ions PO_4^{3-} sont peu mobiles (Audouin 1991; UNIFA 2013b). Excepté en conditions très acides, la mobilité du phosphore est limitée par la formation de phosphates d'aluminium et de fer. Le phosphore peut aussi se lier au plomb et au calcium pour former des minéraux insolubles. Dans les sols calcaires, les phosphates sont adsorbés par la calcite et en cas de fortes concentrations, le phosphate de calcium peut précipiter (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/P.pdf>). Les sources anthropiques modernes de pollution au phosphore sont généralement les fertilisants, les eaux usées et les détergents (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/P.pdf>).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en phosphore dans des structures de combustion (Cook *et al.* 2014; Dirix *et al.* 2013, 2966; Holliday et Gartner 2007, 302; Jones *et al.* 2010, 44-45; Middleton et Price 1996, 678; Vos *et al.* 2018, 685; Vyncke *et al.* 2011, 2287; Wilson 2008), en présence d'ossements et d'excréments (Cook *et al.* 2014; Coronel *et al.* 2014, 266-267; Entwistle *et al.* 2007, 409; Holliday et Gartner 2007, 302; Misarti *et al.* 2011, 1442; Oonk *et al.* 2009b, 164; Vos *et al.* 2018, 685; Vyncke *et al.* 2011, 2288; Wilson 2008, 2009), dans des amas de débris végétaux (Holliday et Gartner 2007, 302), dans des dépotoirs (Fernandez *et al.* 2002, 502-503; Misarti *et al.* 2011, 1448; Wilson 2008), ainsi que dans des sépultures (Misarti *et al.* 2011, 1452).

9 Plomb - Pb

Le plomb est un élément chimique métallique présent dans la nature sous forme de carbonates (cérusites), de phosphates (pyrophosphites) mais surtout de sulfure (galène). Il est également extrait d'autres minerais de zinc (blende), d'argent et de cuivre. Le plomb est associé aux minéraux argileux, aux oxydes de manganèse, aux hydroxydes de fer et d'aluminium, et à la matière organique (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Pb.pdf>). Dans certains sols, le plomb peut se concentrer dans les particules de carbonates de calcium et de phosphates (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Pb.pdf>).

Très tôt les hommes ont su l'exploiter pour en faire un colorant ou des objets métalliques grâce à son bas point de fusion. Le plomb est très peu mobile dans les sols car il se fixe facilement à la matière organique, aux oxydes de fer et de manganèse, et à d'autres minéraux secondaires (Baize 2010; <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Pb.pdf>).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en plomb dans des structures de combustion (Cook *et al.* 2014; Wilson 2008, 2009), des étables (Wilson 2008, 2009), et des zones dépotoirs (Wilson 2008).

10 Rubidium - Rb

Le rubidium n'existe pas à l'état de minerai pur mais entre dans la composition de différents minerais où il peut remplacer également le potassium. Le rubidium n'est pas très abondant dans la croûte terrestre et présente une concentration moyenne dans les sols de 78ppm. Dans les roches sédimentaires, le rubidium est présent dans les feldspaths, les micas et les argiles. Malgré sa stabilité et son importante solubilité, le rubidium est peu mobile dans les sols en raison des liens forts qu'il tisse avec les argiles. Le pH élevé favorise sa fixation sur les argiles. Avant les années 1920, on utilisait très peu le rubidium dans l'industrie. Aujourd'hui il est utilisé dans la manufacture de tubes électroniques, de photo-résistances et pour certains usages médicaux (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Pb.pdf>).

11 Strontium - Sr

Le strontium est un métal lithophile, chimiquement très similaire au calcium et au barium (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Sr.pdf>). Le strontium est présent dans la croûte terrestre sous la forme de minéraux comme la célestite (sulfate de strontium) et la strontianite (carbonate de strontium), des des dépôts hydrothermaux et des pegmatites. La plupart du strontium présent dans les rivières provient de l'altération du gypse, de l'anhydrite, du calcaire, de la marne, du grès et de la dolomite. La concentration moyenne du strontium dans les sols est de 95ppm. Les apports anthropiques en strontium peuvent être provoqués par la mouture, la combustion du charbon, les fertilisants et le matériel pyrotechnique. Le strontium est aujourd'hui utilisé notamment dans l'industrie du verre, de la céramique et des pigments (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Sr.pdf>). Il est peu mobile dans les sols et se fixe aux oxydes métalliques et aux argiles (Watts et Howe 2010), sauf en conditions oxydantes et pH acide où il est très mobile (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Sr.pdf>).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en strontium dans des zones riches en malacofaune (Entwistle *et al.* 2007, 411; Misarti *et al.* 2011, 1448), dans des aires de traitement et de combustion de certains types de noix (Homsey et Capo 2006, 248), dans des foyers domestiques (Jones *et al.* 2010, 44-45; Vos *et al.* 2018, 685; Wilson 2008, 2009), dans des aires de production et d'utilisation de chaux (Middleton et Price 1996, 678), dans des espaces clos et couverts (Middleton et Price 1996, 679), dans des zones dépotoir (Misarti *et al.* 2011, 1448), dans des sépultures (Misarti *et al.* 2011, p. 1452), ainsi que dans des excréments (Vyncke *et al.* 2011, 2288).

12 Thorium - Th

Le thorium est un métal présent dans les granites, les basaltes, les schistes, les roches sédimentaires et plus particulièrement les carbonates, les phosphates, les silicates et les oxydes. C'est le métal lourd le plus abondant de la croûte terrestre (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Th.pdf>). La concentration des sols en thorium est comprise entre 3,4 et 105ppm. Dans les sols, le thorium se concentre dans la fraction fine des sédiments, et se lie avec la matière organique et les oxydes, surtout lorsque le pH est élevé. Le thorium est en général peu mobile dans les sols. Les apports anthropiques en thorium sont de trois natures: le cycle de combustion nucléaire depuis l'exploitation des mines uranifères jusqu'au traitement des déchets, les retombées atmosphériques dues aux accidents nucléaires, et l'utilisation d'engrais phosphatés (IRSN 2002; <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Th.pdf>).

13 Titane - Ti

Le titane est un métal léger, très commun, et dont la concentration moyenne dans les sols tourne autour de 5700ppm. C'est un composant de plusieurs minéraux comme l'ilménite, le rutile, la brookite, l'anatase et la sphène. On le trouve également en traces dans le pyroxène, l'amphibole, le mica et le grenat. Le titane possède un lien fort avec le fer. Il est quasiment immobile dans les sols. Le titane est utilisé dans les pigments (http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Ti_TiO2.pdf).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en titane dans des foyers domestiques et des aires de débitage lithique (Misarti *et al.* 2011, 1442).

14 Vanadium - V

Le vanadium est un métal présent dans de nombreux minéraux (magnétite, vanadinite, carnotite, mica, pyroxène, apatite et amphibole). Dans les sols, le vanadium se lie à la matière organique, aux oxydes de fer et de manganèse, et aux argiles. La concentration moyenne des sols en vanadium est de 63ppm (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/V.pdf>). La mobilité du vanadium s'accroît avec le pH (Bisson *et al.* 2012) et les conditions de rédox influent aussi sur la mobilité de l'élément qui augmentent en conditions oxydantes (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/V.pdf>). Les sources anthropiques modernes de vanadium sont la combustion de houille et huile minérale, la production d'acier et la pollution liée au trafic routier (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/V.pdf>).

15 Yttrium - Y

L'yttrium est un métal lithophile présent dans plusieurs minerais comme la xénotime ou la yttrialite, mais aussi en plus faibles quantités dans la biotite, le feldspath, le pyroxène, le grenat et l'apatite. Le yttrium est chimiquement similaire aux éléments rares mais présente une concentration moyenne dans les sols de 23ppm. Le yttrium est peu mobile dans les sols, indépendamment des conditions environnementales. Les sources anthropiques modernes de pollution au yttrium sont les mines d'exploitations des éléments rares, et la poussière de céramique. Le yttrium est également utilisé dans la manufacture de téléviseurs, de lampes à fluorescence, de lampes à économie d'énergie, et de verre (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Y.pdf>).

Le zinc est un métal chalcophile, très abondant dans la croûte terrestre (concentration moyenne 47ppm). Il entre dans la composition de plusieurs minéraux comme la sphalérite et la smithsonite, et dans une moindre mesure dans le pyroxène, le mica, le grenat et la magnétite (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Zn.pdf>). Il est naturellement très présent dans les sols développés sur des roches cristallines et des roches jurassiques, notamment liasiques (calcaires argileux, marnes et argiles du Jurassique inférieur) (Gis Sol 2017e). Le zinc est généralement lié au cadmium et au fer. Dans le sol, le zinc se lie aux oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, ainsi qu'aux silicates et aux minéraux argileux. La mobilité du zinc augmente lorsque le pH baisse. Le zinc a de nombreuses applications industrielles. L'apport anthropique peut être dû à la combustion du charbon, aux activités minières et à la production d'acier. Le zinc est également utilisé dans les traitements anti-corrosion, dans la production d'alliages de laiton, dans la peinture blanche, et dans la production de batteries (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Zn.pdf>).

Des études archéologiques récentes ont démontré des enrichissements en zinc dans des structures de combustion (Cook *et al.* 2014; Dirix *et al.* 2013, 2966; Jones *et al.* 2010, 44-45; Vos *et al.* 2018, 685; Vyncke *et al.* 2011, 2287; Wilson 2008, 2009), dans des espaces de cuisine et boucherie (Cook *et al.* 2014; Coronel *et al.* 2014, 268; Vos *et al.* 2018, 685), dans des amas osseux (Wilson 2008), dans des égouts domestiques (Jones *et al.* 2010, 44), dans des zones dépotoirs (Fernandez *et al.* 2002, 510; Misarti *et al.* 2011, 1448; Wilson 2018), ainsi que dans du fumier (Vos *et al.* 2018, 685; Wilson 2018).

Le zirconium est le 20^e élément chimique le plus commun sur terre (Shahid *et al.* 2013). Le zirconium est un élément chimique métallique présent dans plusieurs minéraux comme le zircon et la baddeleyite, mais aussi à l'état de trace dans le clinopyroxène, l'amphibole, le mica et le grenat. Le zirconium est peu mobile dans les sols et résistant au lessivage (Shahid *et al.* 2013; <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Zr.pdf>). La concentration moyenne du zirconium dans les sols est de 220ppm. Les sources anthropiques de zirconium sont les activités nucléaires et les poussières de céramique (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Zr.pdf>). Le zirconium est aussi utilisé dans la manufacture de pots catalytiques, de briques de fourneaux à haute température, de creusets de laboratoires et d'outils chirurgicaux (<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Zr.pdf>).

RÉFÉRENCES

Arte future 2013, *L'indispensable phosphore*, publication internet consultée le 30/08/2013.

Audouin L. 1991, "Rôle de l'azote et du phosphore dans la pollution animale", *Rev. sci. tech. Off. int. Epiz.* 10 (3), p. 629-654.

Bisson M. (dir.), Bonnomet V., Gay G., Ghillebaert F., Guillard D., Lethielleux L., Tack K. 2012, *Vanadium et ses composés*, INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques.

Booth A.D., Vandeginste V., Pike D., Abbey R., Clark R.A., Green C.M., Howland N. 2017, "Geochemical insight during archaeological geophysical exploration through in situ X-ray fluorescence spectrometry", *Archaeological Prospection* 24, p. 361-372.

Boust D., Fischer J.-C., Ouddane B., Petit F., Wartel M., avec les contributions de Abarnou A., Ficht A., Gandon R., Herbert D., Hocde R., Poulin M., Rozet M., Voyer J.-J. 1999, *Fer et manganèse: réactivités et recyclages*, Ifremer, Programme Seine-Aval.

Chiffolleau J.-F. 1994, *Le chrome en milieu marin*, Repères océan n°8, Ifremer.

Ciminale M., Gallo D., Pallara M., Laviano R. 2009, "Understanding the origin of magnetic anomalies in Monte San Vincenzo (Southern Italy) archaeological Site: susceptibility measurements, PXRD, XRF and optical analysis", *ArchéoSciences, revue d'archéométrie*, suppl. 33, p. 43-45.

Conseil canadien des ministres de l'environnement 1999a, "Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments: protection de la vie aquatique - arsenic", in *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, Winnipeg.

Conseil canadien des ministres de l'environnement 1999b, "Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments: protection de la vie aquatique - chrome", in *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, Winnipeg.

Conseil canadien des ministres de l'environnement 1999c, "Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments: protection de la vie aquatique - cuivre", in *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, Winnipeg.

Cook S.R., Clarke A.S., Fulford M.G., Voss J. 2014, "Characterising the use of urban space: a geochemical case study from *Calleva Atrebatum* (Silchester, Hampshire, UK) *Insula IX* during the late first/early second century AD", *Journal of Archaeological Science* 50, p. 108-116.

Coronel E.G., Bair D.A., Brown C.T., Terry R.E. 2014, "Utility and Limitations of Portable X-Ray Fluorescence and Field Laboratory Conditions on the Geochemical Analysis of Soils and Floors at Areas of Known Human Activities", *Soil Science* 179(5), p. 258-271.

Crowther J. 1997, "Soil Phosphate Surveys: Critical Approaches to Sampling, Analysis and Interpretation", *Archaeological Prospection* 4, p. 93-102.

Dirix K., Muchez P., Degryse P., Kaptyn E., Music B., Vassileva E., Poblome J. 2013, "Multi-element soil prospection aiding geophysical and archaeological survey on an archaeological site in suburban Salagassos (SW-Turkey)", *Journal of Archaeological Science* 40 (7), p. 2961-2970.

Entwistle J.A., McCaffrey K.J.W., Dodgshon R.A. 2007, "Geostatistical and Multi-Elemental Analysis of Soils to Interpret Land-Use History in the Hebrides, Scotland", *Geoarchaeology* 22(4), p. 391-415.

Fournier C. 2004, *L'Arsenic en Valais: Association entre Anomalies et Formations Géologiques, et Etude de la Contamination par le Gisement de La Rasse*, Mémoire de Sciences naturelles de l'environnement, Université de Lausanne.

Gis Sol 2017a, *Les teneurs en chrome total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France*, publication internet <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-teneurs-en-chrome-total-des-horizons-de-surface-0-30-cm-des-sols-de-france-2403>

Gis Sol 2017b, *Les teneurs en cuivre total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France*, publication internet <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-teneurs-en-cuivre-total-des-horizons-de-surface-0-30-cm-des-sols-de-france-2394>

Gis Sol 2017c, *Les teneurs en nickel total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France*, publication internet <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-teneurs-en-nickel-total-des-horizons-de-surface-0-30-cm-des-sols-de-france-2380>

Gis Sol 2017d, *Les teneurs en plomb total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France*, publication internet <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-teneurs-en-plomb-total-des-horizons-de-surface-0-30-cm-des-sols-de-france-2374>

Gis Sol 2017e, *Les teneurs en zinc total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France*, publication internet <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-teneurs-en-zinc-total-des-horizons-de-surface-0-30-cm-des-sols-de-france-2362>

Gis Sol 2011, *L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*, Nancy.

Hayes K. 2013, "Parameters in the use of pXRF for archaeological site prospection: a case study at the Reaume Fort Site, Central Minnesota", *Journal of Archaeological Science* 40 (8), p. 3193-3211.

Holliday V.T. et Gartner W.G. 2007, "Methods of soil P analysis in archaeology", *Journal of Archaeological Science* 34, p. 301-333.

Hompsey L.K. et Capo R.C. 2006, "Integrating Geochemistry and Micromorphology to Interpret Feature Use at Dust Cave, a Paleo-Indian Through Middle-Archaic Site in Northwest Alabama", *Geoarchaeology* 21(3), p. 237-269.

IRSN 2002, *Fiche radionucléide: Thorium 232 et environnement*, publication internet téléchargée le 18 septembre 2013: http://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/radionuclides-sheets/Documents/Thorium_Th232_v1.pdf

Johnson B., Leethem J. et Linton K. 1995, "Effective XRF field screening of lead in soil. DuPont Environmental Remediation Services, Houston, TX".
<http://info.ngwa.org/gwol/pdf/950161762.PDF>. p. 629-642.

Jones R., Challands A., French C., Card N., Downes J., Richards C. 2010, "Exploring the Location and Function of a Late Neolithic House at Crossiecrown, Orkney by Geophysical, Geochemical and Soil Micromorphological Methods", *Archaeological Prospection* 17, p. 29-47.

Kalnicky D.J. et Singhvi R. 2001, "Field portable XRF analysis of environmental samples", *Journal of Hazardous Materials* 83, p. 93-122.

Kilbride C., Poole J. et Hutchings T.R. 2006, "A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni, and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses", *Environmental Pollution* 143, p. 16-23.

Massenet J.-Y. 2010, "Chapitre III: Les constituants solides du sol", publication internet téléchargée le 30/08/2013: <http://www.jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO3.pdf>

Michel P. 1987, "L'arsenic en milieu marin: synthèse bibliographique".

Middleton W.D. et Prize T.D. 1996, "Identification of activity areas by multi-element characterization of sediments from modern and archaeological house floors using inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy", *Journal of Archaeological Science* 23, p. 673-687.

Misarti N., Finney B.P., Machner H. 2011, "Reconstructing site organization in the eastern Aleutian Islands, Alaska using multi-element chemical analysis of soils", *Journal of Archaeological Science* 38, p. 1441-1455.

- Oonk S., Slomp C.P., Huisman D.J., Vriend S.P. 2009a, "Effects of site lithology on geochemical signatures of human occupation in archaeological house plans in the Netherlands", *Journal of Archaeological Science* 36, p. 1215-1228.
- Oonk S., Slomp C.P., Huisman D.J., Vriend S.P. 2009b, "Geochemical and mineralogical investigation of domestic archaeological soil features at the Tiel-Passewaaij site, The Netherlands", *Journal of Geochemical Exploration* 101, p. 155-165.
- Oonk S., Slomp C.P., Huisman D.J. 2009c, "Geochemistry as an Aid in Archaeological Prospection and Site Interpretation: Current Issues and Research Directions", *Archaeological Prospection* 16, p. 35-51.
- Parnell J.J., Terry R.E., Golden C. 2001, "Using In-Field Phosphate Testing to Rapidly Identify Middens at Piedras Negras, Guatemala", *Geoarchaeology: An International Journal* 16(8), p. 855-873.
- Piorek S. 1997, " On-site, in-situ characterization of contaminated soil and liquid hazardous waste with field portable X-ray analyzer - A cost effective approach", in Gottlieb J. (eds), *Field Screening Europe*, p. 329-333, Kluwer Academic Publishers.
- Roos C.I., Nolan K.C. 2012, "Phosphates, plowzones, and plazas: a minimally invasive approach to settlement structure of plowed village sites", *Journal of Archaeological Science* 39, p. 23-32.
- Rypkema H.A., Lee W.E., Galaty M.L., Haws J. 2007, "Rapid, in-stride soil phosphate measurement in archaeological survey: a new method tested in Loudoun County, Virginia", *Journal of Archaeological Science* 34, p. 1869-1867.
- Shackley S. (dir.) 2011, *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*, Springer.
- Shahid M., Ferrand E., Schreck E., Dumat C. 2013, "Behavior and Impact of Zirconium in the Soil-Plant System: Plant Uptake and Phytotoxicity", *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 221, p. 107-127.
- Sjöberg A. 1976. "Phosphate Analysis of Anthropogenic Soils", *Journal of Field Archaeology* 3(4), p. 447-454.
- Téreygeol F. (dir.) 2012, *Comprendre les savoir-faire métallurgiques antiques et médiévaux. L'expérimentation archéologique et archéométrique sur la plate-forme expérimentale de Melle.*, éditions Errance, Paris.
- Téreygeol F., Arles A., Foy E., Florsch N., Llubes M. 2010, "Dosages par fluorescence X portable d'ateliers médiévaux de production des métaux non-ferreux: les exemples de Castel-Minier et d'Agneserre (Aulus-les-Bains, 09)", *Archéosciences, revue d'Archéométrie* 34, p. 253-267.
- UNIFA 2013a, "Calcium - Magnésium", publication internet téléchargée le 30/08/2013: <http://www.unifa.fr/fichiers/actu/chap05.pdf>
- UNIFA 2013b, "Le Sol", publication internet téléchargée le 30/08/2013: <http://www.unifa.fr/fichiers/actu/chap01.pdf>

USEPA 2007, *Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment*, USEPA, Washington, DC.

Vos D., Jenkins E., Palmer C. 2018, "A dual geochemical-phytolith methodology for studying activity areas in ephemeral sites: Insights from an ethnographic case study in Jordan", *Geoarchaeology* 33, p. 680-694.

Vyncke K., Degryse P., Vassilieva E., Waelkens M. 2011, "Identifying domestic functional areas. Chemical analysis of floor sediments at the Classical-Hellenistic settlement at Düzen Tepe (SW Turkey)", *Journal of Archaeological Science* 38, p. 2274-2292.

Watts P. et Howe P. 2010, *Strontium and strontium compounds*, Concise International Chemical Assessment Document 77, World Health Organization.

Wilson C.A., Davidson D.A., Cresser M.S. 2008, "Multi-element soil analysis: an assessment of its potential as an aid to archaeological interpretation", *Journal of Archaeological Science* 35, p. 412-424.

Wilson C.A., Davidson D.A., Cresser M.S. 2009, "An evaluation of the site specificity of soil elemental signatures for identifying and interpreting former functional area", *Journal of Archaeological Science* 36, p. 2327-2334.