

Le pédologue en milieux industriels et urbains

I. Sols d'une friche industrielle

C. Schwartz⁽¹⁾, L. Florentin⁽¹⁾, D. Charpentier⁽²⁾, S. Muzika⁽²⁾ et J.-L. Morel⁽¹⁾

(1) ENSAIA-INPL/INRA - Laboratoire Sols et Environnement -
2, Avenue de la Forêt de Haye - BP 172 - 54505 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex

(2) EPML-GELFI - rue Robert Blum - BP 245 - 54701 Pont-à-Mousson Cedex

RÉSUMÉ

Apparues dans les années 60, les friches industrielles se sont multipliées avec le recul des activités sidérurgiques et charbonnières et atteignent une surface de l'ordre de 6000 hectares pour la seule Région Lorraine. La nécessaire requalification de ces espaces nécessite de mieux cerner la problématique des sols industriels. L'objectif de cet article est alors, à partir d'un exemple de friche industrielle d'une ancienne usine sidérurgique, de montrer comment adapter les méthodes pédologiques éprouvées sur sols agricoles et forestiers à ces milieux fortement anthropisés. Une étude historique approfondie permet d'orienter la prospection de terrain et de localiser les endroits d'ouverture de fosses. Deux sites caractéristiques ont été retenus pour observation, description et échantillonnage selon les horizons en vue de déterminations analytiques. L'un des sites concerne un crassier constitué de matériaux ayant dans l'ensemble une bonne résistance mécanique, l'autre un ancien bassin de décantation aux matériaux moins stables. Les profils montrent une grande variabilité horizontale et verticale avec des teneurs élevées en quelques éléments en traces pour certains horizons. Ces observations aident à apprécier la qualité des sols, à comprendre leur fonctionnement et à prévoir les risques de transfert des polluants dans l'écosystème. La spécificité de ces milieux nécessite de renforcer la phase préparatoire lors de la collecte des documents et renseignements, tant pour rendre plus pertinentes et efficaces les observations que dans un but de sécurité pour les intervenants.

Mots clés

Friche industrielle, méthodologie, historique, profil, qualité.

SUMMARY

THE SOIL SCIENTIST IN INDUSTRIAL AND URBAN ENVIRONMENTS: I. Soils of an industrial brownfield

The termination of coal and steel industries in many industrialised countries have left large surfaces of derelict land which, for example, cover about 6000 ha in the Lorraine Region. The management of these sites to allow the installation of new activities needs a better characterisation of the soils. This paper is aimed at showing how the classical approach used in soil science to describe soil profiles

may be used and adapted to study the functioning and evolution of industrial soils. A derelict land of a former steel industry which has already been partially restored was chosen. Location of profiles was guided by a preliminary thorough historical analysis. Two areas were selected which emphasise the characteristics of industrial soils, i.e. heterogeneity, complexity, anthropogenic material. They were i) a site composed of slags and various stable mineral materials and ii) a former deposition pond. Description was conducted according to the traditional pedological approach, and soil samples were collected in each horizon for analysis of physico-chemical parameters along with content in four metals. Soil profiles confirmed the strong horizontal and vertical heterogeneity. Distinct horizons were identified which corresponded to the several former depositions. Analysis revealed high contents in metals in some horizons which suggested that study should be conducted to predict their evolution in the soil profile, hence the risk for the adjacent ecosystems. The specificity of industrial soils demand a complete study of all available information about former activities to determine as accurately as possible the materials present on the site to make easier the work of soil scientists to understand the main characteristics of the soil and to elaborate scenarios of evolution.

Key-words

Derelict land, methodology, historical approach, profile, quality

RESUMEN**EL EDAFÓLOGO EN MEDIOS INDUSTRIALES Y URBANOS: I - Suelos de un baldío industrial.**

Aparecidos en los años 60, los baldíos industriales se multiplicaron con la disminución de las actividades siderúrgicas y carboneras, y cubren una superficie del orden de 6 000 hectáreas solamente para la región de Lorraine. La requalificación de estos espacios necesita de conocer mejor los suelos industriales. El objetivo de este artículo es, a partir de un ejemplo de un baldío industrial de una vieja fábrica siderúrgica, de mostrar como adaptar los métodos pedológicos usados en suelos agrícolas y forestales a estos medios fuertemente anthropizados. Un estudio histórico profundizado permite orientar la prospección de terreno y localizar los lugares de apertura de pozos agrológicos. Dos sitios característicos fueron retenidos para la observación, la descripción y el muestreo de los horizontes para las determinaciones analíticas. Uno de los sitios concierne un escorial constituido de materiales que tienen una buena resistencia mecánica, el otro es una vieja represa de decantación con materiales menos estables. Los perfiles muestran una gran variabilidad horizontal y vertical con contenidos elevados en algunos elementos trazas en ciertos horizontes. Estas observaciones ayudan apreciar la calidad de los suelos, comprender su funcionamiento y prever los riesgos de transferencia de los contaminantes en el ecosistema. La especificidad de estos medios necesita de aumentar la fase preparatoria durante la colecta de documentos e informaciones, tanto para que las observaciones sean más eficaces y pertinentes como para una finalidad de seguridad de los actores.

Palabras claves

Baldío industrial, metodología, historia, perfil, calidad

Apparues dans les années 60, les friches industrielles se sont multipliées en France avec le recul des activités sidérurgiques et charbonnières. En Lorraine, l'importance du problème nécessitait de mettre en place une politique appropriée afin de transformer l'image de ces sites et des bassins concernés en traitant les terrains et les bâtiments délaissés, pour les préparer à de nouvelles vocations. Depuis 1985, 3000 hectares, sur les 6000 actuellement existant en Lorraine ont été traités grâce à la politique régionale de résorption des friches industrielles. Cette politique est mise en œuvre par l'Etat, la Région Lorraine et l'EPML (Etablissement Public de la Métropole Lorraine), ce dernier étant maître d'ouvrage. Près de 550 millions de francs ont ainsi été mobilisés de 1986 à 1993 pour mener à bien cette démarche. Le programme s'est poursuivi sur la période 1994 à 1998 avec 250 millions de francs d'investissements. La requalification de ces espaces dégradés a permis de mieux cerner la problématique des sols industriels. Ces derniers constituent en effet des milieux hétérogènes et complexes du fait de la présence de réseaux et d'ouvrages souterrains, de fondations profondes, de dépôts de déchets, de sous-produits de l'activité industrielle et de pollutions éventuelles (Bullock et Gregory, 1991; Boulding, 1994; Florentin *et al.*, 1998; Barles *et al.*, 1999; Morel *et al.*, 1999). Pour désigner les sols anthropisés, des essais de classification ont été proposés (Arbeitskreis Stadtböden, 1988; Baize et Rossignol, 1992; Burghardt, 1994). Ces classifications doivent néanmoins s'enrichir au fur et à mesure des investigations de terrain. Si la spécificité des sols industriels constitue un nouveau champ d'investigations pour les pédologues, elle est aussi une contrainte pour l'aménageur ou le reprenneur du site. Cette contrainte doit être analysée au moyen d'études techniques et d'approches pluridisciplinaires (études géotechniques et historiques, analyse de plans anciens ou études phytosociologiques par exemple), afin d'optimiser l'usage des sols dans le cadre d'un projet de reconversion (Lecomte, 1995). Le site de Pompey, ancien complexe sidérurgique représentant plus d'un siècle d'activité industrielle lourde, est un cas d'école en la matière par la typologie des sols industriels qu'il propose et par les travaux dont il fait l'objet.

PRÉSENTATION DU SITE

Présentation historique

Dès la deuxième moitié du XIX^e siècle, l'industrie prend un essor considérable du fait de la progression des sciences et des techniques (Guillaume et Jigaudon, 1999). La Lorraine industrialisée dès 1820 n'échappe pas à cette dynamique générale et, parallèlement à l'industrialisation textile et papetière des vallées vosgiennes, la sidérurgie lorraine se développe dans de nouvelles proportions. Les entreprises sidérurgiques occupent les fonds de vallées à proximité des cours d'eau permettant le refroidissement des fours et le transport des matériaux nécessaires à la production. A Pompey, l'usine qui fabriquait les poutrelles de la tour Eiffel, constitue un exemple marquant de cette époque. Après un ralentissement de la production pendant les deux Guerres Mondiales, l'activité sidérurgique connaît donc un essor constant au début des 30 Glorieuses, et atteint son apogée en 1964 où 5200 salariés travaillent sur le site. Durant cette période de croissance, l'emprise industrielle s'étend progressivement dans le fond de vallée jusqu'à l'occuper presque intégralement. En outre, l'activité mute constamment afin de faire face à l'évolution des besoins et de la concurrence. L'usine se spécialise notamment dans la fabrication des aciers spéciaux.

Les restructurations puis le déclin de l'activité, amorcés depuis les années 60, s'accroissent au début des années 80, et les premières emprises sont libérées. Une dynamique de reconversion se met en œuvre face à l'urgence de la situation débouchant sur la création de nouvelles zones d'activités au fur et à mesure de la libération des espaces. En 1986, c'est l'arrêt définitif du site de Pompey et le démantèlement des principaux bâtiments et installations. Cette étape libère l'ensemble des emprises et notamment les deux plate-formes principales que sont le site de l'Usine et le site du Ban-la-Dame. La dynamique de reconversion s'intensifie avec l'engagement de réflexions et la réalisation d'études conduites par l'EPML en liaison étroite avec les collectivités et l'Etat afin d'analyser le site et de définir les conditions de son réaménagement. Ce processus aboutit à la réalisation d'importants travaux de remise en état comme la mise en œuvre de remblais, le reprofilage de la rivière et du crassier, les purges de fondations, les plantations, les réhabilitations et à la mise en œuvre sur les dernières plate-formes libérées d'une nouvelle zone d'activités, le Parc d'Activités de Nancy-Pompey. La réussite de cette opération n'aurait pu se concevoir sans une prise en compte, à tous les stades des réflexions et interventions, des spécificités des sols industriels et de leurs contraintes ou de leurs potentialités.

Présentation géographique

Le site s'étend en fond de vallée à la confluence de la Moselle et de la Meurthe sur le territoire de trois communes : Pompey, Frouard et Custines. Il se décompose en plusieurs unités géographiques : Usine, Ban-la-Dame, Pré à Varois, Chavanne-Delattre (*figure 1*), séparées les unes des autres par un canal de dérivation, la Moselle et la Meurthe. Ces sites accueillent les différents bâtiments et installations de l'activité sidérurgique, ainsi que des zones de dépôts des sous-produits et déchets de l'activité industrielle (bassin de décantation, crassiers). Des cartes du site de Pompey au XIX^e siècle avant l'industrialisation de la vallée, en 1980 lors de l'essor maximal du site et aujourd'hui avec les projets de reconversion sont représentées sur la *figure 1*.

Au nord, le site de Pré à Varois se présente comme un îlot de 40 hectares environ, compris entre la Moselle qui forme un large méandre et le canal. Il s'agit d'un crassier aménagé en plate-forme créée artificiellement par l'apport de matériaux issus de la

Figure 1 - Evolution du site de Pompey du XIX^e siècle à nos jours.

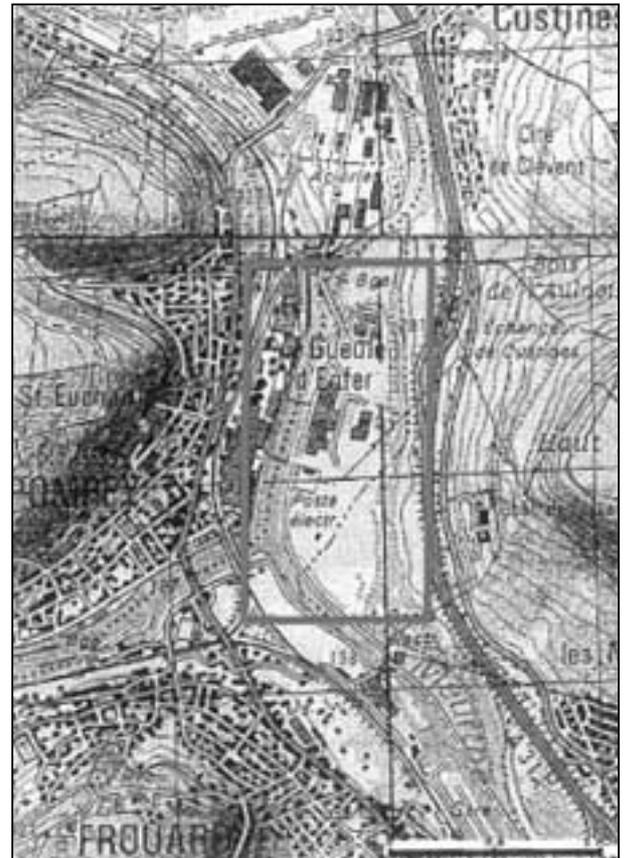
Figure 1 - Evolution of the industrial site of Pompey from the XIX^e century to now.

Le site de Pompey au XIX^e siècle avant l'industrialisation de la vallée



Carte de Cassini, réalisée au cours du XVIII^e siècle

Le site de Pompey en 1980 lors de son essor maximal



Fond de carte I.G.N.

sidérurgie sur le substrat originel.

Plus au sud, le site du Ban-la-Dame est une plate-forme surélevée d'une superficie de 45 hectares environ, de forme oblongue, située à la confluence de la Moselle et de la Meurthe. Cette zone est comme le site de Pré à Varois un crassier qui, en outre, a été le support d'un laminoir et d'un ensemble de bureaux de recherche.

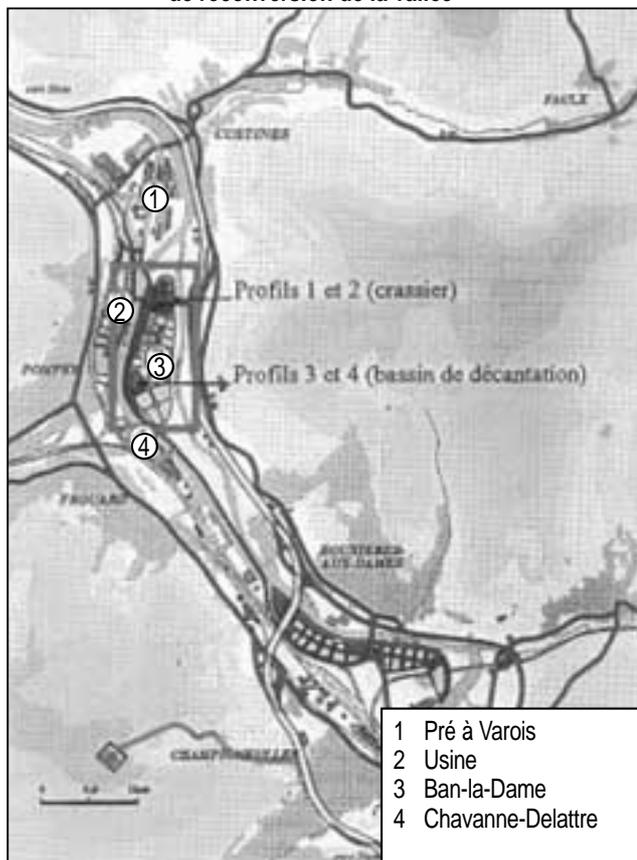
A l'ouest de la Moselle, le principal secteur industriel du site représente une zone de 29 hectares qui supportait l'usine (hauts fourneaux, usine à gaz, fonderie...) et qui se caractérise par un fort encombrement du sol par les fondations des anciennes installations. Un remblai y a été mis en œuvre pour permettre de nouvelles constructions et le passage de réseaux.

Au sud, sur la commune de Frouard, le site Chavanne-Delattre, d'une superficie de 9 hectares, qui a accueilli des activités de chaudronnerie, est également une surface plane présentant des caractéristiques similaires.

L'évolution du site de Pompey (figures 1 et 2)

En 1870, l'activité viticole dominante dans le village de Pompey s'estompe au profit de l'activité sidérurgique. Dès 1903, les bâtiments industriels se localisent entre la voie ferrée et la Moselle. La zone d'implantation permet aux industriels de bénéficier d'un espace plan à proximité de voies de communication diversifiées: le chemin de fer, le canal de la Marne au Rhin et la Moselle, et de ressources en eau de qualité (la Meurthe et la Moselle) indispensable pour la production sidérurgique. Le site de l'Usine est aménagé et les berges sont modifiées afin d'accueillir les bâtiments. A cette époque, le site de Pré-à-Varois est encore une prairie humide et inondable et celui du Ban-la-Dame est également un ensemble de pâtures inondables localisées de part et d'autre de la Meurthe. Les berges de la Moselle ont été partiellement consolidées depuis la construction du canal afin de favoriser la navigation. Quant à la Meurthe, elle forme de larges méandres dans le fond de vallée, le lit de la rivière évoluant au gré des différentes crues.

Le site de Pompey aujourd'hui et les projets de reconversion de la vallée



© Michel Le Moigne, cartographe - Metz

En 1950, la production d'acier augmente afin de répondre aux besoins de l'après-guerre. L'extension des activités sidérurgiques nécessite plus d'espaces et induit une consommation de terrains naturels. Le site de l'Usine est remanié pour absorber les nouvelles mutations de l'activité. Certains locaux sont démolis et cèdent la place à de nouvelles constructions. Chaque mètre carré disponible est ainsi exploité, aboutissant à un enchevêtrement de structures souterraines et aériennes. Les débris provenant de ces transformations servent de remblais, notamment pour l'aménagement du site de Pré-à-Varois utilisé comme crassier. Cette zone est progressivement transformée en plate-forme pour accueillir des ateliers. Le site du Ban-la-Dame est, lui aussi, l'objet d'un aménagement partiel dans la zone dite "la gueule d'enfer" (figures 1 et 2). Le cours de la Meurthe est alors dévié et ses berges sont partiellement aménagées pour maîtriser l'impact des inondations.

En 1960, l'entreprise sidérurgique atteint son apogée et la configuration des sites est modifiée en raison de l'évolution des

unités de production et de la réorganisation du travail. De nouvelles constructions sont érigées sur le site du Ban-la-Dame. La plate-forme s'étend de plus en plus vers le sud grâce à un apport complémentaire de remblais. Le sud de l'interfluve est exploité en gravière, un bassin de décantation est mis en place (figures 5 et 6). La pointe nord du site est délaissée pour réguler les inondations.

A la fin des années 60, les réorganisations de l'activité sidérurgique entraînent peu de modifications. Seuls, les aménagements dans l'axe de la vallée de la Meurthe, notamment l'autoroute A31, provoquent une modification du cours de la rivière qui est scindé en deux. L'espace compris entre l'ancien et le nouveau lit est alors exploité en gravière. Par ailleurs, la plate-forme du Ban-la-Dame est agrandie progressivement par le déversement de divers matériaux et déporte le lit de la rivière vers l'est.

Ultérieurement, l'extension s'effectue vers le sud. Le lit de la Meurthe est à nouveau déplacé au profit de remblais et de dépôts de déchets issus de l'exploitation. Le terrain est progressivement consolidé et utilisé jusqu'à la fermeture des usines sidérurgiques.

En 1986, le site de l'aciérie est définitivement arrêté. Les pouvoirs publics intensifient la dynamique de reconversion du fond de vallée et l'EPML entreprend, dans le cadre de la politique régionale de résorption des friches industrielles, la réalisation d'un programme de requalification du site.

Après le démantèlement des installations par la sidérurgie, l'EPML acquiert les terrains et lance plusieurs études qui permettent de mieux connaître l'état du site et d'engager dans un premier temps le recalibrage et la consolidation des berges de rivière ainsi que le remblaiement du site de l'Usine. Dans un second temps, des programmes de paysagement du site sont engagés (figure 2). Sauf quelques exceptions (bâtiments de bureaux), les bâtiments subsistants sont démolis et les fondations du laminoir du Ban-la-Dame purgées afin de rendre les terrains plus facilement constructibles. Le sol est ainsi une nouvelle fois modifié soit par l'apport de matériaux exogènes (pierre pour la consolidation, terre pour le talutage et le paysagement) ou par la transformation des matériaux endogènes de remblaiement issus du concassage des plates-formes en béton. Certaines zones, dont les bassins de décantation, ne sont pas remaniées du fait des risques induits par la nature et la contamination (éléments en traces par exemple) de leurs matériaux constitutifs (figure 8).

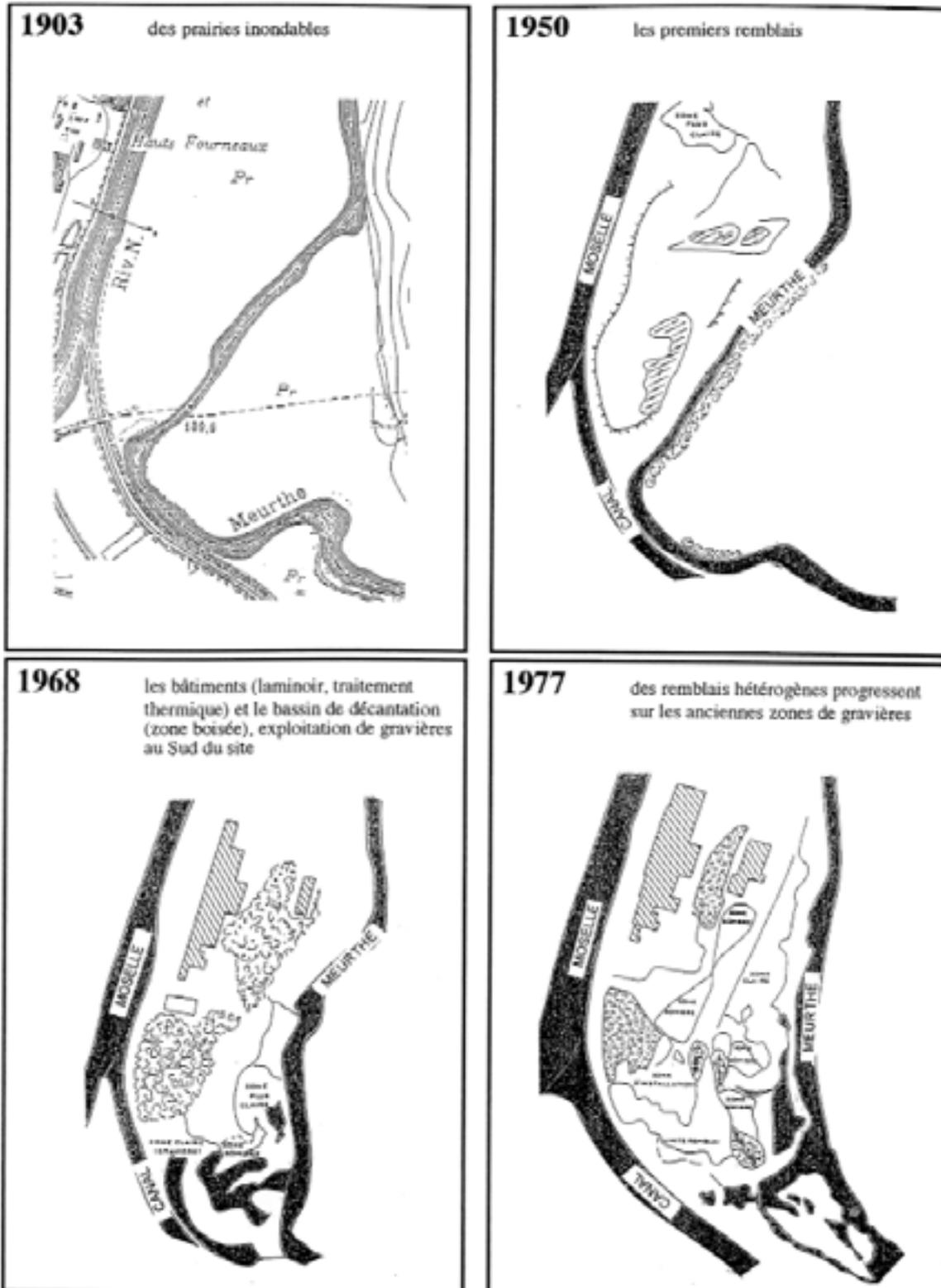
Après plusieurs années, le site s'est profondément transformé et offre un paysage différent développé sur un sol pour partie amendé ou purgé, qui se superpose au sous-sol constitué au cours de l'histoire sidérurgique (figures 3 et 4).

Les caractéristiques géologiques du site

Le substratum originel du fond de la vallée se compose de formations domériennes qui correspondent à des marnes à Amalthées en aval de la confluence et des grès médioliasiques en amont, constituant un seuil géologique à la hauteur de

Figure 2 - Evolution du site du Ban-la-Dame de 1903 à 1977 (source BRGM)

Figure 2 - Evolution of the site of Ban-la-Dame from 1903 to 1977



Custines. Une couche superficielle d'alluvions recouvre les formations originelles. Elle atteint une épaisseur variant de 6 à 7 mètres à proximité de Frouard et s'amenuise vers le nord jusqu'à devenir résiduelle sur le ban communal de Custines. Ces alluvions se composent pour l'essentiel de limons et de sables argileux sur une épaisseur de 5 mètres avec une couche inférieure de graves.

Sur le site de l'Usine, le sous-sol est presque intégralement artificiel et constitué de fondations du fait de l'intensité des constructions et des nombreux remaniements.

Sur le site du Ban-la-Dame et de Pré-à-Varois, le sol est constitué de différents remblais provenant de l'activité sidérurgique. Leur épaisseur varie de 10 à 13 mètres du nord au sud.

Sur le site du Ban-la-Dame, les remblais sont particulièrement hétérogènes, néanmoins des études géotechniques ont permis d'identifier les trois principales catégories de remblais :

- 1. les sous-produits de la sidérurgie :** laitier, crasse et sable de la fonderie qui constituent des masses homogènes et compactes
- 2. les fines de dépolluissage :** matériaux pulvérulents
- 3. les produits de décharge :** matériaux de démolition (briques, détritiques)

Leur organisation varie sur l'ensemble de la plate-forme en fonction des modes d'apports en déversement ou en superposition (*figure 4*). Chaque type de matériau se comporte différemment. Ainsi, les laitiers et les scories sont généralement compacts et offrent une bonne résistance mécanique, alors que les fines de dépolluissage offrent une résistance faible, variable de 0,4 à 1,2 Mpa, voire inexistante du fait de l'épaisseur des dépôts. Sur l'ensemble du site, les caractéristiques physiques des sols permettent généralement une portance suffisante pour envisager la construction de bâtiments et de viabilités. Cependant, la présence de laitier pris en masse rend difficile le creusement de fouilles et le passage de réseaux. Le site présente également des contraintes dues à la présence de débris divers, de blocs de béton (*figure 3*) et de culots de fonte dont la présence est difficilement repérable. De même, la faible résistance des fines de dépolluissage renforcée par un état de saturation en eau rapide aboutissent à une sensibilité aux vibrations et à un tassement des matériaux. Ces phénomènes rendent inconstructibles les parties de site concernées. Enfin, la spécificité chimique des sols est très variable. Les résultats des analyses de sols font remarquer la présence d'un certain nombre d'éléments en traces issus de l'exploitation sidérurgique comme par exemple le plomb.

EXEMPLES DE PROFILS DE SOLS SUR LE SITE DE POMPEY

A la suite de la préétude historique, des fosses ont été ouvertes sur le site, en deux endroits caractéristiques de l'activité industrielle antérieure : le crassier du Ban-la-Dame et un bassin

de décantation. Les figures 3, 4, 5 et 6 constituent des fiches descriptives détaillées des quatre profils pédologiques.

Le crassier constitue une plate-forme partiellement revégétalisée avec une strate herbacée, des arbres et des arbustes. En bordure de la rivière Meurthe, le crassier a été taluté et recouvert d'un matériau terreux. La quantité de terre exogène apportée est particulièrement importante au niveau des fosses de plantation d'arbres (*figure 3*). Les matériaux hétérogènes constitutifs du crassier sont recouverts d'un profil de sol reconstitué dont les horizons sont explorés par le système racinaire des végétaux. L'hétérogénéité verticale et horizontale des propriétés physiques et chimiques du sol doit très certainement influencer sur la dynamique de l'eau et des solutés. Le pendage des couches peut lui-même être variable selon le mode de déversement des remblais (*figures 3 et 4*). Lorsqu'il n'y a pas de couverture de terre arable d'apport (*figure 4*), on observe la genèse d'un mince horizon pédologique de surface qui reflète les caractéristiques des matériaux industriels sous-jacents.

Les deux profils observés au niveau du bassin de décantation (*figures 5 et 6*) mettent également en évidence la forte hétérogénéité de la qualité des matériaux et de leur répartition. Ils montrent cependant que sur matériaux tendres, malgré une teneur élevée en éléments en traces, les racines des plantes ont exploré le profil sur une profondeur de plus d'1 m. La couverture végétale dense a permis la constitution d'un horizon organo-minéral de surface de type mull de plus de 20 cm d'épaisseur.

CONCLUSION

Dans le domaine industriel, comme dans d'autres secteurs d'activités, la prise en compte de la seule fonction de production a souvent conduit à négliger le facteur sol et la préservation de ses qualités. Les sols industriels peuvent être profondément modifiés, tant sur le plan physique que chimique, par des excavations, mélanges, transports ou simplement par enfouissements sous des remblais de matériaux technologiques. Ces derniers sont souvent contaminés par des substances organiques et/ou minérales potentiellement toxiques. En milieux fortement anthropisés, les transformations multiples des sols s'accompagnent éventuellement de superposition des usages dans le temps et rendent ainsi imperceptibles les évolutions pédologiques naturelles. L'homme doit alors être considéré comme le facteur prédominant, voire unique, de la formation d'un sol. Dans ce contexte, le sol est défini à partir d'une conception élargie par rapport à la notion communément admise. L'acceptation de cette nouvelle approche se justifie par le fait que les sols ainsi modifiés sont amenés à remplir les principales fonctions attribuées aux sols naturels ou faiblement anthropisés.

Le recul ou l'abandon de mono-industries lourdes ont généré de nombreuses friches industrielles dont les sols fortement anthropisés sont peu étudiés. Une meilleure connaissance des

Figure 7 - Distribution verticale des éléments en traces sur le profil 1 : crassier, talutage de crassier

Figure 7 - Vertical distribution of trace elements on the profile 1 : slag heap and embankment slope

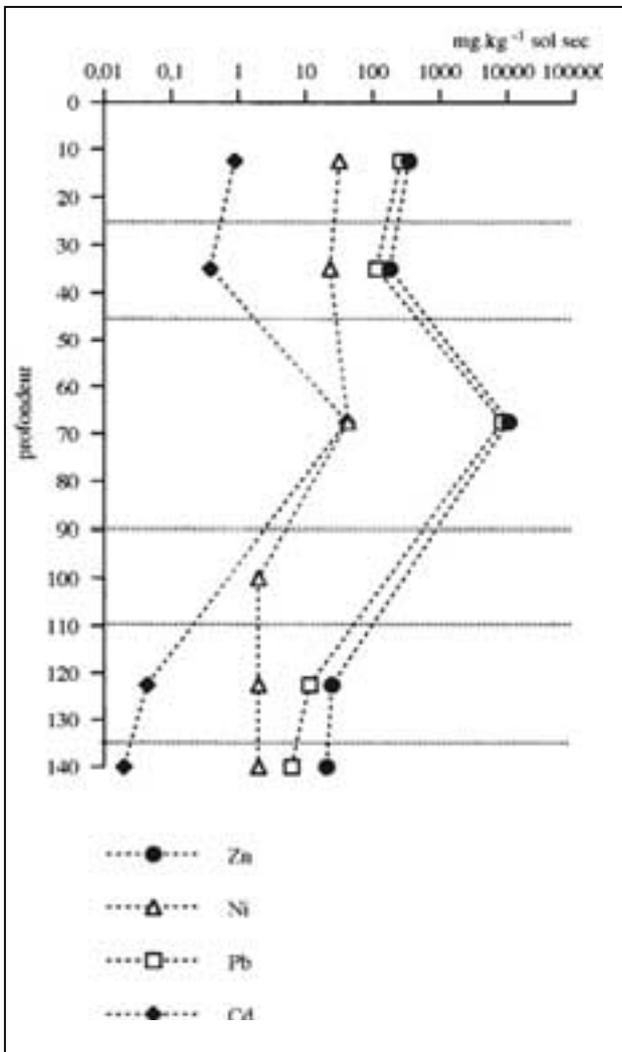
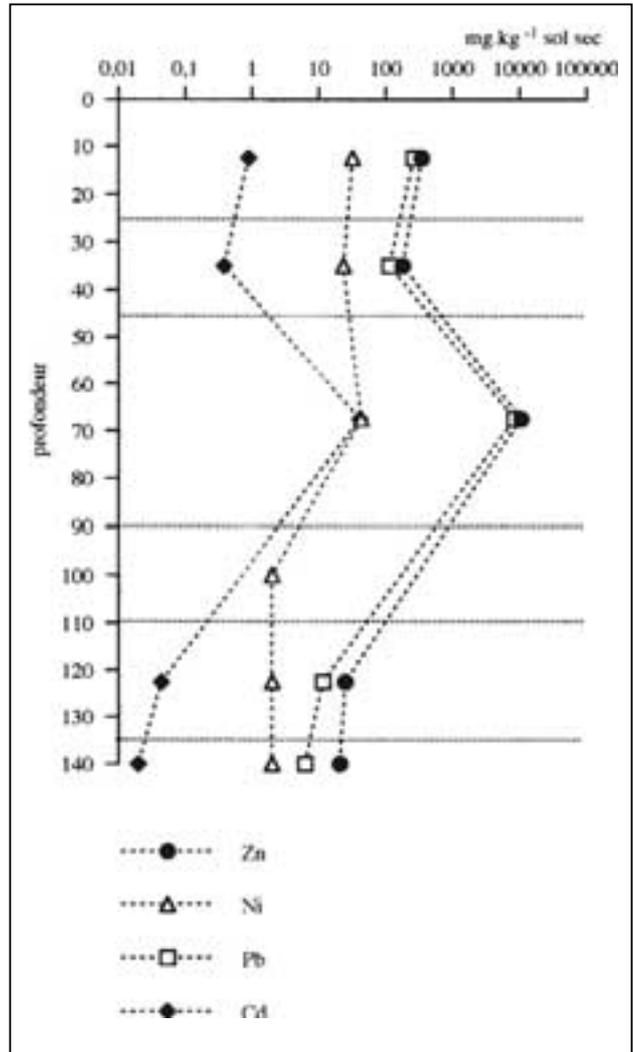


Figure 8 - Distribution verticale des éléments en traces sur le profil 3 : bassin de décantation

Figure 8 - Vertical distribution of trace elements on the profile 3 : deposition pond



sols s'impose alors par la volonté de requalification de ces surfaces abandonnées. Ces milieux présentent un certain nombre de caractéristiques spécifiques: variabilité des matériaux d'apport, caractère aléatoire de leur répartition et susceptibilité de présence d'éléments contaminants et d'objets hétéroclites. Le travail entrepris montre que la démarche pédologique classique est applicable moyennant un certain nombre d'adaptations. En particulier, la phase préparatoire doit être renforcée lors de la collecte des documents et renseignements. Le volet historique est fondamental, de façon à ne pas travailler à "l'aveugle" et à rendre pertinentes et efficaces les observations. Ainsi, fort de l'expérience acquise dans l'étude des sols anthropisés, le pédologue peut

contribuer efficacement à la caractérisation et à la typologie des sols urbains et industriels. Sur le plan pratique, un certain nombre de précautions doivent être prises lors de la réalisation des travaux de terrain. On tiendra en particulier compte de la stabilité et de l'hétérogénéité du matériau dans le dimensionnement et la forme des fosses. Les observations, caractérisations et interprétations seront conduites à la lumière des informations recueillies au cours de la phase préparatoire. Si certains critères pédologiques doivent être interprétés avec beaucoup de prudence comme par exemple des traces d'oxydo-réduction, d'autres comme la nature du substrat ou la succession et l'épaisseur des matériaux s'avèrent primordiaux eu égard aux problèmes de pol-

Figure 3 - Profil 1 - Crassier et talutage de crassier**Figure 3 - Profile 1 - Slag heap and embankment slope**

Matériau : remblai hétérogène constitué à partir d'un crassier remanié et mêlé à des produits de démolition ; apport d'une couverture terreuse en vue de reverdissement et d'un talutage du crassier.

Végétation : pelouse de graminées et plantation d'arbres (peupliers d'Italie).

Type de sol : Urbic Anthrosol (WRBSR) - Pararendzina (Allemagne) - Anthrosol artificiel et reconstitué (France).



- Matériau terreux de teinte brun foncé (10YR3/2), texture limono-argilo-sableuse, structure grumeleuse fine, réaction calcaire faible, foisonnement racinaire important, transition nette à limite ondulée.
- Matériau terreux de teinte brune (7,5YR4/3), texture sablo-argilo-limoneuse, structure à tendance particulaire, réaction calcaire faible, racines abondantes, transition nette à limite ondulée.
- Matériau technologique hétérogène de teinte, brun noir (10YR2/2), compact, réaction calcaire, enracinement encore important dans les premiers centimètres, puis absence de racines, transition brutale à limite régulière.
- Dalle de béton armé.
- Matériau technologique hétérogène de teinte brun noir (10YR2/1), compact, transition progressive.
- Matériau technologique sableux de teinte jaunâtre (10YR7/3), avec petites taches noirâtres, friable, de faible densité, réaction calcaire.

Prof. cm	pH	Granulométrie %			das	C %	N %	C/N	Complexe Absorbant cmol.kg ⁻¹					P ₂ O ₅ ‰	Fe ‰		CaCO ₃ %		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
		A	L	S					Ca	Mg	K	Na	CEC		total	libre	total	actif					
															élément total		mg.kg ⁻¹						
0-25	8,1	24,6	29,6	45,8	1,38	1,92	0,160	12,0	38,8	1,29	0,261	0,093	14,2	0,390	35,2	19,5	4,7	-	0,885	40,5	31,9	261,2	346
25-45	8,4	15,4	21,8	62,8	1,39	0,97	0,071	13,7	30,7	1,27	0,308	0,074	9,6	0,108	28,2	16,7	3,3	-	0,384	17,8	23,4	113,8	179
45-90	8,6	8,0	19,5	72,5	1,66	6,58	0,146	45,1	46,1	8,46	4,123	0,403	29,0	1,590	63,2	36,9	15,0	3,7	41,09	126	43,0	8460	10600
90-110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110-135	9,3	1,3	1,0	97,7	1,12	0,91	0,012	75,8	11,1	0,37	0,265	0,027	1,4	0,019	5,0	2,5	8,2	0	0,044	<2,0	<2,0	11,5	24,7
>135	8,8	1,4	2,9	95,7	1,14	0,73	0,005	146,0	42,0	1,51	3,231	0,557	14,5	0,017	5,9	2,9	12,2	1,0	<0,02	<2,0	<2,0	6,2	20,8

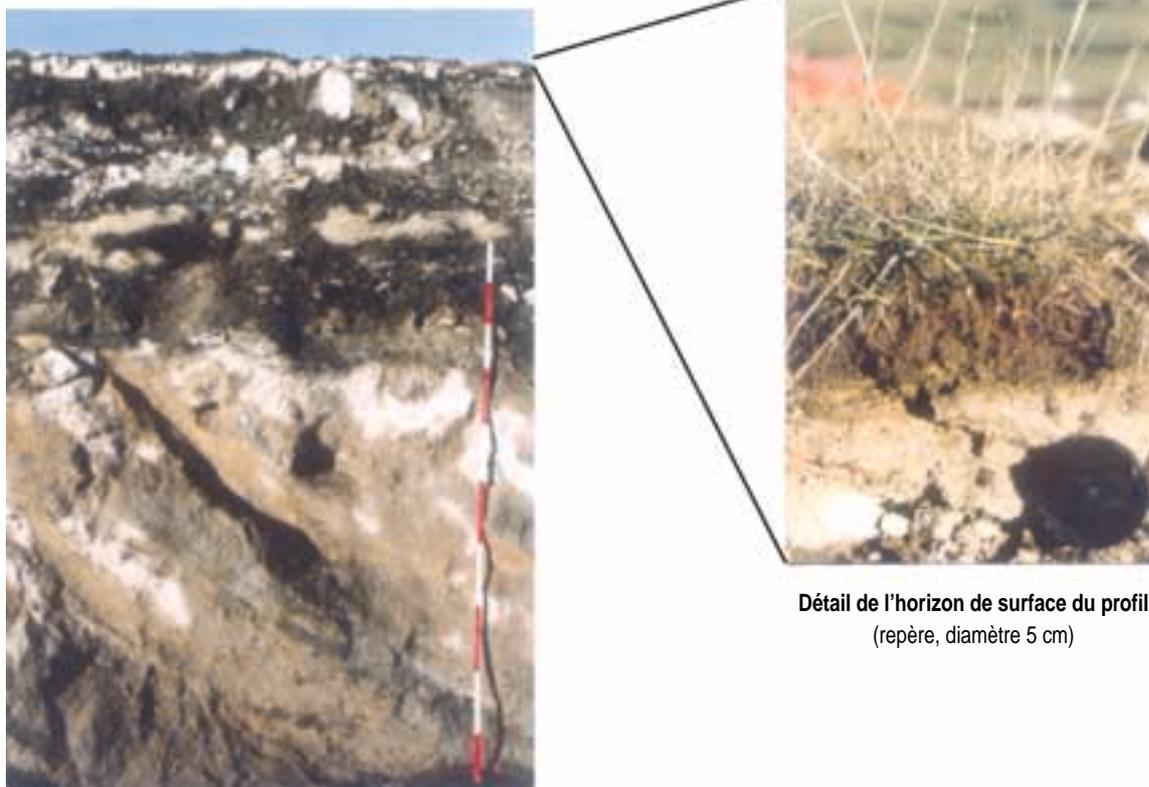
Remarques

- Reconstitution d'un profil de sol, respectant la succession des horizons (le plus humifère en surface) à partir de deux matériaux terreux
- Hétérogénéité des matériaux de remblais et de leur répartition dans le profil
- Variabilité horizontale et verticale des propriétés physiques et chimiques des matériaux :
 - compacité élevée de certains horizons par prise en masse de scories et laitiers,
 - friabilité et faible densité d'horizons sableux,
 - transition brutale matérialisée par une dalle de béton d'anciennes fondations, susceptible de modifier la circulation de l'eau et des éléments dans le profil,
 - teneur en éléments traces métalliques variables selon les horizons (pas d'enrichissement notable des matériaux terreux, teneurs élevées dans l'horizon 45-90 cm pour certains éléments).
- Limitation du développement racinaire à la partie terreuse du profil qui présente des propriétés physiques et chimiques favorables. Notons cependant la forte teneur en éléments fertilisants (P, K) de certains matériaux issus de l'activité industrielle.

Figure 4 - Profil 2 - Crassier**Figure 4 - Profile 2 - Slag heap**

Activité initiale : aciéries et usines métallurgiques - crassier

Photographie du profil



Détail de l'horizon de surface du profil
(repère, diamètre 5 cm)

Prof. cm	pH	Granulométrie			C %	N %	C/N	Complexe Absorbant					P ₂ O ₅ ‰	Fe		CaCO ₃		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
		%						cmol.kg ⁻¹						‰		%						
		A	L	S				Ca	Mg	K	Na	T		total	libre	total	actif					
0-6	8,5	4,6	19,6	75,8	2,31	0,109	21,2	41,3	2,16	0,486	0,067	11,8	0,211	122,1	87,6	16,4	2,0	1,082	39,0	112	161,6	321

Remarques

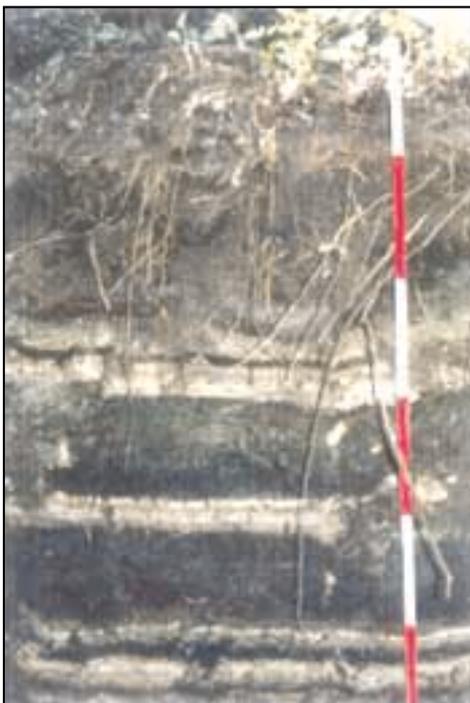
- zone de reverdissement,
- hétérogénéité des matériaux terreux et fosse de plantation,
 - remblais de matériaux,
 - remblais de déchets de l'activité industrielle similaires à ceux du profil 1,
- variabilité horizontale et verticale des matériaux et de leur qualité,
- pendage des couches lié au mode de déversement des remblais,
- genèse d'un horizon de surface sableux superficiel (6 cm) bien pourvu en éléments nutritifs, riche en fer, à C/N 21,2. Cet horizon de surface présente des caractéristiques différentes de celles des matériaux terreux d'apport du profil 1 et reflète davantage les caractéristiques du matériau artificiel sous-jacent (C et éléments en traces).

Figure 5 - Profil 3 - Bassin de décantation**Figure 5** - Profile 3 - Deposition pond

Matériau : bassin de décantation de fines de dépolluage de hauts-fourneaux.

Végétation : bouleaux, ronces et autres plantes herbacées pionnières.

Type de sol : Urbic Anthrosol (WRBSR) - Pararendzina (Allemagne) - Anthrosol artificiel (France).



Litière en voie d'humification (quelques centimètres).

Horizon humifère, d'épaisseur variable (20 à 35 cm) de teinte brun noir à l'état humide (10YR2/1), brun rouille à l'état sec (10YR4/4), structure grumuleuse avec enchevêtrement racinaire dense, réaction calcaire, transition nette, limite ondulée, boulets métalliques.

Alternance régulière de couches issues de la décantation progressive de déchets de la sidérurgie :

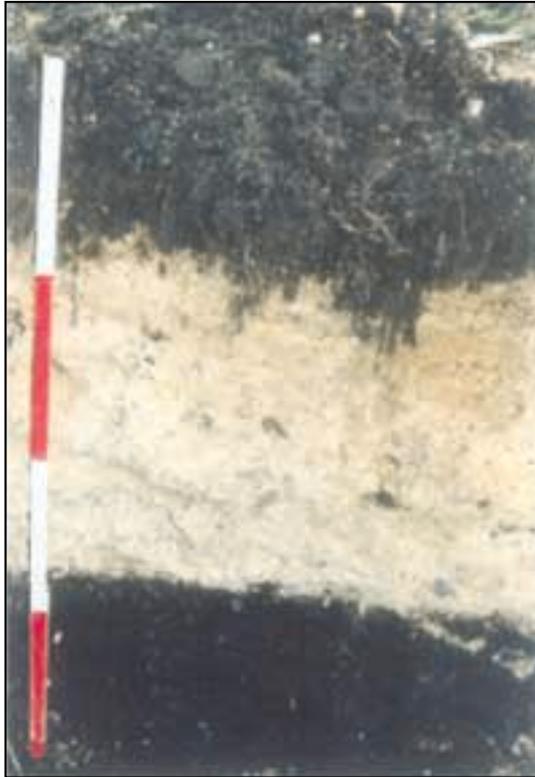
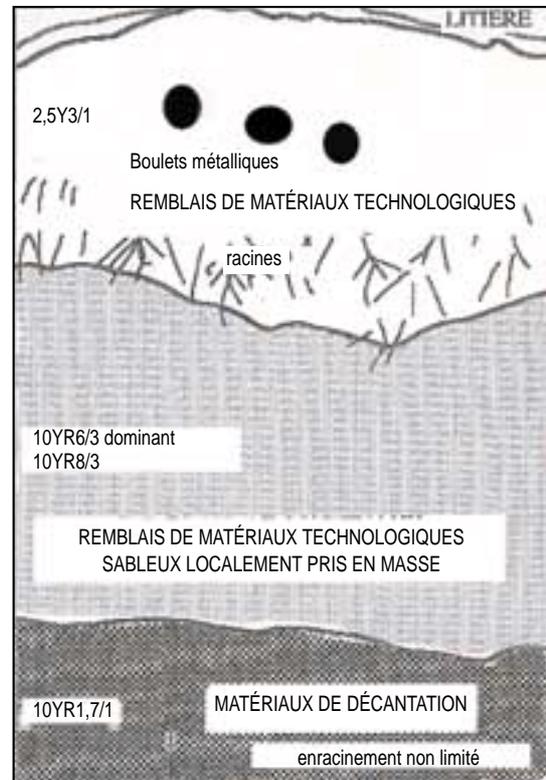
- couches noirâtres (2,5Y3/1), 10Y2/1) pâteuses à l'état humide, brun rouille (10YR4/4) et pulvérulentes à l'état sec, matériau de très faible densité,
- couches formées de lits minces consolidés de teinte grisâtre (gris clair à gris foncé 2,5Y6/1, 2,5Y3/1, 5Y4/1), structure schisteuse, matériau de faible densité.

Réaction calcaire et présence de racines sur l'ensemble des horizons observés.

Prof. cm	pH	Granulométrie			das	C %	N %	C/N	CEC cmol.kg ⁻¹	Mg	K	P ₂ O ₅ ‰	Fe ‰		CaCO ₃ %		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr		
		%											total		%								élément total	
		A	L	S									total	libre	total	actif							mg.kg ⁻¹	
0-20	8,3	11,5	56,8	31,7	0,66	4,37	0,291	15,0	52,0	8,8	4,98	0,194	59,2	37,3	9,8	-	147	284	58	42400	41750	141		
35-40	8,5	14,0	19,7	66,3		3,73	0,107	34,9	56,8	14,4	6,59	0,050	24,3	11,5	18,9	-	187	272	24	32500	63750	82		
40-55	8,6	22,1	31,8	48,6	0,54	2,48	0,080	31,0	53,2	15,6	9,20	0,014	84,4	62,8	22,4	-	33	234	28	51800	14620	78		
55-70	8,4	25,9	57,8	16,3	0,19	0,85	0,081	10,5	45,8	25,0	16,90	0,018	7,7	7,4	11,3	-	38	51	5	192	9900	<2		
70-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67	155	10	8100	26750	54		
80-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	43	9	78	13400	<2		
95-120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	86	225	20	13200	21200	53		

Remarques

- Variabilité verticale des matériaux et de leurs caractéristiques :
 - alternance de matériaux grisâtres à structure schisteuse et de matériaux pâteux noirâtres, très peu denses et à forte capacité de rétention en eau,
 - variabilité des teneurs en éléments traces métalliques selon les éléments et selon les horizons, avec des teneurs très élevées pour certains métaux.
- Faible stabilité de l'ensemble des matériaux, interdisant toute utilisation pour la construction.
- Formation d'un horizon humifère de surface structuré et développement racinaire sur une grande profondeur.
- Présence d'un couvert végétal dense, en dépit des fortes teneurs en éléments en traces.

Figure 6 - Profil 4 - Bordure de bassin de décantation**Figure 6 - Profile 4 - Border of a deposition pond****Photographie du profil****Croquis du profil**

Prof. cm	pH	Granulométrie			C %	N %	C/N	Complexe Absorbant					P ₂ O ₅ ‰	CaCO ₃		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	
		%						cmol.kg ⁻¹						total	libre							élément total mg.kg ⁻¹
		A	L	S				Ca	Mg	K	Na	T										
0-12	8,5	2,6	5,2	92,2	4,41	0,069	63,9	5,78	0,18	0,080	0,011	2,7	0,022	1,4	-	<0,5	387	1270	261,2	136	2900	
12-50	8,9	1,7	16,3	82,0	0,90	0,039	23,1	13,20	1,380	1,010	0,025	20,5	<0,002	14,5	-	<0,5	3,2	5,7	113,8	17	21,2	
50-75	8,5	11,9	67,0	21,1	2,21	0,180	12,3	16,06	9,530	2,130	0,088	53,0	0,131	11,8	-	136	316	42,6	8460	37600	83,7	

Remarques

- Végétation identique à celle du profil de bassin de décantation.
- Variabilité verticale des matériaux et de leur qualité.
- La situation en bordure de bassin de décantation laisse supposer que l'horizon 50-75, similaire aux horizons noirâtres du profil de bassin de décantation, a été recouvert par des matériaux technologiques de remblais. L'horizon 50-75 de ce profil a des caractéristiques physico-chimiques très proches de celles de l'horizon 0-20 du profil de bassin de décantation.
- L'horizon de surface 0-12 cm, brun noir, a une structure grumeleuse bien développée. Il présente une densité très élevée et une forte teneur en Cr.

lution ou de requalification de sites. Des déterminations analytiques spécifiques seront effectuées en relation avec les activités antérieures.

Dans l'exemple de la friche industrielle de Pompey des recommandations ont pu être apportées pour la requalification du site. Dans l'ensemble, les études ont conclu à la faisabilité d'une zone industrielle et précisent, selon la nature des sols, l'utilisation possible des différents secteurs en fonction des conditions de constructibilité. Les anciens bassins de décantation ont ainsi été classés en zones inconstructibles. En une quinzaine d'années, ces bassins ont été colonisés par une végétation herbacée et arbustive pionnière pour constituer aujourd'hui un couvert végétal adapté et dense. Le rôle de stabilisation et de confinement du site joué par les végétaux ne doit pas faire oublier les caractéristiques initiales de la zone. En effet, s'il n'y a pas extraction des polluants des sols, il existe toujours un risque de dissémination. Dans cette hypothèse, la requalification de la friche industrielle devra intégrer le suivi à long terme de la qualité des sols, des eaux et plus globalement de l'écosystème industriel et des écosystèmes agricoles et naturels avoisinants.

BIBLIOGRAPHIE

- Arbeitskreis Stadtböden der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 1988 - Aufgaben und Aufbau eines Konzeptes zur Stadtboden-kartierung. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 56, p.317-322.
- Baize D. et Rossignol J.P., 1992 - Anthrosols, in *Référentiel Pédologique* - A.F.E.S., INRA, Paris, p.87-89
- Barles S., Breyse D., Guillaume A. et Leyval C., 1999 - *Le Sol urbain* - Ed. Economica, Anthropos, Collection Villes, Paris, 278 p.
- Boulding R.J., 1994 - *Description and Sampling of Contaminated Soils: a field guide*, second edition - Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Bullock P. et Gregory P.J., 1991 - *Soils in the Urban Environment* - University Press, Cambridge, 174 p.
- Burghardt W. 1994 - Soils in the urban and industrial environments. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157, p.205-214.
- Florentin L., Schwartz C., et Morel J.L. 1998 - Pedology and industrial soils. In *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science*, Montpellier, France.
- Guillaume A. et Jigaudon, 1999 - Histoire industrielle. *In: Le Sol urbain*, Barles S., Breyse D., Guillaume A. et Leyval Eds. Economica, Anthropos, Collection Villes, Paris, p.23-43.
- Lecomte P., 1995 - Les sites pollués: traitement des sols et des eaux souterraines - Lavoisier, Techniques et Documentation, 198 p.
- Morel J.L., Florentin L. et Schwartz C., 1999 - Définition, diversité et fonction des sols urbains. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture*, 85,2, p. 141-152.

