

Université Badji Mokhtar-Annaba

Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

Master I

Pédologie

Option: Géologie ET ENVIRONNEMENT

Responsable de la matière : TOUMI faycal

Année 2020

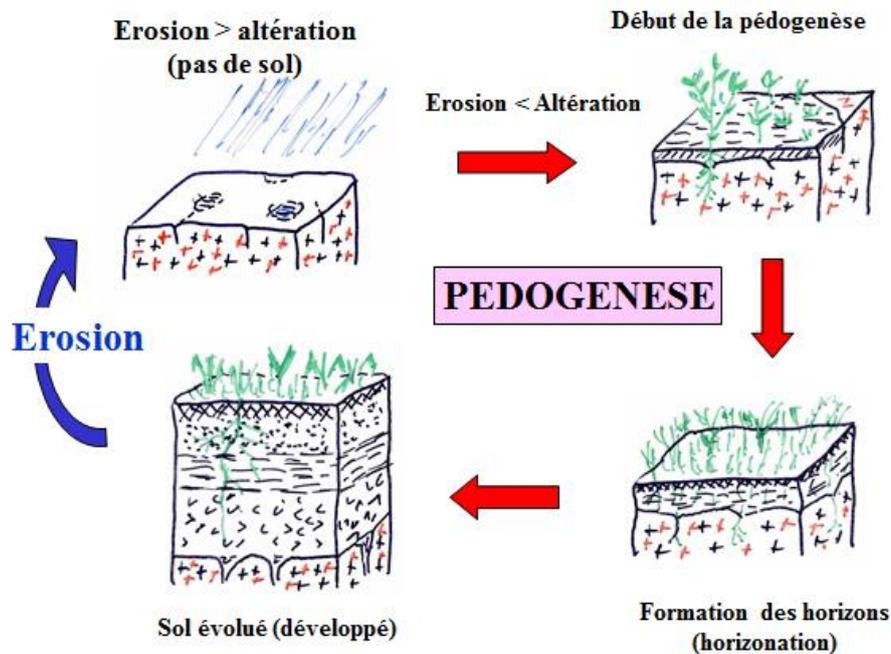
Master I
Géologie ET ENVIRONNEMENT
Matière : pédologie

Support du cours

- Définitions : pédologie, pédogénèse .sol.
- Les processus d'altération et formation des sols
- L'organisation morphologique des sols.
- Les constituants des sols
- Fond géochimique et pédogéochimique
- Contaminations des sols et gestion des risques
- Principes d'échantillonnages
- Méthodes d'analyse des sols

- La pédologie

La pédogenèse, (du grec pedon, sol, et de geneseôs, naissance) est l'ensemble des processus (physiques, chimiques et biologiques) qui, en interaction les uns avec les autres, aboutissent à la formation, la transformation ou la différenciation des sols..



-Formation des sols, constituants / Etude des sols

Le sol est une formation naturelle, un milieu organisé qui se transforme ... que la roche d'origine et un processus chimique (altération chimique principalement ...

L'eau, agent d'altération des roches

Au cours de l'altération, deux types de mécanismes entrent en jeu, dont le plus souvent les effets s'additionnent :

- **Les processus physiques ou mécaniques** avec désagrégation des roches et enlèvement des débris par un fluide, d'où la distinction entre les érosions éoliennes, fluviales, glaciaires, marines... Les actions purement mécaniques produisent des fragments qui sont à l'origine des roches détritiques.

- **Les processus chimiques** où l'eau joue un rôle prépondérant. Il s'agit d'altération et de dissolution par les eaux plus ou moins chargées en dioxyde de carbone. Cela donne des solutions de lessivage qui sont les sources de minéraux néoformés des roches d'origine chimique.

L'eau participe à une désagrégation mécanique des roches

Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches soumises à des variations de volumes incessants, une roche fissure puis éclate. L'eau qui pénètre dans les fissures puis gèle avec augmentation de volume ajoute son effet : les cristaux de glace s'accroissent perpendiculairement à la surface de la fente et augmente son ouverture. L'eau qui gèle dans une fissure exerce une pression de 14 g/cm². La roche finit par éclater sous l'action du gel : c'est la **cryofracturation**.

L'eau, un agent chimique d'altération

De par ses propriétés et son abondance relative, l'eau se trouve à la base de toutes les altérations exogènes des roches. Les molécules d'eau sont chargées électriquement et se comportent comme des dipôles. Les propriétés de l'eau vis-à-vis des minéraux s'expliquent essentiellement par cette propriété. Pure, elle se comporte comme un acide faible par les ions H⁺ libres qu'elle renferme

Les réactions mettant en jeu la molécule d'eau sont de différents types et ont lieu essentiellement en climat humide. Les éléments solubles qui en résultent sont lessivés et les parties insolubles restent sur place, se recombinaient pour former de nouveaux minéraux, principalement des argiles. Ces réactions sont :

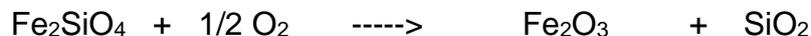
La dissolution

La dissolution est d'autant plus forte que la solubilité des minéraux est élevée, les plus vulnérables étant les minéraux des roches salines (sel gemme, potasse, gypse).

Les oxydations / réductions

Les oxydations concernent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.

Exemple pour un minéral d'olivine : olivine + oxygène -----> oxyde ferrique + silice.



Les réductions sont plus rares : elles se déroulent dans les milieux hydromorphes (saturés d'eau de façon permanente ou périodique) et produisent en particulier du fer ferrique au fer ferreux soluble.

L'hydratation

Il s'agit de l'incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés. Elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche. C'est le cas de la

Hornblende Plagioclases Ca-Na

Biotite Plagioclases Na

Feldspaths K

Muscovite

Très résistants

Quartz (zircon, tourmaline...)

L'olivine, et les péridots en général, sont les plus fragiles et s'altèrent fréquemment en *serpentine* (silicate hydrat de Mg et Fe). Les pyroxènes (ex : l'augite) donne une *amphibole verte*, l'ouralite. Les amphiboles (ex : l'hornblende) se transforment en minéraux fibreux dont l'*amiante*. La biotite prend un aspect mordoré puis donne plusieurs minéraux d'altération dont les *chlorites*, silicate d'Al et Mg hydraté, de couleur verte. La muscovite est moins altérable mais, par hydrolyse, donne des *vermiculites* ou hydromicas. Le quartz est quasi inaltérable, cependant il peut être légèrement soluble dans l'eau, surtout si elle est alcaline.

Les facteurs externes contrôlant l'hydrolyse

Ce sont avant tout les paramètres qui permettent de définir le climat.

- La disponibilité de l'eau. De ce fait, les réactions d'hydrolyse, par exemple, seront moindres sous climat sec.

- La température dont la valeur régit la vitesse des réactions ainsi que la possibilité de dissolution des ions dans l'eau. Ainsi, les réactions d'hydrolyse seront intenses et rapides sous climat tropical.

Le pH déterminé en particulier par la présence ou non d'acides organiques.

On peut citer aussi : le temps de contact, les concentrations, le drainage, la granulométrie.

- Altération et climat

Climat froid : L'altération mécanique par le gel joue le rôle majeur, la décomposition chimique est faible mais peut être active quand il y a une chaleur estivale.

D'autre part, il se développe un processus de chéluviation (entraînement des ions Al par des complexes organiques) qui conduit à un enrichissement du sol en silice.

Climat tempéré : Les facteurs d'altération sont très nombreux mais leur puissance assez faible.

Le gel n'intervient que l'hiver et joue un rôle important en altitude.

L'altération chimique joue un rôle important, surtout à l'intérieur du sol. En effet, on peut constater que les roches en relief et en contact avec l'atmosphère restent très peu altérées (ex : les mégalithes de toute nature que l'on trouve en Bretagne ou dans le Massif Central sont encore intacts après plusieurs millions d'années). Mais, cette forte résistance des roches à l'eau de pluie cesse si elles sont à l'état fractionné.

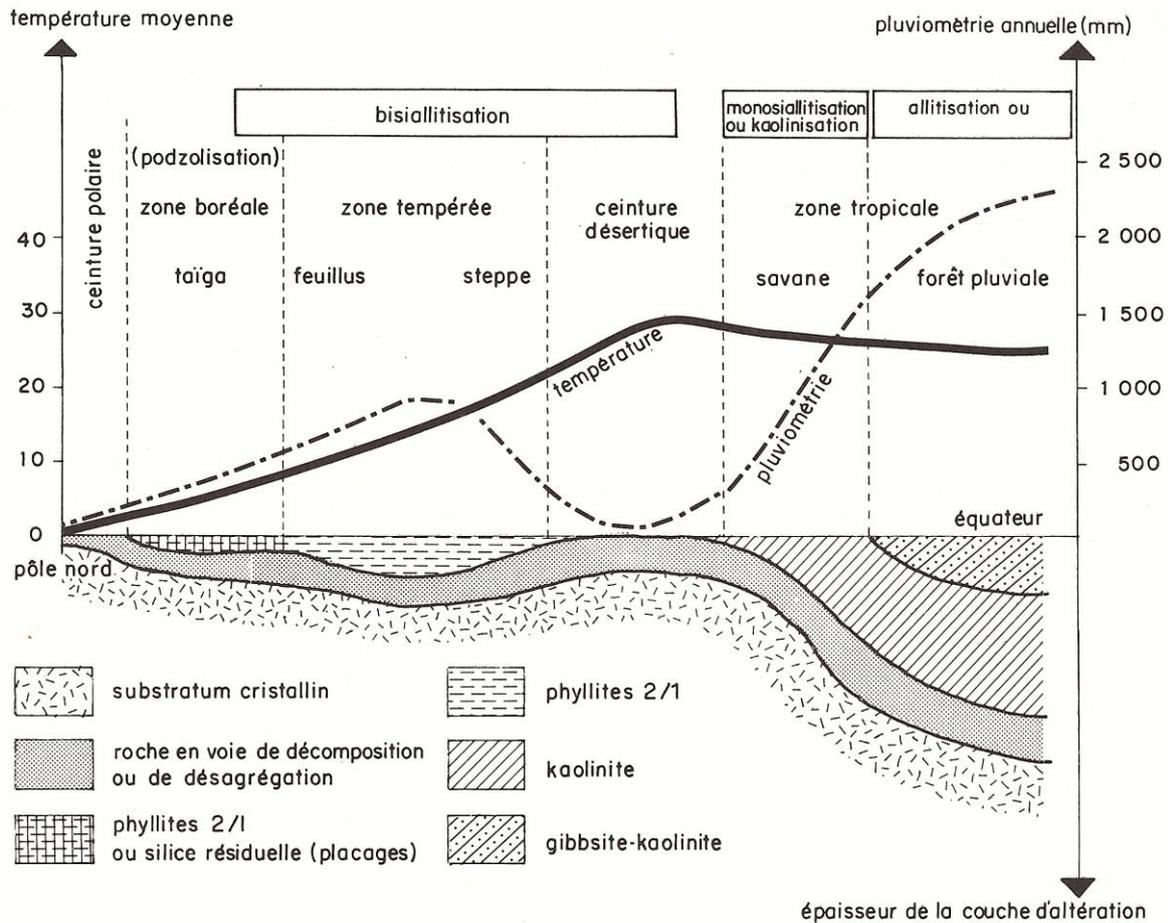
Climat chaud et sec : La fragmentation mécanique est faible mais la décomposition chimique est active après les rares pluies et entraîne une forte désagrégation des roches subissant des variations importantes de température et d'humidité. Au contraire du climat tempéré, ce sont les roches à l'interface lithosphère - atmosphère qui s'altèrent le plus vite.

En domaine désertique, l'érosion est essentiellement éolienne.

Climat chaud et humide : La désagrégation mécanique est très faible mais la décomposition chimique devient extrêmement active. Grâce à la température constamment élevée, la présence d'ions H^+ libres dans les eaux du sous-sol est 6 fois plus élevée que sous nos latitudes

L'épaisseur de la zone d'altération atteint son maximum dans de telles conditions climatiques. Elle peut atteindre plus de 100 m. Les phénomènes mis en jeu sont essentiellement la ferrallitisation. On assiste alors à un départ quasi total de la silice exportée dans les eaux de lessivage avec les alcalis et accumulation, sur place, d'hydrates d'alumine (ex : gibbsite $[Al(OH)_3]$, boehmite $[Al OH]$). Ces derniers peuvent se concentrer en concrétion ou constituer une cuirasse latéritique.

On peut résumer l'influence du climat sur les produits de l'altération par le schéma suivant :



- La formation des sols

Un sol est une couche d'altération recouvrant une roche. Il est formé d'une fraction minérale et de matière organique. Un sol prend naissance à partir de la roche puis il évolue sous l'influence des facteurs du milieu, essentiellement le climat et la végétation. L'originalité des sols résulte donc de l'association intime qui existe entre ses constituants minéraux et ses constituants organiques d'origine végétale et animale.

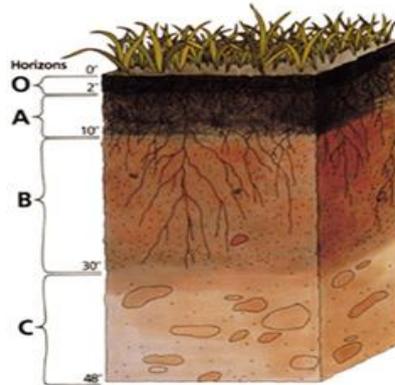
Qu'est-ce qu'un sol ?

Le sol apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées, les horizons, qui forment le profil pédologique. Sur une coupe de sol, ces horizons se distinguent essentiellement les uns des autres par des critères :

- de couleur qui traduisent des variations en quantité et en nature des constituants organiques et des oxy-hydroxydes de fer.
- de texture qui traduisent des variations de composition granulométrique.

- de structure qui traduisent des variations de mode d'assemblage des constituants minéraux et organiques.

Profil de sol



Les différents horizons d'un profil de sol

Le **profil de sol** est l'ensemble des *horizons* d'un sol donné ; chaque horizon étant une couche repérable et distincte de ce sol. On parle aussi de *solum* ou des *horizons du sol*.

Ces horizons sont d'autant plus distincts que le sol est évolué. En effet, la formation et l'évolution du sol sous l'influence des facteurs écologiques conduisent à la différenciation de couches de natures différentes plus ou moins parallèlement à la surface.

L'expression "profil de sol" est aussi utilisée en Agronomie pour parler du profil cultural, qui ne concerne que les sols cultivés.

Horizon O

C'est l'horizon organique (ou humus) dans lequel les débris végétaux s'accumulent à la surface du sol.

OL : Couche de feuilles ou d'aiguilles mortes, encore reconnaissables

Cette couche de feuilles peut être divisée en deux parties suivant la vitesse de décomposition :
•OLn : *feuilles de l'année* encore entières ; •OLv : *feuilles vieilles*, blanchies par un début de décomposition et commençant à être fragmentées.

OF : Couche de fragmentation dans laquelle les débris ne sont plus reconnaissables.

OH : Couche humifiée, absence de toute structure végétale reconnaissable à l'œil.

Horizon A

L'horizon A est par définition un horizon contenant à la fois de la matière organique et de la matière minérale. Dans quelques rares cas, il résulte principalement de la pénétration de la matière organique dans le sol sous forme de constituants solubles. Mais, en général, il est le résultat d'un brassage mécanique par les organismes vivant dans le sol (vers, insectes) ou bien matérialise l'intervention de la charrue dans le cas des sols cultivés.

Horizon B

C'est un horizon enrichi ou horizon *illuvial*. Il est enrichi en divers constituants, selon les cas: argile, fer, matière organique, carbonate de calcium, etc. Dans certains cas plutôt rares, il s'agit d'apports en provenance du haut du profil ou bien latéraux (ex: carbonate de calcium). Mais, bien souvent, il s'agit d'un enrichissement plus apparent que réel. Il résulte pour une part de la transformation *in situ* des minéraux primaires issus de la roche sous-jacente et encore présents dans cet horizon B (argilisation des micas, libération et oxydation du fer...), et d'autre part, il apparaît comme résultant d'un contraste lié au fait que l'horizon E sus-jacent est lui, réellement appauvri.

Au total il est distingué par sa couleur, sa structure, la nature de ses constituants, sa granulométrie.

Horizon S

C'est un horizon B peu évolué dans lequel on observe des changements de couleur et l'apparition d'une structure réellement pédologique remplaçant la structure originelle de la roche. Mais, il n'y a pas d'enrichissement net en argile ou autres matières.

Horizon C

C'est un horizon d'altération de la roche mère dans lequel la transformation de celle-ci reste limitée si bien que nombre de ses caractères originels (litage, schistosité, minéraux) sont encore très visibles. Mais l'évolution minéralogique a déjà commencé ainsi que les pertes de matière sous forme d'ions solubles.

Horizon R

Roche non altérée située à la base du profil. Elle est qualifiée de roche-mère dans le cas où elle est bien à l'origine du sol. Dans le cas contraire, celui-ci résulte d'un apport de matériaux par transfert latéral (ex: coulée boueuse) ou bien a une origine fluviatile ou encore éolienne.

Types de sols

Il existe un grand nombre de types de sols, parmi lesquels les sols bruns, les podzols, les sols hydromorphes (à gley ou pseudo-gley), les sols rouges, les sols isohumiques, les sols

ferralitiques, les sols ferrugineux. Voir la liste des sols ou la Classification française des sols pour plus de détails.

Fonctions

Les sols ont plusieurs fonctions. Ainsi, selon les critères du Service d'Information des Sols Africains (ASIS) du Centre International d'Agriculture Tropicale (CIAT), un sol est considéré comme sain lorsque il parvient à la fois à ⁵:

- héberger un écosystème,
- produire des récoltes,
- stocker le carbone et l'azote de l'atmosphère,
- retenir les eaux de pluie et de ruissellement.

Le sol a aussi un rôle très important dans la dispersion et la dégradation des polluants.

Sol et cycle de l'eau

Des fonctions nouvelles lui sont reconnues dont un rôle majeur dans le cycle de l'eau, pour la santé publique (cf. sols pollués) et des écosystèmes, ainsi qu'une importance dans les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du potassium, du calcium, du phosphore, des métaux. Les sols de qualité limitent les risques d'érosion et de salinisation.

Sols et puits de carbone

Le protocole de Kyoto a mis en avant l'importance du sol comme *puits de carbone*, surtout en zone tempérée. Les enjeux sont très importants, car le CO₂ émis par les microbes constitue l'essentiel du flux de dioxyde de carbone (CO₂) émis de la surface du sol vers l'atmosphère ¹, et le second flux de carbone terrestre le plus important. Les plantes émettent du CO₂ la nuit, mais la plupart du temps très largement compensé par la photosynthèse le jour ¹.

la fonction *Puits de carbone* est encore mal cernée car elle varie fortement dans l'espace et dans le temps, selon les conditions biogéographiques, agro-pédologique, voire de pollution du sol. La respiration du sol est facile à mesurer localement, mais ses variations locales et saisonnières rendent les bilans globaux difficiles. De plus, aucun instrument de télédétection ne peut aujourd'hui la mesurer à l'échelle de vastes territoires.

Des modèles doivent donc être construits sur la base d'extrapolations, *calés* et vérifiés avec les données du terrain. À ce jour, les modèles, et les études de terrain, laissent penser qu'un réchauffement climatique, même d'un ou deux degrés devrait fortement perturber le cycle du carbone ¹.

Le bilan respiratoire du sol et son évolution commencent à être mieux approchés. Le bilan correspond à la somme des flux de CO₂ et de vapeur d'eau libérés par le métabolisme des microbes, des animaux du sol, des racines des plantes et des

champignons du sol. Une méta-analyse (Nature, Mars 2010 ¹) a porté sur 439 études. Sur la base des 50 années de données d'émissions des sols étudiées sur 1.434 points de données répartis sur toute la planète, les auteurs ont conclu que les sols du monde entier ont encore augmenté leurs émissions de CO₂ entre 1989 et 2008, probablement à cause d'une augmentation de l'activité microbienne induite par la température et l'eutrophisation et d'une dégradation des humus. Les changements de comportements du sol sont lents, mais se traduisent par des effets globaux très significatifs ; L'expiration vers l'atmosphère des organismes du sol a augmenté d'environ 0,1 % par an ("0,1 Pg C/an") de 1989 à 2008, pour atteindre en 2008 environ 98 milliards de tonnes de Carbone ("98 ± 12 pg C"), soit 10 fois plus de carbone que les humains injectent dans l'atmosphère annuellement selon cette méta-analyse. Le réchauffement est le facteur explicatif qui semble dominant, via l'accroissement des taux et vitesse de décomposition de la matière organique du sol, selon le biogéochimiste Eric Davidson ⁶. Les auteurs ont à cette occasion posé les bases d'un observatoire mondial de l'expiration des sols, appuyé sur une base de donnée jumelée à une base de donnée météorologique historique, de haute résolution⁷. Des données déjà disponibles, après prise en compte des moyennes climatiques annuelles, de la surface foliaire, des dépôts d'azote et changements de méthode de mesure du CO₂, se dégage une tendance à l'augmentation, avec des flux de CO₂ effectivement corrélée aux anomalies de température (anomalies par rapport à la moyenne des température de la période 1961-1990) de température de l'air. Il reste à différencier la part du Carbone anthropique issu de l'atmosphère et reperdu, et celle anormalement perdue ou émise par la matière organique du sol suite à une dégradation de processus pédologiques. Ce CO₂ ajoute ses effets à ceux du méthane qui semble également en augmentation à partir des pergélisols. Une très petite part du CO₂ exprimé par les sols peut aussi provenir de bactéries méthanotrophes (Ce CO₂ la serait en termes de bilan moins "nuisant" pour le climat, puisque le méthane a à court terme un effet bien plus *réchauffant*. Les auteurs de la méta-analyse concluent des données disponibles qu'elles sont compatibles avec une accélération en cour du cycle du carbone terrestre, en réponse au changement climatique.

L'importance du sol comme puits de carbone (et pour la biodiversité, notamment pour les sols prairiaux et forestiers) est mieux reconnue ; Une conférence européenne a rappelé en 2001 l'importance des relations entre puits de carbone et biodiversité.

Enjeu pour la lutte contre l'effet de serre : selon le groupe de travail du Programme européen sur le changement climatique (PECC) consacré aux puits de carbone liés aux sols agricoles, les sols agricoles de l'UE présentaient à eux-seuls un potentiel l'équivalent de 1,5 à 1,7 % des émissions de CO₂ de l'Union européenne, potentiel qui devra peut-être être revu à la baisse avec le réchauffement

- **Constituants des sols**

La fraction minérale

La fraction minérale représente l'ensemble des produits de la dégradation physique puis chimique de la roche mère.

On peut les classer par diamètres décroissants :

les sables

les limons

l'argile granulométrique.

Tous ces éléments constituent le « squelette » du sol.

La fraction organique

La matière organique du sol peut être définie comme une matière carbonée provenant de la décomposition et du métabolisme d'êtres vivants végétaux, animaux, fongiques et microbiens. Elle constitue l'humus.

Elle est composée d'éléments principaux (le carbone-C, l'hydrogène-H, l'oxygène-O et l'azote-N), d'éléments secondaires (le soufre-S, le phosphore-P, le potassium-K, le calcium-Ca et le magnésium-Mg, ainsi que d'oligoéléments).

Elle se répartit en 4 groupes :

la matière organique vivante, animale, végétale, fongique et microbienne, qui englobe la totalité de la biomasse en activité,

les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats), animale (déjections, cadavres), fongique et microbienne (cadavres, exsudats) appelés «matière organique fraîche»,

des composés organiques intermédiaires, appelés matière organique transitoire (évolution de la matière organique fraîche),

des composés organiques stabilisés, les matières humiques ou humus, provenant de l'évolution des matières précédentes.

La végétation fournit des débris végétaux qui constituent la litière ou horizon OL. Sa décomposition se fait sous l'action de la microflore et de la faune du sol, et produit l'humus et des composés minéraux. Les deux processus sont d'une part la minéralisation (produisant les composés minéraux tels que le dioxyde de carbone (CO₂), l'ammoniac (NH₃), les nitrates et les carbonates) et l'humification (polymérisation en composés organiques amorphes qui migrent ou se lient aux argiles et aux hydroxydes métalliques). Le processus d'humification aboutit à la formation de l'humus.

En milieu peu actif, la décomposition des litières est lente, l'horizon organique OH est brun noir, fibreux et acide. On parle de mor ou terre de bruyère.

En milieu biologiquement plus actif, l'horizon OH est moins épais et constitue un moder.

En milieu biologiquement très actif, la décomposition est très rapide, l'horizon OH disparaît et apparaît un horizon A grumeleux, composé d'agrégats argilo-humiques à fer et aluminium. On parle de mull.

-Texture du sol

La **texture d'un sol** correspond à la répartition dans ce sol des minéraux par catégorie de grosseur (en fait, diamètre des particules supposées sphériques) indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. La texture du sol ne tient pas compte du calcaire et de la matière organique.

Classement des particules

Les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre : blocs, galets et graviers (diamètre > 2mm) sont classés à part.

La granulométrie proprement dite concerne la terre fine

Sables : > 63 μm

Limons : de 63 μm à 2 μm

Argiles : < 2 μm

Ces roches appartiennent au groupe des silicates ou des carbonates.

Des ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- ...) arrivent dans le sol en solution dans l'eau infiltrée, ou fixés aux particules colloïdales citées ci-dessus.

D'autres ions, comme les sulfates (SO_4^{2-}) ou les ions iodures (I) sont apportées par les précipitations atmosphériques.

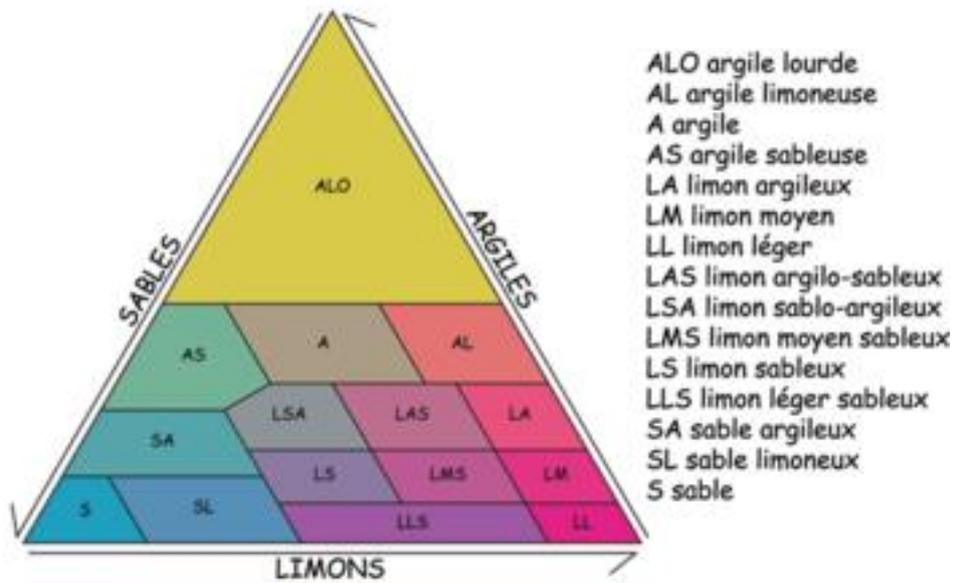
Les particules colloïdales chargées négativement peuvent se présenter à l'état dispersé ou floculé.

À l'état dispersé, les particules se repoussent en raison de leur polarité, et occupent tous les interstices du sol. Ce dernier devient asphyxiant, et l'eau ne s'y infiltre plus. Le sol est difficile à travailler.

À l'état floculé, les particules colloïdales sont neutralisées par les ions chargés positivement, et s'agglutinent avec ceux-ci. Les flocons formés laissent un sol lacunaire, perméable à l'eau et à l'air. C'est un sol avec une bonne structure.

Classification des textures

Cette classification est représentée à l'aide d'un triangle, appelé **triangle des textures**, dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile.



Il existe de nombreux triangles de texture. Celui-ci représente la carte des sols de l'Aisne à 15 classes.

Il est possible de regrouper les textures en quatre classes fondamentales, qui permettent de définir les principales propriétés du sol :

texture sableuse : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.

texture limoneuse : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et calcium.

texture argileuse : sol chimiquement riche, mais à piètres propriétés physiques ; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines ; travail du sol difficile, en raison de la forte plasticité (état humide), ou de la compacité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en partie ces propriétés défavorables.

texture équilibrée : elle correspond à l'optimum, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.

Exemple de granulométrie favorable à la culture : 20 à 25 % d'argile, 30 à 35 % de limons, 40 à 50 % de sables.

Éléments traces dans les sols Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles

Introduction

Conventionnellement, les éléments traces (ou éléments en traces) sont les 80 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre continentale, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6% du total, alors que les 12 éléments majeurs interviennent pour 99,4 %. Fer, aluminium et manganèse sont les éléments majeurs les plus souvent analysés. Lorsque les éléments traces sont des métaux (par exemple Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), ils sont nommés « éléments traces métalliques » (ETM).

Famille pédogéologique

Plusieurs « séries de sols » peuvent être rassemblées en une seule «famille pédogéologique » dans la mesure où elles ont subi la même pédogenèse agissant dans un même matériau parental et qu'elles ont donc connu les mêmes processus de concentration ou de redistribution à partir d'un même héritage géochimique. Chaque famille pédogéologique peut être caractérisée par des fourchettes de concentrations en ETM étroites.

La demande sociétale

Dans le cadre de la nouvelle réglementation entrée en vigueur récemment, de nombreux bureaux d'études cherchent à se procurer des données relatives aux concentrations usuelles en éléments traces mesurées dans les sols qu'ils appellent soit « fonds géochimiques » soit « valeurs de bruit de fond ». Ces informations sont recherchées afin de servir de valeurs de référence locales.

En effet, le ministère en charge de l'environnement a modifié récemment sa politique de gestion des sites et sols potentiellement pollués (MEDAD, 2007). Les lignes directrices de cette nouvelle politique ont été publiées en février 2007, introduisant la démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM).

Afin de « distinguer les situations qui ne posent pas de problème particulier de celles qui sont susceptibles d'en poser et donc de faire l'objet de mesures de gestion appropriées», cette démarche nécessite de comparer« l'état des milieux [c'est-à-dire l'état des sols et des eaux du site industriel faisant l'objet de l'étude] à l'état des milieux naturels voisins de la zone d'investigation... ».

Il est donc explicitement demandé de se référer à l'état des sols « naturels » voisins pour distinguer la part de la contamination des sols propre à l'installation industrielle de celle qui préexistait avant son fonctionnement, liée à d'autres sources, sans oublier la part naturelle initiale. Malheureusement, en contexte industriel ou péri-urbain, il est bien difficile de trouver des « sols naturels » situés à proximité et pédologiquement comparables. D'où, le plus souvent, la tendance à se référer à des sols qui semblent relativement peu contaminés : les sols agricoles avoisinants.

Par ailleurs, les services santé-environnement des directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS) sont souvent sollicités pour des avis concernant la reconversion d'anciens sites industriels en projets d'aménagements urbains (écoles, lotissements, *etc.*).

La gestion de ces projets passe par un diagnostic de l'état de contamination du site, notamment par les éléments en traces métalliques (ETM) et non métalliques (par exemple l'arsenic) et la comparaison des concentrations mesurées dans ces sols à des valeurs de référence.

En l'absence de valeurs de références réglementaires en France, les experts s'accordent sur la nécessité d'établir des référentiels à partir des « concentrations usuelles mesurées dans les sols », appelées communément « bruits de fond ». Toutefois, il n'existe pas de base de données qui

fournisse ces valeurs à différentes échelles géographiques, par exemple départementale ou régionale. En outre,

Cette notion même de « bruit de fond » n'est pas claire (cf. ci-dessous).

Pour pallier cette situation, la Cellule interrégionale d'épidémiologie (CIRE) d'Île-de-France s'est Rapprochée en 2005 de l'INRA d'Orléans afin de savoir quelles données analytiques relatives aux ETM dans les sols étaient disponibles et de proposer aux DDASS de cette région administrative

Des valeurs seuils pour les sols franciliens au-delà desquelles un polluant potentiel doit être pris en Compte dans l'évaluation des risques. Cette démarche, appliquée initialement en Île-de-France, a été ensuite appliquée en région Centre (Mathieu *et al.*, 2008).

Il existe donc un double besoin :

- de clarification des concepts et de définition des différents termes ;
- de savoir quelles données analytiques relatives aux ETM sont accessibles, où on peut les trouver Et ce que l'on peut raisonnablement en faire. Le présent article va tenter de répondre à cette double attente.

- Fond géochimique

Il y a la composition chimique initiale du matériau géologique. Dans les roches plutoniques, volcaniques ou métamorphiques, divers minéraux ont cristallisé et certains peuvent être particulièrement chargés en éléments traces (par exemple la chromite, l'olivine, la garnièrite). Les teneurs en éléments traces des roches sédimentaires et des alluvions dépendent largement des roches érodées en amont et transportées ensuite par les cours d'eau. Ensuite, les compositions initiales des matériaux géologiques peuvent être localement très modifiées par des minéralisations post-formation ou post-sédimentation. Ces minéralisations peuvent donner lieu à des gisements miniers plus ou moins facilement exploitables. La composition chimique finale des roches, résultant de toute leur histoire géologique sur des millions d'années, définit le fond géochimique

- Fond pédogéochimique naturel

Le fond pédogéochimique naturel (FPGN) est la concentration d'un élément chimique dans un sol résultant des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine (Baize, 1997).

Le FPGN, pour un élément donné, dépend d'abord étroitement de la composition du matériau géologique dont le sol est issu (dit alors matériau parental ou roche-mère). Mais ensuite, au fur et à mesure de l'action des processus pédogénétiques, le FPGN va se distinguer du « fond géochimique » local initial et se diversifier, verticalement et horizontalement, d'un horizon à un autre en fonction du jeu relatif des altérations et lixiviations, des migrations, des redistributions et des éventuelles concentrations de matières. Ainsi, dans les cas des sols les plus « vieux » et les plus différenciés, les fonds pédogéochimiques naturels peuvent devenir très différents des fonds géochimiques de départ, particulièrement dans certains horizons très appauvris ou, au contraire, dans des horizons où divers métaux s'accumulent.

Quels territoires ?

Les fonds géochimiques et les fonds pédogéochimiques naturels (valeurs moyennes ou médianes,

gamme de variation) n'ont de sens que rapportés explicitement à un territoire plus ou moins grand : écorce terrestre, continent, faciès de roches dans une région donnée (on parle alors de « fond lithogéochimique»)

Plus le territoire considéré va être grand, plus il est probable qu'il va englober une grande variété de roches et de sols et plus la notion de fond pédogéochimique naturel va perdre de son étroitesse et de son intérêt pratique. Il arrive parfois que la variabilité des teneurs en un élément trace soit aussi grande à l'échelle d'une parcelle agricole qu'à l'échelle d'un petit bassin versant entier.

Mais il n'en va plus de même quand on passe de l'échelle locale (exploitation agricole, « série de sols ») à l'échelle d'une région (Bourgogne, Jura, Bretagne) ou à celle d'un pays dans son ensemble : plus le territoire est grand, plus les fourchettes de valeurs s'élargissent et moins elles peuvent servir à l'interprétation ou à la prédiction.

- Teneurs agricoles habituelles (TAH)

Les horizons de surface des sols agricoles ne permettent pas d'évaluer les fonds pédogéochimiques naturels, puisqu'ils sont touchés par des contaminations diffuses (apports liés aux pratiques agricoles, épandages, retombées atmosphériques d'origine lointaine) de plus ou moins grande ampleur.

En règle générale, en zones rurales, les quantités apportées par les activités humaines sont faibles ou très faibles par rapport aux stocks naturels initiaux. Font exception cependant à cette règle (tabl.1) le cadmium et le mercure (Baize *et al.*, 2001 ; Baize *et al.*, 2006 b), car les stocks initiaux sont toujours très petits, ainsi que le cuivre en zones de vignobles, suite à de nombreux traitements par des sels de cuivre pour lutter contre l'oïdium.

Tableau 1. Ordres de grandeurs des concentrations (en mg/kg) mesurées dans les sols en certaines circonstances.

	Horizons de surface labourés			
	Sols «naturels» (forêts)	Sols agricoles «ordinaires»	Après épandages massifs de boues très chargées en ETM (années 70)	Sous vignes ou arboriculture

Cd	< 0,12	0,20 à 0,45	1,4 à 3,5	
Cu	10 à 15	12 à 18	20 à 40	50 à 600
Hg	< 0,05	0,03 à 0,05	0,10 à 1,4 *	

*De même en zones périurbaines et péri-industrielles.

Les teneurs agricoles habituelles (TAH) sont les gammes de concentrations observées le plus fréquemment dans les horizons de surface des sols agricoles soumis à des pratiques agricoles « usuelles », en l'absence de pollutions ou contaminations majeures (industrielles ou minières). Cette notion intègre donc une notion statistique de fréquence. Mais où se situe la limite entre pratiques agricoles « usuelles » et pratiques « inhabituelles » ou « excessives » ?

- Bruit de fond

Le terme « bruit de fond » (en anglais « *background* ») est souvent employé dans la littérature traitant des éléments traces dans les roches ou les sols mais la signification exacte de ce mot n'est ni claire ni constante.

L'idée de bruit de fond est assez proche de la notion d'arrière-plan. Dans tous les domaines où l'on réalise des mesures, où l'on capte des signaux, le « bruit » ou « bruit de fond » est une perturbation indésirable qui se superpose au signal utile. Un signal significatif se détache plus ou moins bien sur un bruit de fond aléatoire, généralement considéré comme parasite.

Pour les géologues miniers, le signal intéressant recherché ce sont les roches minéralisées correspondant à de fortes anomalies positives par rapport à un fond géochimique local ou régional. Les roches non minéralisées dites « stériles » ou « mort-terrain » constituent pour eux un bruit de fond sans intérêt.

Au contraire, si on s'intéresse aux contaminations et aux pollutions des sols, celles-ci sont le signal que l'on étudie et qui se superposent au fond pédogéochimique qui est l'arrière-plan naturel. Mais cet arrière-plan n'est pas aléatoire : il est hautement déterminé par la nature et la composition initiale de la roche, par le type et la durée de la pédogenèse, *etc.*, il est donc structuré spatialement. Enfin, lorsqu'on veut connaître le niveau de pollution du sol en un site par comparaison avec la composition naturelle initiale, celle-ci n'est plus un simple arrière-plan mais le phénomène étudié, le signal qui nous intéresse. C'est l'incertitude analytique qui devient alors le bruit de fond aléatoire. C'est pourquoi nous recommandons d'éviter l'usage du terme « bruit de fond » et de faire référence explicite, selon les cas, aux notions de fond géochimique, de fond pédogéochimique ou de teneur agricole habituelle.

-Intérêt de déterminer les FPGN et les TAH

Les sols sont susceptibles de transférer une certaine fraction de leurs constituants (naturels ou Anthropiques) soit vers les plantes (phytodisponibilité), soit vers les eaux superficielles ou profondes (mobilité), soit par absorption directe de terre (géophagie) ou de poussières.

La détermination des FPGN à l'échelle locale (parcelle agricole, unité typologique de sol) est un préalable nécessaire pour évaluer l'état de contamination des sols étudiés. Une caractérisation approfondie des sols (pH, capacité d'échange cationique ou CEC, carbone, calcaire, granulométries, abondance des oxydes de fer ou de manganèse) est également nécessaire pour estimer les risques de transferts.

Alors que la détermination des FPGN est presque toujours possible pour les sols forestiers et pour les horizons profonds des sols agricoles, elle n'est plus possible pour les horizons de surface labourés qui ont reçu des quantités variables d'éléments traces via des fertilisations, amendements, épandages et retombées atmosphériques. Pour ces horizons labourés, seule la notion de « teneur

agricole habituelle » (TAH) est opérationnelle.

Même en l'absence de carte des sols, la reconnaissance au champ du type de sol autorise une expertise ponctuelle pour tout échantillon que l'on sait appartenir à une série de sol ou à une famille pédogéologique déjà bien caractérisée au plan pédogéochimique. Ainsi, une valeur de 1,75 mg de cadmium /kg mesurée dans un Néoluvisol issu de loess du Vexin peut être interprétée Comme une contamination notable alors que, mesurée dans une « terre noire » de la plate-forme sinémurienne en Auxois, cette même valeur correspond essentiellement à l'héritage naturel (Baize,1997).

On parvient ainsi à faire la distinction quantitative entre le métal d'origine naturelle et ce qui a été ajouté par les activités humaines d'où la possibilité d'une première estimation des dangers éventuels vis-à-vis de la santé humaine et de notre environnement. La détermination des FPGN locaux permet en outre de ne pas déclarer « pollué » (avec les graves conséquences socio-économiques ou

financières qui pourraient en découler) un terrain dans un contexte de fortes anomalies naturelles.

En cas de besoin, elle permet de fixer des objectifs de dépollution réalistes et pertinents, adaptés au contexte pédologique et géologique.

Cette connaissance locale peut en outre permettre une extrapolation spatiale : passer d'une connaissance acquise à l'échelon local à une connaissance applicable à l'échelon régional, et ce sans perdre la précision de l'information. Cette démarche est basée sur l'hypothèse que si certains territoires ont exactement le même matériau parental (même unité litho-stratigraphique), la même « histoire » (évolution pédogénétique), la même position dans le paysage et présentent donc le même solum, alors les sols de ces territoires ont toutes chances de présenter les mêmes constituants, les mêmes comportements, les mêmes fonctionnements et les mêmes aptitudes et contraintes à telle ou telle utilisation humaine.

Appliquée aux concentrations en éléments traces, cette démarche doit permettre de dessiner des cartes pédo-géochimiques en utilisant des cartes pédologiques suffisamment détaillées préexistantes.

Une estimation satisfaisante des teneurs naturelles en ET peut ainsi être obtenue à faible coût, grâce à un échantillonnage optimisé et un petit nombre de répétitions, en se basant sur une bonne connaissance préalable des sols, à la fois typologique et cartographique (Baize et Roddier, 2002).

Méthodes analytiques pour la détermination des teneurs en ETM dans les sols

Deux méthodes normalisées sont couramment utilisées dans les laboratoires français pour mettre en solution les éléments traces métalliques avant leur dosage :

– la première allie l'acide fluorhydrique (HF) à l'acide perchlorique (HClO₄). Elle est définie selon la norme NF X 31147 de juillet 1996 ; les résultats ainsi obtenus sont désignés comme « teneurs totales » ou « teneurs HF ».

– la seconde, dite « à l'eau régale » (ER), associe l'acide nitrique (HNO₃) à l'acide chlorhydrique (HCl). Elle est définie par la norme NF ISO 11466 de juin 1995 ; les teneurs ainsi obtenues sont

Désignées comme « teneurs pseudo-totales ».

La méthode HF a été préférée par l'INRA parce qu'elle peut être considérée comme une méthode

Véritablement totale, ne posant de ce fait aucune difficulté d'interprétation. Elle est capable de dissoudre

Les silicates, minéraux dominants dans l'énorme majorité des sols, qu'il s'agisse de minéraux

primaires (quartz, feldspaths, micas, ferromagnésiens) ou de minéraux secondaires résultant de l'altération des précédents (minéraux argileux). En revanche, la méthode à l'eau régale n'est pas capable de dissoudre l'ensemble des silicates et fournit, de ce fait, pour un même échantillon de sol, des valeurs nettement plus faibles, notamment pour le chrome, le nickel et le plomb. Les concentrations en cadmium obtenues par les deux méthodes sont sensiblement identiques.

On notera qu'il existe d'autres méthodes d'analyses « totales », souvent utilisées par les géologues :

celles par fusion alcaline et celles par fluorescence X.

Les bases de données disponibles relatives aux éléments traces dans les sols

À ce jour, en France, il n'existe que quatre bases de données (tabl. 2) dont une est seulement de portée régionale.

La base de données Aspitet

Élaborée de 1993 à 1997, elle a été complétée en 2002 (Baize, 1997 et 2000). Le fer et le manganèse totaux ont été analysés systématiquement, en plus de dix éléments en traces. Certains résultats sont accessibles sur le site : <http://etm.orleans.inra.fr/>

La collecte nationale Anademe

Elle a été réalisée en 1997 et 1998. Des traitements statistiques et spatiaux ont été effectués selon

des découpages par départements ou par « régions agricoles » (Baize *et al.*, 2006a, chap. 7).

Elle est disponible à l'adresse :

http://www.gissol.fr/programme/bdetm/_rapport_anademe/rapport/contents.php

Tableau 2. Bases de données relatives aux teneurs totales et pseudo-totales en éléments traces dans les sols de France.

Programme	Nombre de sites	Nombre d'horizons	Agriculture (A) ou forêt (F)	Surface (S) ou profondeur (P)	Méthode de mise en solution (3)	Localisation	Critères de sélection des sites	Éléments traces analysés	Gestionnaire
Aspitet 2002	1200	1876	A et F	S et P	H et F	Moitié nord de la France	critères divers dont recherches	As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Tl, Zn	INRA Science du Sol Orléans
Collecte nationale Anademe 1998	11161	11161	A	S	HF et ER	France entière	plans d'épandage de boues	Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Pb, Se, Zn	Infosol Orléans
Référentiel pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais	267	768	A et F	SP	HF	Région Nord-Pas-de-Calais	matériaux parentaux et types de sols	As, Bi, Cd, Cr, Co, Cu, In, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Se, Tl, V, Zn	ISA Lille et INRA Arras
Réseau de mesure de la qualité	1921	3724	A et F	S (1) et SP (2)	HF	France entière	aux mailles d'une grille de	Cd, Cr, Co, Cu, Ni, Pb,	Infosol Orléans

des sols							16 x 16 km	Tl, Zn	
-----------------	--	--	--	--	--	--	---------------	--------	--

(1) Au 10 janvier 2008 ; (2) SP = horizons semi-profonds (30-50 cm) ; (3) HF = acide fluorhydrique ; ER = eau régale.

Conclusion

Il faut désormais bien distinguer les fonds géochimiques (qui ont fait l'objet d'études par le BRGM sur une bonne part du territoire), les fonds pédogéochimiques et les teneurs agricoles habituelles.

Ce sont là des concepts différents correspondant à des milieux (roches ou sols) et à des niveaux de

contamination divers. Le terme « bruit de fond », trop obscur, doit être abandonné.

Il faut également toujours bien préciser à quels territoires ces valeurs de référence s'appliquent.

Désormais, en France, on commence à disposer d'informations nombreuses sur les teneurs totales

en ETM (au moins les sept les plus analysés : Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn) dans les sols agricoles

et forestiers. Ces informations, quoique souvent mal réparties dans l'espace et relativement peu

nombreuses (vu la grande variété des sols français), deviennent progressivement accessibles au

public grâce à des publications (rapports, articles) et à des résultats mis en ligne. Mais ces bases de données sont encore insuffisantes car la plupart ne permettent que d'accéder aux teneurs agricoles habituelles. Rares et incomplètes sont celles qui, grâce à l'analyse des horizons profonds, permettent d'accéder aux fonds pédogéochimiques naturels locaux

- CONTAMINATION DES SOLS ET GESTION DE RISQUES

La pollution des sols est un élément perturbateur pour de nombreux écosystèmes. Ses effets sont de plusieurs ordres, à savoir différés ou immédiats, mais aussi indirects ou directs.

Le degré de gravité de la pollution des sols est variable. Il dépend de plusieurs facteurs, comme :

- la nature du sol, qui peut impacter, selon les cas, sur la diffusion des métaux ;
- les risques de transmission d'éléments pathogènes suite au transport de terre ;

- le niveau de dégradabilité de chaque élément perturbateur/polluant ;
- la capacité même du polluant à impacter de quelque façon que ce soit le fonctionnement de la biosphère ou d'un écosystème.

- Pollution des sols : quelles causes

Tout comme le degré de gravité des différentes pollutions, les causes d'une pollution des sols sont extrêmement diverses. Les pollutions sont recensées dans un registre dédié après avoir été cartographiées. Les causes d'une pollution des sols peuvent être liées à :

Une activité : elle peut être industrielle ou agricole. Mais il peut aussi s'agir d'une guerre, de la pratique sportive, de loisirs, ou encore de certaines catégories d'accidents.

Un polluant, à savoir :

- les explosifs,
- les éléments chimiques employés dans le domaine militaire,
- les pesticides,
- le goudron,
- les acides,
- les hydrocarbures,
- le chrome,
- les phtalates,
- les radionucléides,
- les huiles minérales,
- le cyanure,
- etc.

- Indicateurs de toxicité ou qualité des sols

Les besoins d'évaluation environnementale, d'études d'impact et l'application d'écotaxes ou du principe pollueur-payeur nécessitent des indicateurs de pollution reconnus par tous, et si possible normés.

Un exemple d'unité retenue en France est le métox, mais uniquement pour huit polluants de type métaux et métalloïdes (arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc). On parle aussi d'*équivalent toxique*, d'*équivalente dioxine*...

Les bio-indicateurs ;

Quand ils existent (ex. : plantes nitrophiles, métallophytes..., faune du sol, ou animaux consommant cette faune), ils donnent des indices de degré de pollution du sol, par exemple en eutrophisants ou certains éléments-trace métalliques ; L'étude de l'impact d'un polluant

relève du domaine de l'écotoxicologie et de la pédologie. Il reste cependant difficile de mesurer l'impact de polluants multiples agissant en synergies.

Quelques organismes animaux du sol sont déjà utilisés comme bio-indicateurs. Leurs vitesses de croissance et leurs capacités reproductives (deux paramètres importants de viabilité des espèces et des écosystèmes) sont affectés par la pollution. Ils sont faciles à suivre, mais cela demande un protocole de quelques semaines à mois, mais ils sont encore limités, n'appartenant qu'aux deux embranchements des arthropodes (Collemboles et Coléoptères) et des annélides (vers de terre et Enchytraeidae pour les sols plus acides), avec respectivement deux normes visant à évaluer la toxicité aiguë [vers de terre (ISO 11268-1) et larves de coléoptères] et 3 normes portant sur l'évaluation d'effets sublétaux des contaminants du sol, *via* leurs effets sur la reproduction (vers de terre, Collemboles, Enchytraeidae).

L'escargot semble être un indicateur intéressant, pour l'évaluation de la teneur en chrome bio-assimilable d'un sol par exemple ou de pesticides organophosphorés. L'AFNOR travaille en 2011 à plusieurs projets de normes, dont un projet de norme PR NF EN ISO 15952 /Qualité du sol - Effets des polluants vis-à-vis des escargots juvéniles (Helicidae) - Détermination des effets sur la croissance par contamination du sol (soumis à enquête et consultation du public jusqu'au 28 févr. 2011)

- **Diagnostic initial d'un site pollué- Étude historique et documentaire**

Le diagnostic initial s'articule selon les éléments suivants :

- une étude historique et documentaire (étape A) ;
 - des investigations complémentaires de terrain (étape B) ;
 - une évaluation simplifiée des risques, qui sera réalisée sur la base des informations collectées lors de l'étude documentaire et, dans la plupart des cas, sur la base des résultats d'investigations de terrain.
- #### - **Mise En Œuvre Du Plan de Gestion**

Le plan de gestion est mis en œuvre dans trois cas de figure :

- lors de la cessation d'activité d'une installation classée avec ou sans changement d'usage ;
- pour les projets de réhabilitation d'anciens terrains industriels hors installations classées ;
- lorsqu'une incompatibilité entre l'état des sites et des milieux et leur usage aura été identifiée à l'issue de la démarche d'IEM.

Le plan de gestion porte donc sur le site à proprement parler. Néanmoins, lorsqu'une incompatibilité entre l'état des milieux à l'extérieur du site et leurs usages est mise en évidence, le plan de gestion pourra s'étendre en dehors dudit site.

- **OBJECTIFS DU PLAN DE GESTION**

L'objectif du plan de gestion est de rendre le site compatible avec les usages présents ou envisagés en intégrant les spécificités du site et de son environnement, les caractéristiques du

projet de réaménagement ainsi que les différentes options de remédiation potentielles. Il doit donc permettre de déterminer les différentes options de gestion .

Pour se faire, il convient de se remémorer les différentes mesures de gestion que l'on peut considérer : action sur les sources de pollution, action sur les transferts ou action sur les cibles.

La stratégie des mesures de gestion d'un site pollué doit se concevoir comme suit :

- maîtrise de la source de pollution :
 - Travaux de réhabilitation (enlèvement total ou partiel de la source),
 - Confinement ;
- maîtrise du transfert :
 - Dans les sols, les gaz des sols, les eaux souterraines et superficielles, au niveau des bâtiments (mesures constructives...)
- modification des aménagements : changement...
- PRINCIPES DU PLAN DE GESTION

D'une manière générale, le plan de gestion doit être d'une ampleur proportionnée aux pollutions et à leur étendue. Ainsi, quelle que soit la nature des polluants, lorsque les volumes de terres polluées en cause sont concentrés, limités en volume et accessibles, le bon sens conduit à dépolluer cette source et non à s'engager vers des études lourdes et coûteuses qui devraient aboutir finalement à cette option de gestion.

Par ailleurs, dans le cadre de pollutions accidentelles, les actions curatives doivent se placer dans une logique de réparation, en vue de remettre, autant que faire se peut, le site dans son état initial.

Les mesures de gestion envisagées sont évolutives, itératives, interactives et progressives.

En effet, en fonction de l'acquisition des données et du projet, il convient de confirmer, d'améliorer ou d'infléchir le plan de gestion du site au fil du temps ou d'adapter le projet de réaménagement. Aussi, l'ensemble du plan de gestion repose-t-il sur un aller-retour entre :

la connaissance des milieux ;

L'acquisition de connaissance sur les populations, sur les ressources naturelles à...

- ANALYSE DES ENJEUX

Définition

La gestion d'un site ou d'un milieu pollué est essentiellement fondée, à partir de l'état des lieux, sur une appréciation des enjeux qui lui sont spécifiques. L'analyse des enjeux consiste à identifier puis à évaluer de manière approfondie l'impact (ou les effets) d'une pollution issue d'un site, mais également d'un projet de réhabilitation sur un usage, une fonction, un territoire ou un milieu naturel au regard de considérations de santé et de sécurité publique, de développement public, de qualité de la vie, de préoccupations écologiques, voire patrimoniales et paysagères. Cette démarche intègre aussi des aspects économiques et sociaux. Le plan de gestion d'un site est donc la résultante de cette réflexion ; il doit permettre de répondre à ces trois questions :

- Quels sont les enjeux liés à l'activité du site ou du projet de réhabilitation ?
- Quels sont les impacts potentiels ou avérés du site ou du projet de réhabilitation sur les enjeux identifiés ? et, existe-il une compatibilité entre l'état du site ou des milieux avec leurs usages...
- Analyse des enjeux sanitaires
- Analyse des enjeux sur les ressources en eau
- Analyse des enjeux sur les ressources environnementales
- Analyse des enjeux sur les biens matériels
- Analyse des autres enjeux

MAÎTRISE DES SOURCES DE POLLUTION

Délimitation des sources

Pour évaluer la pertinence des actions de maîtrise des sources à mettre en œuvre, il faut, dans un premier temps, avoir identifié la nature, le volume et le type de source à gérer. Le diagnostic du site, au travers de l'étude historique et de prélèvements sur le terrain, permet d'identifier, de localiser et de caractériser les sources et la typologie des pollutions à l'origine des atteintes des milieux.

Préalablement à toute action, les réponses aux questions suivantes doivent être fournies :

- Toutes les sources (potentielles) de pollution ont-elles été prises en compte ?
- Le maillage des investigations est-il assez fin ? si nécessaire, les différents milieux physiques ont-ils été pris en compte ?
- Les zones les plus contaminées sont-elles reconnues ?
- L'étendue des sources de pollution est-elle précisément connue (incertitudes horizontale, verticale, hautes eaux, basses eaux, hétérogénéité des sols, cheminement préférentiel) ?
- Quel gain en termes de relargage (alimentation) représente le fait...

MAÎTRISE DES IMPACTS

La maîtrise des impacts ne sera envisagée qu'en seconde approche, une fois qu'il aura été démontré que l'enlèvement de la source de pollution (partielle ou totale) n'est pas possible.

Délimitation des impacts

Une fois la source de pollution délimitée, son impact sur tous les milieux devra être évalué :

- étendue précise de l'impact de la source de pollution (incertitudes horizontale, verticale, hautes eaux, basses eaux, hétérogénéité des sols, cheminement préférentiel) ;
- évolution dans le temps (maximum atteint...) ;
- concentrations amont, aval, au droit en dehors du site ;
- en ce qui concerne les eaux souterraines et superficielles :

Potentiel de relargage de la source de pollution (percolation, lixiviation...),

Dégradation (formation de sous-produits/métabolites) ;

- en ce qui concerne les gaz :

Source de gaz,

Taux d'émission (ou/et taux de production),

Concentration, quel gaz et...

- DÉFINITION DES SCÉNARIOS DE GESTION ET BILAN COÛTS/AVANTAGES

Les différents scénarios de gestion sont une combinaison :

- de dépollution de la source et de l'impact : il faut déterminer jusqu'à quelle concentration il faut dépolluer (quelles sont les performances intrinsèques de techniques ?). Ceci sous-tend de maîtriser suffisamment les techniques pour pouvoir estimer ses avantages et inconvénients (limites, applicabilité, coûts, temps, taux d'abattement) ;
- de mesures constructives : étanchéification des dalles, aération naturelle, ventilation forcée... ;
- d'analyse des risques résiduels (ARR) prédictive : les expositions finales doivent être considérés comme acceptables ;
- de potentialités d'action sur les usages des milieux : servitudes sur certaines parties du site.

Tous ces scénarios doivent être pris en compte dans le schéma conceptuel, dénommé modèle de fonctionnement prédictif dans le cadre du plan de gestion.

Le bilan coûts/avantages consiste à comparer les différents scénarios de réhabilitation les uns par rapport aux autres.

PERFORMANCES INTRINSEQUES DES TECHNIQUES DE DEPOLLUTION

Les performances intrinsèques des techniques de dépollution ainsi que les actions curatives doivent être prises en considération en premier lieu en veillant tout d'abord à s'attacher à l'élimination totale ou partielle de la source de pollution et en second lieu à celle de son impact (à des coûts technico-économiquement acceptables).

Pour se faire, il convient de considérer, étant donné le contexte hydrogéologique, l'aménagement du site et les caractéristiques des polluants, les techniques potentiellement applicables puis les performances intrinsèques des techniques sélectionnées.

Les grandes familles de dépollution sont présentées dans le chapitre suivant.

RESTITUTION DU PLAN DE GESTION À L'ADMINISTRATION

L'ensemble de la démarche précédemment mentionnée, en particulier la maîtrise de la source, la maîtrise de l'impact et le bilan coûts/avantages justifiant le ou les *scenarii* de gestion doivent être présentés dans un rapport qui devra comporter les éléments suivants :

- récapitulatif des diagnostics antérieurs ;
- récapitulatif du choix des *scenarii* de gestion : maîtrise de la source, maîtrise de l'impact, bilan coûts/avantages ;
- résumé des opérations de gestion :

Note de calculs de dimensionnement des ouvrages,

Plans de récolement des travaux (implantation des travaux et des ouvrages...),

Bilan récapitulatif des matériaux terrassés et, le cas échéant, traités (traçabilité : BSDI, matériaux d'apport...),

Compte-rendu des contrôles périodiques en cours de chantier (émissions, incidents...),

Caractéristiques des ouvrages (confinement, piézomètres...), reportage photographique

Les types d'échantillonnage

L'échantillonnage consiste à localiser en plan ou en coupe les différents prélèvements de même qu'à définir le type d'échantillons à prélever.

3.2.1. Localisation des échantillons en plan La localisation des stations d'échantillonnage en plan est généralement faite à partir de cartes. Les emplacements sont ensuite localisés sur le terrain et le patron d'échantillonnage élaboré doit être suffisamment flexible pour permettre des ajustements sur le terrain. Les différentes approches de prélèvement d'échantillons sont décrites dans

le Cahier 1 –

Généralités du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales (17).

Les approches les plus utilisées lors de campagnes d'échantillonnage de sols sont l'échantillonnage ciblé, l'échantillonnage aléatoire systématique et l'échantillonnage aléatoire simple (13). Ces approches peuvent également être combinées pour améliorer la qualité de l'information recueillie lors de l'échantillonnage.

- **L'échantillonnage ciblé** consiste à prélever des échantillons de sols à un endroit précis où les renseignements obtenus nous font soupçonner une contamination. Par exemple, la revue des données existantes et la visite de reconnaissance peuvent fournir des indices apparents (ou cachés) de pollution qui nécessitent une investigation, comme une tache d'huile sur le sol, un réservoir enfoui ou une ancienne aire d'entreposage. On peut aussi caractériser un sol par échantillonnage ciblé afin d'en connaître la teneur de fond. Cette approche fait appel au jugement et nécessite le choix d'un site déterminé. Cette approche d'échantillonnage a toutefois comme caractéristique de faire ressortir les plus forts niveaux de contamination sur un terrain donné et non pas la contamination moyenne du terrain. Il est impossible d'effectuer des traitements statistiques à partir de ces données. L'échantillonnage ciblé requiert des données préliminaires suffisantes. Lorsque les données sont insuffisantes, il est préférable de localiser les échantillons selon une approche différente.

- **L'échantillonnage aléatoire systématique** consiste à prélever des échantillons selon une structure régulière. Il existe différentes configurations de maillage mais celle faite à partir d'un maillage carré est la plus courante. Dans cet exemple, les échantillons sont prélevés à chacune des intersections du maillage, au centre de celui-ci ou au hasard à l'intérieur de chacune des mailles. Le point de départ et l'orientation du maillage peuvent être choisis au hasard ou en tenant compte des renseignements disponibles (obstacles, sens de migration soupçonnée, etc.). Cette méthode permet une couverture uniforme du terrain à l'étude et elle est simple à réaliser. De plus, elle facilite la cartographie des données et l'interprétation des résultats d'analyses en permettant, par exemple, de tracer des profils longitudinaux et transversaux de la contamination. L'échantillonnage aléatoire systématique à partir d'un maillage carré a de plus l'avantage de faciliter l'estimation de la surface et du volume de sols contaminés. La détermination de la dimension des mailles est un élément de décision important dans l'élaboration d'un plan d'échantillonnage systématique. Cette dimension est souvent établie à partir de l'expérience et du jugement du spécialiste responsable de la caractérisation selon la précision désirée. Par exemple, lors d'une campagne de caractérisation préliminaire, le maillage est généralement plus lâche que lors d'une caractérisation exhaustive, où une plus grande précision dans la localisation des contaminants est requise. Dans certains cas, un outil comme la géostatistique peut permettre le calcul de la dimension optimale des mailles (6). La géostatistique est définie comme étant une méthode statistique pour l'analyse de données linéaires, corrélées dans l'espace. Pour permettre de calculer la dimension des mailles, cette méthode exige qu'elle soit incorporée au début d'un projet de caractérisation et qu'un nombre important d'analyses préliminaires soient effectuées pour vérifier la variabilité des échantillons. Elle est donc peu applicable lors de caractérisation de cas mineurs ayant un nombre restreint d'échantillons.

L'échantillonnage aléatoire simple consiste à prélever des échantillons à des endroits choisis au hasard sur le terrain. Cette approche (non combinée à une autre méthode) n'est pas recommandée pour localiser des stations d'échantillonnage. D'un point de vue statistique, elle peut permettre d'évaluer la contamination moyenne d'un milieu. Cependant, en raison de la variabilité intrinsèque des sols, elle ne peut donner une précision élevée que si le sol est contaminé de façon homogène. De plus, la mise en plan et l'interprétation des résultats d'analyse provenant d'échantillons prélevés de façon aléatoire simple peuvent s'avérer laborieuses. Les approches d'échantillonnage ciblé ou aléatoire systématique sont donc favorisées au détriment de l'échantillonnage aléatoire simple. L'échantillonnage combiné peut s'avérer nécessaire afin de séparer le terrain en zones distinctes. Ces zones peuvent se différencier par le type de contaminants susceptibles d'être décelés, par le degré de contamination soupçonné et par le mode de dispersion des contaminants. Les zones ainsi formées peuvent alors être échantillonnées avec une approche différente. Dans certaines zones, il peut s'avérer plus pertinent d'utiliser une approche ciblée, alors que d'autres peuvent demander une approche aléatoire systématique.

Localisation en coupe

En considérant tous ces aspects et afin d'obtenir des échantillons représentant le mieux possible les conditions du milieu, certaines règles de base sont recommandées pour l'échantillonnage des sols :

- Lorsque le profil stratigraphique est facilement observé (ex. : dans une tranchée d'exploration ou une excavation) : – prélever au moins un échantillon dans chaque unité stratigraphique trouvée; – prélever au moins un échantillon pour chaque horizon dont la contamination est perceptible

- Lorsque le profil stratigraphique n'est pas facilement observé au préalable (ex. : lors d'un forage) ou lorsqu'une seule unité stratigraphique est trouvée et que des variations dans le degré de contamination ne sont pas perceptibles : – prélever au moins un échantillon par mètre de profondeur; toutefois, cet intervalle peut varier en fonction des objectifs de la caractérisation.

- Lorsqu'il s'agit d'une contamination de surface uniquement (occasionnée, par exemple, par des retombées atmosphériques) : – prélever un premier échantillon à la surface du sol (0-5 cm) et, dans certains cas, en fonction du contexte, dans le premier centimètre (0-1 cm). Par la suite, les intervalles d'échantillonnage doivent être suffisamment rapprochés, par exemple 5-10 cm ou 20-30 cm, pour permettre une bonne ségrégation en fonction de la profondeur.

Types d'échantillons

Deux types d'échantillons peuvent être prélevés lors de la caractérisation des sols : les échantillons ponctuels et les échantillons composés. L'échantillon ponctuel est prélevé à un emplacement précis sur le terrain. Il permet d'avoir une idée précise de la contamination à différents endroits sur le terrain et de définir la variabilité de la contamination dans l'espace.

En raison du niveau d'hétérogénéité souvent élevé des sols, il est important que les échantillons ponctuels soient prélevés sur des petites surfaces, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres de côté (ex. : 10 cm × 10 cm ou 20 cm × 20 cm). Par contre, il arrive que les techniques de prélèvement (forage et tranchée) ne permettent pas de prélever des échantillons sur une petite surface.

L'échantillon ponctuel doit alors être prélevé sur une surface inférieure à 0,5 m × 0,5 m et, dans le cas d'un forage, il peut être fait sur une épaisseur maximale de 0,5 m, tel qu'il est mentionné dans le Guide de caractérisation des terrains (14). Il est utile de tenir compte du diamètre de forage afin de permettre de recueillir un volume adéquat de sol pour analyse. L'échantillon composé est, pour sa part, constitué d'un ensemble de sous-échantillons individuels, combinés en proportions égales ou de façon proportionnelle au poids ou au volume du secteur ou du lot que chaque sous-échantillon représente (5).

Contrairement à l'échantillon ponctuel, ce type d'échantillon ne fournit qu'une valeur moyenne de la contamination pour un volume donné de sol. La décision de procéder à un échantillonnage ponctuel ou composé dépend de plusieurs facteurs comme le degré d'homogénéité des sols, le type d'échantillonneurs, le degré de volatilité du contaminant, l'objectif poursuivi par la campagne d'échantillonnage et ainsi de suite.

MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE

Une méthode d'échantillonnage de sol pour analyse environnementale doit permettre de prélever un échantillon représentatif qui n'a subi qu'un minimum d'altérations découlant de son prélèvement. L'échantillon doit être représentatif d'un emplacement précis et avoir un volume suffisant pour les besoins d'analyse. On recommande que la taille de l'équipement de

prélèvement tiennent également compte du diamètre des plus grosses particules à prélever. Les méthodes d'échantillonnage peuvent également être divisées en trois catégories : – l'échantillonnage de faible profondeur; – l'échantillonnage dans un puits d'exploration ou une tranchée; – l'échantillonnage à partir d'un forage. On utilise différents types d'échantillonneurs en fonction de la méthode d'échantillonnage et de la granulométrie des sols échantillonnés.

Échantillonnage de faible profondeur

L'échantillonnage de faible profondeur s'effectue à moins de 1 mètre de profondeur. Il nécessite l'utilisation de techniques simples et d'un équipement facilement disponible et transportable. Les échantillons peuvent être prélevés rapidement. Ce qui suit ne constitue pas un relevé exhaustif de toutes les méthodes d'échantillonnage de sols de faible profondeur. Il s'agit plutôt d'une description des trois méthodes les plus couramment utilisées. Pour obtenir plus de renseignements sur les méthodes existantes, il faut consulter les fournisseurs d'équipement d'échantillonnage de sols.

- Pelle et truelle + Tube d'échantillonnage + Échantillonnage dans un puits d'exploration ou dans une tranchée

Échantillonnage à partir d'un forage

L'échantillonnage de sols à partir d'un forage requiert l'utilisation d'équipement de forage et d'échantillonneurs adaptés. L'utilisation d'une foreuse permet d'échantillonner les sols à des profondeurs supérieures à celles atteintes lorsqu'on a recours aux méthodes décrites précédemment. Cette méthode a aussi l'avantage de moins perturber les lieux que l'échantillonnage en tranchées.

. **Équipement de forage** Lors d'une campagne d'échantillonnage de sols, l'équipement de forage choisi doit permettre de prélever des échantillons de bonne qualité, non mélangés avec d'autres produits et représentatifs d'une profondeur précise. La sélection d'un équipement de forage doit tenir compte de l'utilisation des types d'échantillonneurs décrits à la section

Les types d'équipement qui ne permettent l'échantillonnage qu'à partir des sols remontés à la surface le long des parois du forage ne conviennent pas. Le recours à des types d'équipement qui n'utilisent pas de fluides de forage doit toujours être privilégié. Cependant, certains autres facteurs doivent également être considérés :

- La disponibilité des équipements.
- L'accès au terrain.
- Le type de matériaux géologiques présents sur le terrain.
- La méthode de forage ainsi que l'échantillonneur utilisés doivent être adaptés aux types de sols. Dans certains cas, le forage dans le sol est combiné au forage dans le roc sous-jacent. Il peut alors être important de choisir une méthode qui puisse combiner les deux.
- La profondeur de forage et de la nappe d'eau souterraine. Certains types d'équipement permettent de forer et d'échantillonner des sols à des profondeurs plus importantes.
- La capacité d'un équipement peut être limitée dans une zone saturée d'eau (ex. : foreuse à tarière creuse).

- L'installation d'un puits d'observation pour l'eau souterraine. Il arrive très fréquemment qu'un forage soit effectué avec les objectifs combinés d'échantillonner les sols pour fins d'analyses environnementales et d'installer un puits d'observation pour échantillonner l'eau souterraine.

La section qui suit présente les principaux types d'équipement de forage pour l'échantillonnage de sols. Pour obtenir une description complète des divers types d'équipement de forage, le lecteur peut se référer à Aller, Linda et al. (1989) (1), Davis, H.E. et al. (9) (1991) et Poulin et Liard (1989) (21).

- Foreuse à tarières : Cette méthode est la plus souvent recommandée pour le prélèvement d'échantillons de sol pour analyses environnementales puisqu'elle n'utilise pas de fluides de forage pouvant altérer l'échantillon.

- Foreuse rotative

ces méthodes demandent l'utilisation d'un fluide de forage. Étant donné que le fluide peut venir en contact avec l'échantillon, il est possible d'altérer physiquement ou chimiquement les caractéristiques du sol. Pour cette raison, l'utilisation de ces méthodes n'est recommandée que dans les cas où une foreuse à tarières creuses ne peut être utilisée.

- Foreuse à câble La foreuse à câble est une des plus anciennes méthodes de forage. Elle consiste à enfoncer un tubage par battage sous le poids d'un marteau suspendu à un câble d'acier. Le matériel foré est alors retiré de la formation à l'aide d'un tube à clapet qu'on introduit dans le tubage. L'utilisation de ce tube à clapet exige qu'il y ait suffisamment d'eau dans le trou de forage. Dans une zone non saturée, on doit ajouter de l'eau dans le trou lors des activités de forage.

ECHANTILLONNAGE

Principe : - Assurer l'homogénéisation de l'échantillon.

But - Améliorer la reproductibilité des analyses.

- Agiter les sacs à demi pleins de terre à 2mm 4 fois, par retournement, pour homogénéiser les produits du broyage, les particules les plus *fines* et les moins dures étant dans le fond du sac après broyage.

Pour les échantillons très hétérogènes (contenant du quartz bipyramide, les sols humifères, etc •••) faire passer le sol broyé à 2mm sur l'échantillonneur Jones, 2 *fois* , puis verser dans le sac.

ATTENTION - Bien nettoyer l'échantillonneur avec les brosses spéciales. Entre chaque échantillon.

- **BROYAGE fin**

Principe : Réduction du sol en poudre fine par concassage mécanique

But : Permettre, en raison de la division, une attaque

- **Matériel**

facile et régulière de certains éléments. Broyeur Dangoumau avec pots en acier Inox de 65ml " " " au chrome de 65ml " " " Inox de 150ml

- Mortier d'Abich pour les roches ~ Mortier en fonte avec pilon fonte pour les *gros*

Échantillons de roches

- Mortier d'Agathe pour déterminations fines, porcelaine

ou verre Pyrex. Tamis de 60 (AFNOR nO 23), 80 (AFNOR nO 22). Et 100 mailles (AFNOR n021).

Mode opératoire Dangoumau

Broyage de deux échantillons à la fois avec Pots de 65ml

Mettre avec une mesure environ 15g de sol à 2mm parfaitement séché à l'air dans chacun des pots numérotés 1 et 2 Ajouter 4 billes de 12mm

- Mettre en place le joint métallique

- Mettre en place le couvercle et adapter le fond du pot dans l'alvéole prévue à cet effet -

-Serrer les 2 vis à oreilles en même temps pour que le serrage soit identique des deux cotés.

Ne pas forcer Mettre l'appareil en route Laisser 5 à 10' en fonctionnement suivant la finesse

Broyage de un échantillon à la fois avec pot de 150ml

Mettre 30g de sol environ avec une mesure

- Ajouter 3 billes de 20mm

Le même procédé que celui pour 65 ml

Pendant l'agitation préparer les échantillons suivants. Les pots doivent être nettoyés avec un chiffon humide propre, *ainsi* que les billes et déposés 2' dans le séchoir à air chaud.

N'ajouter la terre que dans les pots parfaitement secs.

Si des particules de terre adhèrent, employer la spatule en bois pour gratter. Ne jamais utiliser un couteau *qui* pourrait rayer l'acier.



Broyeur à boulets dangoumau haïti penzionvolksdul.eu

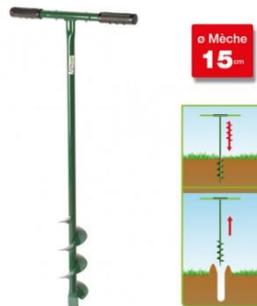
PREPARATION DES ECHANTILLONS

a) Prélèvement pédologique

Principe - prélèvement " ponctuel" qui doit permettre une comparaison des divers horizons constituant un profil Surface

but - permettre de déterminer les migrations (pertes ou gains de certains éléments et le stade d'évolution, la fertilité potentielle.

Matériel - prélèvements effectués soit à la sonde, soit à la tarière soit au piochon à parti! D'une tranchée.



Tarière manuelle

Prélèvement agronomique~

- L'échantillon analysé est le mélange de plusieurs prélèvements effectués en plusieurs points d'un sol en culture dans la zone intéressant les racines

(D-10cm environ pour les prairies)

(O-30cm " pour les champs) (Labourés)

Les prélèvements se font de préférence après récolte d'une culture épuisante et avant fumure, l'échantillonnage en sol fumé étant délicat.)

But - Détermination de la fertilité

Matériel - *id.* ci-dessus

Présentation DE L'échantillon au laboratoire

Les échantillons sont remis dans des sacs plastique en polythène épais, d'une capacité de 1.5kg environ, OU en sacs papier.

La fermeture est assurée par un collier plastique de couleur à serrage réglable (Lasso):

- collier blanc pour échantillons standards " vert pour D.A .

" rouge pour humidité ou profil hydrique " bleu pour azote, ~ N₀₃

Le collier, porte une étiquette double en carton, numérotée d'avance (série de 0001 à 4000).

Le n° du prélèvement, le lieu, la profondeur et la date sont mentionnés à la main ou avec un tampon dans le cas d'échantillons de champs d'essais. Ces étiquettes sont fournies par le laboratoire, par carnet de 50.

Séchage

Principe : le séchage à l'air en couches minces à température ambiante, le plus tôt possible après le prélèvement. permettre le broyage à 2mm et l'échantillonnage,

ne pas modifier la proportion des éléments solubles ou échangeables.

Matériels : - Aluplas de 350 x 210 x 40mm

Mode opératoire : vider le sac à échantillon dans un alupla. Placer le sac vide contre le rebord de l'alupla au moyen d'une pince à linge.

- laisser sécher à l'air sur des étagères jusqu'à ce que l'échantillon perde sa plasticité et s'effrite sous les doigts. (En saison sèche de 2 à 3 jours, en saison humide de 4 à 5 jours ou plus).

ATTENTION - Dans les échantillons des zones 4 et 5 (sols à allophanes) conserver toujours la moitié de l'échantillon frais en sac plastique.

Remarque - Un séchage à 60°C en étuve ventilée, peut être très pratique en cas d'urgence, en saison des pluies. Dans ce cas il n'y a pas de modifications pour les sols humifères, sableux ou argileux de:

- la valeur du pH qui est identique entre l'échantillon séché à 35, 70 et 105°C.

- P₂O₅ Assi. qui est peu différent jusqu'à 70°C, un peu plus fort à 105°C.

- K écho qui est peu différent jusqu'à 70°C.

Au-dessus il y a rétrogradation et abaissement du taux de K écho

- M.O. qui s'altère vers 100 °C et se décompose vers 140°C.

- NH₃ qui se dégage légèrement vers 100°C, seulement en présence de calcaire.

Pour les échantillons séchés à l'étuve, marquer sur le sac: " SECHE A L'ETUVE ".

BROYAGE à 2mm

Principe - Séparer par moyens mécaniques la terre fine à 2mm, en évitant le concassage des débris de roches, des concrétions, etc. qui dénaturerait l'échantillon.

But - Assurer l'homogénéisation du sol par fractionnement et réduction des agrégats. Permettre une bonne pénétration des réactifs au cours des analyses. Terrefine

a) Brovage au rouleau

- Principe - plateau de bois et rouleau en bois dur.
- passoire à trous ronds de 2mm, module AFNOR 34 ~ 200mm, forme haute (77mm).

Cette méthode sera employée suivant avis du pédologue

Mode opératoire :

-verser le contenu de l'Alupla dans le plateau en bois. Imprimer un mouvement de va et vient au rouleau en opérant une pression légère pour écraser les agrégats. Verser le contenu du plateau dans la passoire de 2mm et tamiser souvent pour ne pas écraser les particules primaires.

Remettre le refus sur le plateau et broyer comme

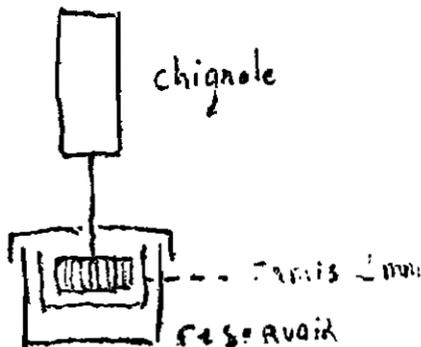
Ci-dessus, etc ••• jusqu'à refus définitif au tamis (cailloux).

- La terre fine passant à 2mm est versée dans le sac ayant servi aux prélèvements, le refus est versé dans l'Alupla et le tout replacé sur l'étagère de séchage pour contrôle et pesée.

b) Broyage électrique

Cette méthode sera utilisée après avis du pédologue.

Matériel une chignole avec support, palette caoutchouc et tamis de 2mm à trous ronds spécial



Mode opératoire :

Mettre en route l'aspirateur à poussières avant de commencer le broyage.

Verser l'échantillon dans la chambre de broyage (environ 300g).

- ajouter 4 billes d'acier de 10mm ~ si le sol est très argileux et sans cailloux.

-abaisser la palette au moyen du levier du statif jusqu'à contact du couvercle avec le tamis.

-mettre en rotation la palette à 350 tours/min. Environ. Le broyage demande de 1 à 2 minutes selon les sols.

-attendre 1 minute après la fin du broyage pour éviter les poussières.

ATTENTION Ne jamais ouvrir la chambre de broyage en cours d'opération. Verser la terre fine à 2mm dans le sac et le refus dans l'Alupla.

c) Broyage à la main

Il sera appliqué aux échantillons contenant des débris de roches calcaires ou des schistes, des concrétions ferromagnétiques, des nodules, etc. aux échantillons destinés à la détermination de la stabilité structurale.

Matériel 1 passoire à trous ronds de 2mm, ~ 200mm 1 pilon en bois dur.

d) Détermination de la terre fine, des éléments grossiers supérieurs 2mm. Des débris végétaux.

Matériel - balance Mettler K5T

Mode opératoire : -peser la terre fine, les cailloux et les racines séparément.

- Terre fine % (sables grossiers) (+ fins + limon) (+ argile) = poids terre fine x 100 / poids total éch. (terre fine + cailloux) (+ débris végétaux)
- Eléments grossiers % (pierres 2cm ~) (graviers $\Omega > 2\text{mm}$) = poids éléments grossiers x 100 / poids total éch.
- Débris végétaux % = poids débris végétaux x 100 / poids total éch.

Méthode d'analyse des ETM des sols

L'analyse des ETM est principalement réalisée dans des contextes réglementaires dans un objectif de suivi et de tracabilité de l'évolution des teneurs dans les sols et de garantie du respect de critères de protection à long terme de l'environnement. Sont principalement concernés les épandages agricoles des boues de stations d'épuration des eaux urbaines ou de certains effluents agro industriel ou industriels autorisés à l'épandage agricole. Les épandages ne sont réglementairement autorisés que sous conditions de niveaux maxima en ETM avant épandage, et poursuivis que sous les mêmes conditions.

Certains éléments sont à la fois considérés comme des oligo-éléments, donc indispensables à la plante, mais peuvent devenir des toxiques dans la chaîne alimentaire en cas d'excès. C'est le cas du cuivre, du zinc, du chrome, du nickel, du sélénium...

D'autres éléments sont inutiles au monde vivant et donc considérés comme indésirables puis toxiques dès de faibles concentrations. C'est le cas du mercure, du cadmium, du plomb, de l'arsenic...

Les teneurs naturelles en ETM de nos sols (ou fonds géochimique) sont en général très faibles. Mais il existe des exceptions locales, liées à la géologie. Par exemple, certains sols calcaires jurassiques rencontrés dans la Meuse ou l'Ain, sont naturellement riches en nickel.

Pourquoi mesurer les oligo-éléments ?

En dehors des objectifs réglementaires cités ci-dessus, l'analyse des ETM peut être rendue nécessaire pour certains types de contrat de production : chartes de qualité, contrats d'exportations, contraintes imposés par des industriels...

Comment mesurer les ETM ?

La terre est mise en contact avec un réactif très agressif (mélange d'acides forts et concentrés) avec un objectif de minéralisation totale de l'échantillon, suivant la méthode normalisée internationale NF ISO 11466. Les éléments dissous sont ensuite dosés par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP), en détection axiale. Le mercure est dosé par une technique spécifique.

Quelques éléments d'interprétation pour les ETM

Pour les épandages de boues de STEP, l'arrêté du 08.01.1998 définit les valeurs limites suivantes de teneur des sols en ETM, au-delà desquels l'épandage est en toute hypothèse interdit.

- ECHANTILLONNAGE

Principe : - Assurer l'homogénéisation de l'échantillon.

But - Améliorer la reproductibilité des analyses.

- Agiter les sacs à demi pleins de terre à 2mm 4 fois, par retournement, pour homogénéiser les produits du broyage, les particules les plus *fines* et les moins dures étant dans le fond du sac après broyage.

Pour les échantillons très hétérogènes (contenant du quartz bipyramide, les sols humifères, etc •••) faire passer le sol broyé à 2mm sur l'échantillonneur Jones, *2 fois* , puis verser dans le sac.

ATTENTION - Bien nettoyer l'échantillonneur avec les brosses spéciales. Entre chaque échantillon.

• BROYAGE fin

Principe : Réduction du sol en poudre fine par concassage mécanique

But : Permettre, en raison de la division, une attaque

Matériel ;

Facile et régulière de certains éléments. Broyeur Dangoumau avec pots en acier Inox de 65ml " " " au chrome de 65Jl\ " " " Inox de 150ml

- Mortier d'Abich pour les roches ~ Mortier en fonte avec pilon fonte pour les *gros*

Échantillons de roches

- Mortier d'Agathe pour déterminations fines, porcelaine

ou verre Pyrex. Tamis de 60 (AFI~OR n° 23), 80 (AFNOR n° 22). Et 100 mailles (AFNOR n°21).

Mode opératoire Dangoumau

- Broyage de deux échantillons à la fois avec Pots de 65ml

Mettre avec une mesure environ 15g de sol à 2mm parfaitement séché à l'air dans chacun des pots numérotés 1 et 2 Ajouter 4 billes de 12mm

- Mettre en place le joint métallique
- Mettre en place le couvercle et adapter le fond du pot dans l'alvéole prévue à cet effet - -
Serrer les 2 vis à oreilles en même temps pour que le serrage soit identique des deux cotés.
Ne pas forcer Mettre l'appareil en route Laisser 5 à 10' en fonctionnement suivant la finesse

- Broyage de un échantillon à la fois avec pot de 150ml

Mettre 30g de sol environ avec une mesure

- Ajouter 3 billes de 20mm

Le même procédé que celui pour 65 ml

Pendant l'agitation préparer les échantillons suivants. Les pots doivent être nettoyés avec un chiffon humide propre, *ainsi* que les billes et déposés 2' dans le séchoir à air chaud.

N'ajouter la terre que dans les pots parfaitement secs.

Si des particules de terre adhèrent, employer la spatule en bois pour gratter. Ne jamais utiliser un couteau *qui* pourrait rayer l'acier.



Broyeur à boulets dangoumau haïti penzionvolskydul.eu

- PREPARATION DES ECHANTILLONS

a) Prélèvement pédologique

Principe :

- prélèvement " ponctuel" qui doit permettre une comparaison des divers horizons constituant un profil Surface

But ;

- permettre de déterminer les migrations (pertes ou gains de certains éléments et le stade d'évolution, la fertilité potentielle.

Matériel - prélèvements effectués soit à la sonde, soit à la tarière soit au piochon à partir d'une tranchée.



Tarière manuelle

- Prélèvement agronomique~

- L'échantillon analysé est le mélange de plusieurs prélèvements effectués en plusieurs points d'un

sol en culture dans la zone intéressant les racines (D-10cm environ pour les prairies)

(O-30cm " pour les champs) (Labourés)

Les prélèvements se font de préférence après récolte d'une culture épuisante et avant fumure, l'échantillonnage en sol fumé étant délicat.)

But - Détermination de la fertilité

Présentation DE L'échantillon au laboratoire :

Les échantillons sont remis dans des sacs plastiques en polythène épais, d'une capacité de 1.5kg environ, OU en sacs papier.

La fermeture est assurée par un collier plastique de couleur à serrage réglable (Lasso) :

- collier blanc pour échantillons standards " vert pour D.A o

" rouge pour humidité ou profil hydrique " bleu pour, azote NHL', N0 3

Le collier qui, porte une étiquette double en carton, numérotée d'avance (série de 0001 à 4000).

Le n° du prélèvement, le lieu, la profondeur et la date sont mentionnés à la main ou avec un tampon dans le cas d'échantillons de champs d'essais. Ces étiquettes sont fournies par le laboratoire, par carnet de 50.

Séchage

Principe : le séchage à l'air en couches minces à température ambiante, le plus tôt possible après le prélèvement. Permettre le broyage à 2mm et l'échantillonnage, ne pas modifier la proportion des éléments solubles ou échangeables.

Matériels : - Aluplas de 350 x 210 x 40mm

Mode opératoire : vider le sac à échantillon dans un alupla. Placer le sac vide contre le rebord de l'alupla au moyen d'une pince à linge.

- laisser sécher à l'air sur des étagères jusqu'à ce que l'échantillon perde sa plasticité et s'effrite sous les doigts. (En saison sèche de 2 à 3 jours, en saison humide de 4 à 5 jours ou plus).

ATTENTION - Dans les échantillons des zones 4 et 5 (sols à allophanes) conserver toujours la moitié de l'échantillon frais en sac plastique.

Remarque -Un séchage à 60°C en étuve ventilée, peut être très pratique en cas d'urgence, en saison des pluies. Dans ce cas il n'y a pas de modifications pour les sols humifères, sableux ou argileux de:

- la valeur du pH qui est identique entre l'échantillon séché à 35, 70 et 105°C.

-P₂O₅ Assi. qui est peu différent jusqu'à 70°C, un peu plus fort à 105°C.

- K écho qui est peu différent jusqu'à 70°C.

Au-dessus il y a rétrogradation et abaissement du taux de K écho

- M.O. qui s'altère vers 100°C et se décompose vers 140°C.

-NH₃ qui se dégage légèrement vers 100°C, seulement en présence de calcaire.

Pour les échantillons séchés à l'étuve, marquer sur le sac: " SECHE A L'ETUVE ".

- BROYAGE à 2mm

Principe :

- Séparer par moyens mécaniques la terre fine à 2mm, en évitant le concassage des débris de roches, des concrétions, etc. qui dénaturerait l'échantillon.

But :

- Assurer l'homogénéisation du sol par fractionnement et réduction des agrégats. Permettre une bonne pénétration des réactifs au cours des analyses. Terre fine

a) Broyage au rouleau

- Principe - plateau de bois et rouleau en bois dur. passoire à trous ronds de 2mm, module AFNOR 34~ 200mm, forme haute (77mm).

Cette méthode sera employée suivant avis du pédologue

Mode opératoire :

-verser le contenu de l'Alupla dans le plateau en bois. Imprimer un mouvement de va et vient au rouleau en opérant une pression légère pour écraser les agrégats. Verser le contenu du plateau dans la passoire de 2mm et tamiser souvent pour ne pas écraser les particules primaires.

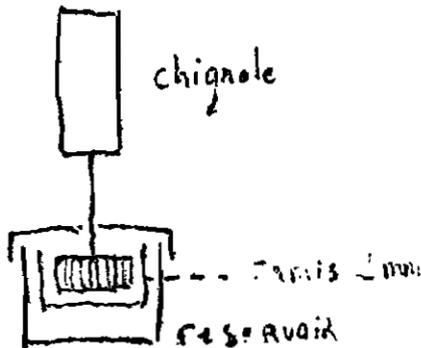
Remettre le refus sur le plateau et broyer comme ci-dessus, etc jusqu'à refus définitif au tamis (cailloux).

- La terre fine passant à 2mm est versée dans le sac ayant servi aux prélèvements, le refus est versé dans l'Alupla et le tout replacé sur l'étagère de séchage pour contrôle et pesée.

b) Broyage électrique

Cette méthode sera utilisée après avis du pédologue.

Matériel une chignole avec support, palette caoutchouc et tamis de 2mm à trous ronds spécial •



Mode opératoire :

Mettre en route l'aspirateur à poussières avant de commencer le broyage.

Verser l'échantillon dans la chambre de broyage (environ 300g).

- ajouter 4 billes d'acier de 10mm ~ si le sol est très argileux et sans cailloux.

- abaisser la palette au moyen du levier du statif jusqu'à contact du couvercle avec le tamis.

- mettre en rotation la palette à 350 tours/min. Environ. Le broyage demande de 1 à 2 minutes selon les sols.

- attendre 1 minute après la fin du broyage pour éviter les poussières.

ATTENTION Ne jamais ouvrir la chambre de broyage en cours d'opération. Verser la terre fine à 2mm dans le sac et le refus dans l'Alupla.

c) Broyage à la main

Il sera appliqué aux échantillons contenant des débris de roches calcaires ou des schistes, des concrétions ferromagnétiques, des nodules, etc •••• aux échantillons destinés à la détermination de la stabilité structurale.

Matériel ;

1 passoire à trous ronds de 2mm, ~ 200mm 1 pilon en bois dur.

d) Détermination de la terre fine, des éléments grossiers supérieurs 2mm. Des débris végétaux.

Matériel - balance Mettler K5T

Mode opératoire : -peser la terre fine, les cailloux et les racines séparément.

- Terre fine % (sables grossiers) (+ fins + limon) (+ argile) = poids terre fine x 100 / poids total éch. (terre fine + cailloux) (+ débris végétaux)

- Eléments grossiers % (pierres 2cm) (graviers $\Omega > 2\text{mm}$) = poids éléments grossiers x **100** / poids total éch.
- Débris végétaux % = poids débris végétaux x **100** / poids total éch.

- **Méthode d'analyse des ETM des sols**

L'analyse des ETM est principalement réalisée dans des contextes réglementaires dans un objectif de suivi et de traçabilité de l'évolution des teneurs dans les sols et de garantie du respect de critères de protection à long terme de l'environnement. Sont principalement concernés les épandages agricoles des boues de stations d'épuration des eaux urbaines ou de certains effluents agro industriel ou industriels autorisés à l'épandage agricole. Les épandages ne sont réglementairement autorisés que sous conditions de niveaux maxima en ETM avant épandage, et poursuivis que sous les mêmes conditions.

Certains éléments sont à la fois considérés comme des oligo-éléments, donc indispensables à la plante, mais peuvent devenir des toxiques dans la chaîne alimentaire en cas d'excès. C'est le cas du cuivre, du zinc, du chrome, du nickel, du sélénium...

D'autres éléments sont inutiles au monde vivant et donc considérés comme indésirables puis toxiques dès de faibles concentrations. C'est le cas du mercure, du cadmium, du plomb, de l'arsenic...

Les teneurs naturelles en ETM de nos sols (ou fonds géochimique) sont en général très faibles. Mais il existe des exceptions locales, liées à la géologie. Par exemple, certains sols calcaires jurassiques rencontrés dans la Meuse ou l'Ain, sont naturellement riches en nickel.

Pourquoi mesurer les oligo-éléments ?

En dehors des objectifs réglementaires cités ci-dessus, l'analyse des ETM peut être rendue nécessaire pour certains types de contrat de production : chartes de qualité, contrats d'exportations, contraintes imposés par des industriels...

Comment mesurer les ETM ?

La terre est mise en contact avec un réactif très agressif (mélange d'acides forts et concentrés) avec un objectif de minéralisation totale de l'échantillon, suivant la méthode normalisée internationale NF ISO 11466. Les éléments dissous sont ensuite dosés par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP), en détection axiale. Le mercure est dosé par une technique spécifique.

-Quelques éléments d'interprétation pour les ETM

Pour les épandages de boues de STEP, l'arrêté du 08.01.1998 définit les valeurs limites suivantes de teneur des sols en ETM, au-delà desquels l'épandage est en toute hypothèse interdit.

ELEMENTS TRACE METALLIQUE DOSES (éléments totaux)		VALEUR LIMITE en mg/kg de MS(ou ppm)
CADMIUM	Cd	2
CHROME	Cr	150
CUIVRE	Cu	100
MERCURE	Hg	1
NICKEL	Ni	50
PLOMB	Pb	100
SELENIUM	Se	10
ZINC	Zn	300

TP METHODE D'ANALYSE PHYSICO CHIMQUES DU SOL

DOSAGE DU CALCAIRE TOTAL

- PRINCIPE : DOSAGE DU CALCAIRE TOTAL est fondé sur la réaction caractéristique du carbonate de calcium en contact de l'acide chlorhydrique :



Il s'agit de comparé le volume du (CO₂) dégagé par le contact du HCl avec un certain poids connu de terre a analysé avec celui dégagé par le contact du HCl avec CaCO₃ pur et sec en quantité connue .les conditions du milieu (température et pression atmosphérique) restant inchangé.

- Réactifs :
HCl 6N , CaCO₃ pur et sec 0.300g

Description de l'appareil

Une colonne graduée contenant une solution de NaCl saturé (pour éviter la diffusion du gaz CO₂ dans l'eau) et coloré pour faciliter la lecture est relié à l'aide de tuyaux souples.

-par le haut : vase communicants, a une ampoule mobile et a l'air libre.

- par le bas : a un erlenmeyer ou flacon contenant l'échantillon a analyser.

L'erlenmeyer possède un orifice libre contrôlé par une pince selon les types, soit un petit appendice soit un petit tube à essai destiné à recevoir l' HCl avant la réaction .

Mode opératoire

- Essai témoin – étalonnage de l'appareil

Introduire 0.300g de CaCO₃ pur et sec (sortant de l'étuve)au fond de erlenmeyer et mouillé par quelques goutte de H₂O distillé pour favorisé le contact a HCl.

Mettre 5ml d'HCl 6N a L'AIDE D'UNE PIPETTE dans le petit tube à essai et l'introduire avec précaution dans l'erlenmeyer

- bouché convenablement l'erlenmeyer en le raccordant a la colonne.

-la pince autant ouverte ajusté la position de l'ampoule mobile jusqu'a ce que le niveau du liquide coloré soit au niveau zéro dans la colonne graduée.

- Maintenir l'ampoule a ce niveau, fermé la pince et incliné l'erlenmeyer de manière reprendre HCL contenu dans LE TUBE A essai sur CaCO₃

-agiter calmement l'erlenmeyer pour favorisé la réaction, le CO₂ se dégage et comprime le niveau liquide dans la colonne

-abaisser l'ampoule mobile pour suivre la dénivellation dans la colonne.

- la réaction terminée (fin de bouillonnement), ajuster le niveau et noter le volume V en ml, de CO₂dégagé.

Dosage proprement dit : on opere de la même facon qu'en essai témoin, mais en remplaçant le CaCO₃pur sur le poids p de l'échantillon déterminé soit un volume de CO₂dégagé.

Essai d'échantillon facultatif

On opère de la même façon qu'en 1 mais en remplaçant le CaCO₃ par successivement 1g ,5g et 10g de terre de façon à observer le comportement de l'échantillon et a déterminer le poids optimum de terre a échantillonner pour obtenir u volume de CO₂ dégagé se rapprochant du celui de l'essai témoin on peut également procéder autrement, on observant

dans un tube a essai le comportement de l'Hcl d'une pincé d'échantillon et déterminer arbitrairement la prise l'essai p.

Remarque

L'opération proprement dite est à recommencer si

- L'Hcl coule pré naturellement sur l'échantillon
- L'ampoule déborde
- Le volume de co2 dégagé trop différents de celui du témoin

Calcul des résultats

La teneur du carbonate de calcium est exprimer en %est obtenue par la formule suivante

$$\text{Ca co3\%} = \frac{-v*0.3}{v*p} * 100\%$$

V : volume de Co2produit par 0.3 ca cao3pur et sec

V* : volume de Co2produit par x *ca cao3pur et sec contenu dans un poids p du sol

P : poids de la prise de l'essai de terre en gramme.