

document public

Échantillonnage de sols pour caractérisation d'une pollution : guide méthodologique

M. Pellet
L. Laville-Timsit

Décembre 1993
R 37865



Étude réalisée dans le cadre des
actions de service public du BRGM

1992 - 12 - 92

BRGM
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - ☎ 38.64.34.34

ÉCHANTILLONNAGE DE SOLS POUR CARACTÉRISATION D'UNE POLLUTION : GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

M. Pellet, L. Laville-Timsit

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objet l'établissement d'un guide pratique d'échantillonnage des sols dans un but de caractérisation de la pollution d'un site.

Elle a été réalisée sur la base d'une recherche bibliographique et constitue une revue de l'état de l'art, principalement américain (travaux de l'EPA) et européen (travaux ISO).

Bien que les approches soient légèrement différentes, et le degré de formalisation variable, les grandes lignes directives pour la conception et la réalisation d'un échantillonnage à des fins de diagnostic de pollution sont similaires.

En tout état de cause, l'énoncé de règles très strictes dans la conception et la réalisation d'un échantillonnage de sol est rendu impossible sans prendre en compte la spécificité de chaque site et les objectifs recherchés.

C'est la raison pour laquelle, après un bref exposé des considérations à prendre en compte et des différentes approches possibles (USA / Europe), chacune des grandes lignes directives est développée ci-après et illustrée de documents synthétiques.

Sont ainsi passés en revue :

- les protocoles ou "stratégies" d'échantillonnage,
- la localisation et le nombre de prélèvements,
- leur répartition dans l'espace (dimensions horizontale et verticale),
- les matériels disponibles pour la foration et l'échantillonnage,
- les conditions minimales à respecter pour la prise des échantillons, leurs conditionnement, stockage, transport aux laboratoires et élimination après usage.

Il convient donc de considérer ce document comme un "guide méthodologique pour la pratique de l'échantillonnage".

Cette étude a été réalisée sur crédits du Ministère de l'Environnement.

Rapport BRGM n° 37865

Auteurs : M. Pellet, L. Laville-Timsit

Programme Service Public : 1992-1993

Financement : Ministère de l'Environnement

Nombre de pages : 74 (+ 1 annexe)

Nombre de figures : 29

Nombre de tableaux : 11

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	7
1. INTRODUCTION	8
2. OBJECTIFS ET APPROCHE GLOBALE	9
2.1. Objectif d'échantillonnage	9
2.2. Approche globale et notion de plan d'échantillonnage	10
2.3. Objectifs de diagnostic de pollution	11
2.4. Comparaison des approches américaine et européenne	11
2.4.1. Approche américaine	11
2.4.2. Approche européenne	12
3. ACTIONS PRÉLIMINAIRES	13
3.1. Introduction	13
3.2. Historique du site	13
3.3. Reconnaissance du site	14
3.4. Synthèse du contexte naturel	14
3.5. Investigations préliminaires	14
3.5.1. Échantillonnage préliminaire	15
3.5.2. Techniques de criblage de site ou reconnaissance in situ	15
4. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE	16
4.1. Stratégies d'échantillonnage	16
4.1.1. Approches statistiques	16
4.1.2. Approches de recherche spécifiques	19
4.1.3. Approches hypothétiques	22
4.2. Choix de la stratégie d'échantillonnage	24
4.3. En résumé	25
5. CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCHANTILLONNAGE	28
5.1. Nombre de points d'échantillonnage	28
5.2. Profondeur des échantillons	29
5.3. Nombre d'échantillons à prélever	29
5.4. Types d'échantillons	30
5.4.1. Échantillons ponctuels et composites	30
5.4.2. Échantillons remaniés et non remaniés (intacts)	31
5.4.3. Échantillons de contrôle et d'assurance qualité	31
6. TECHNIQUES D'INVESTIGATION	34
6.1. Introduction	34
6.2. Techniques directes et semi-directes	34
6.2.1. Criblage analytique de terrain	34
6.2.2. Techniques géophysiques	36

6.3. Techniques d'échantillonnage des sols	37
6.3.1. Introduction	37
6.3.2. Présentation des différentes techniques	37
6.3.3. Choix de la technique	52
6.3.4. Précautions diverses	60
6.3.5. Choix des opérateurs	61
7. PRÉLÈVEMENT, CONDITIONNEMENT ET TRANSPORT	62
7.1. Introduction.....	62
7.2. Repérage des points d'échantillonnage sur le site.....	62
7.3. Prélèvement	63
7.3.1. Volume prélevé.....	63
7.3.2. Préparation	63
7.3.3. Description de l'échantillonnage	66
7.4. Conditionnement et transport	66
7.4.1. Conditionnement	66
7.4.2. Étiquetage	69
7.4.3. Transport et stockage.....	69
7.4.4. Traçabilité	69
7.4.5. Élimination des échantillons	70
CONCLUSION.....	71
BIBLIOGRAPHIE	72

Annexe 1 - Adoption d'une stratégie d'échantillonnage en fonction de l'hypothèse formulée (ISO)

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 - Echantillonnage aléatoire
- Figure 2 - Echantillonnage aléatoire stratifié
- Figure 3 - Echantillonnage systématique
- Figure 4 - Echantillonnage systématique aléatoire
- Figure 5 - Echantillonnage systématique semi-aléatoire
- Figure 6 - Echantillonnage par profils
- Figure 7 - Echantillonnage de recherche spécifique selon une grille triangulaire
- Figure 8 - Echantillonnage de jugement
- Figure 9 - Echantillonnage selon une grille circulaire
- Figure 10 - Echantillonnage selon une grille linéaire
- Figure 11 - Echantillonnages non systématiques
- Figure 12 - Types de tarières à vis
- Figure 13 - Tarière à gouge
- Figure 14 - Tarière de type allemand ("Dutch Type Auger")
- Figure 15 - Types de gouges en fonction du type de sol
- Figure 16 - Utilisation d'une mototarière
- Figure 17 - Tube d'échantillonnage de sol
- Figure 18 - Tube "Veihmeyer"
- Figure 19 - Tube à parois minces ou "Thin-walled tube sampler"
- Figure 20 - Tube "ring-lined barrel sampler"
- Figure 21 - Echantillonneur à piston
- Figure 22 - Foration à la tarière et échantillonnage à l'aide d'un tube
- Figure 23 - Composition d'une tarière à tige creuse
- Figure 24 - Foration à la tarière à tige creuse et prélèvement au moyen d'un tube
- Figure 25 - Echantillonnage en continu sur tarière à tige creuse
- Figure 26 - Tarière à auge
- Figure 27 - "Split-spoon sampler"
- Figure 28 - Exemple d'organigramme de sélection de la technique d'investigation
- Figure 29 - Procédure d'homogénéisation

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 - Etapes constitutives du plan d'échantillonnage
- Tableau 2 - Probabilité d'omettre un hot-spot avec un échantillonnage de recherche spécifique
- Tableau 3 - Evaluation des stratégies d'échantillonnage en fonction de l'objectif
- Tableau 4 - Comparaison des stratégies d'échantillonnage
- Tableau 5 - Méthode de criblage de terrain
- Tableau 6 - Techniques géophysiques
- Tableau 7 - Critères d'utilisation des équipements d'échantillonnage
- Tableau 8 - Comparaison des techniques d'échantillonnage : travaux de l'ISO
- Tableau 9 - Comparaison des techniques d'échantillonnage : synthèse EPA en 1991
- Tableau 10 - Comparaison des techniques d'échantillonnage : synthèse EPA en 1992
- Tableau 11 - Type de conditionnement en fonction des contaminations présentes et des éléments à analyser

AVANT-PROPOS

Afin d'éviter toute confusion qui pourrait être liée à la définition et à la compréhension du mot "sol", il convient de préciser avant tout développement du sujet le sens dans lequel il est pris ici.

Le sol correspond en effet à "l'ensemble de la zone non-saturée comprise entre la surface topographique et le niveau de battement de la nappe".

C'est donc une entité d'épaisseur et de composition très variables, constituée par ailleurs de plusieurs phases : solide, liquide et gaz. La matière organique vivante, en décomposition ou déjà transformée, y joue également un rôle important, surtout dans les niveaux les plus superficiels.

Les interactions entre ces phases relèvent de processus divers, tels que infiltration, exfiltration, volatilisation, diffusion, lessivage, adsorption, désorption, ...

Il s'agit donc d'un milieu complexe, ouvert, vivant et ... éminemment hétérogène.

1. INTRODUCTION

La caractérisation de sites pollués nécessite souvent l'échantillonnage et l'analyse des sols et des eaux permettant d'identifier les polluants présents, d'apprécier la répartition spatiale de la contamination et les niveaux de concentration, et de déterminer les potentialités de migration et les voies d'exposition pour le milieu naturel et les êtres vivants.

Les décisions prises à l'issue d'un tel échantillonnage peuvent être lourdes de conséquences sur la santé des personnes (évaluation de "risques") et au niveau économique (mesures de protection, dimensionnement du procédé de décontamination, redevances, ...).

Cependant, un grand nombre de paramètres interfèrent à la représentativité de l'échantillonnage, et le volume d'investigations réalisables (nombre de points d'échantillonnage, nombre d'échantillons et d'analyses) est limité par des contraintes matérielles, notamment économiques. En outre, l'échantillonnage des sols, globalement moins développé que celui des eaux, est une science relativement nouvelle, davantage formalisée aux USA qu'en Europe, où des travaux de normalisation sont cependant en cours.

Conformément à la demande du Ministère de l'Environnement, seule la partie "Sol" est ici prise en compte.

La définition d'un plan d'échantillonnage découle d'une bonne définition des objectifs de l'étude et de l'adéquation des moyens mis en oeuvre pour la résolution des problèmes posés ; la réussite de sa réalisation nécessite un certain nombre de précautions et de contrôles attestant de la qualité des données.

L'objet de cette étude, fondée sur une recherche bibliographique et constituant une revue de l'état de l'art, principalement américain et européen, est l'établissement d'un guide pratique d'échantillonnage des sols dans un but de caractérisation de la pollution d'un site.

Bien que, dans chaque pays, les approches soient légèrement différentes, et qu'aucune règle très stricte ne puisse être énoncée, compte tenu de la spécificité de chaque site et des polluants associés, des grandes lignes directrices dans la conception et la réalisation d'un échantillonnage de sol à des fins de diagnostic de pollution se distinguent et se recoupent entre elles.

Le rapport a donc été construit autour de ces grandes lignes, en reprenant à la fois, et de la manière la plus synthétique possible, les éléments américains et européens.

2. OBJECTIFS ET APPROCHE GLOBALE

2.1. OBJECTIF D'ÉCHANTILLONNAGE

L'objectif d'un échantillonnage est d'être le plus représentatif du milieu qu'il est sensé représenter. La qualité de cette phase est capitale car elle conditionne un grand nombre de décisions, et peut constituer la base d'actions importantes et coûteuses.

Un échantillonnage de sol représentatif se doit de garantir que l'analyse de l'échantillon, ou du groupe d'échantillons, reflète le niveau de concentration du contaminant concerné à un moment et à un lieu donnés. Les résultats analytiques issus d'échantillons représentatifs reflètent la variation de présence et de concentration du polluant sur le site.

Le problème de la représentativité s'exprime à deux niveaux :

- Représentativité de la prise par rapport au volume et à la géométrie de l'entité qu'elle représente, le prélèvement de la totalité du sol à caractériser n'étant pas possible (même problème à l'analyse où la prise est relativement réduite).
- Représentativité de l'échantillon analysé par rapport à l'échantillon prélevé qui a pu subir des interférences liées aux différentes manipulations intermédiaires (contamination, dégradation).

Les variables qui affectent la représentativité des échantillons et des traitements qui en découlent, sont de quatre ordres :

☐ Variabilité liée au milieu :

- géologie locale et régionale,
- capacité de rétention du sol,
- perméabilité,
- capacité de sorption de la zone non saturée.

☐ Variabilité liée au contaminant :

- site mono- ou pluri-produits polluants,
- variations de la concentration en chaque contaminant,
- inhibition ou synergie de comportement en fonction du milieu et des produits.

☐ Variabilité liée à l'échantillonnage :

- hétérogénéité très importante du sol (matériau, granulométrie, concentration en matière organique, oxydes métalliques, ...),
- biais d'échantillonnage au cours des collectes, préparation et transport.

□ **Variabilité analytique :**

- déviations analytiques dues à la manière dont les échantillons sont stockés et préparés,
- pré-traitements analytiques (homogénéisation, tamisage, mise en solution, ...),
- méthodes analytiques elles-mêmes.

2.2. APPROCHE GLOBALE ET NOTION DE PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE

L'étape la plus importante réside dans la définition du plan d'échantillonnage et du programme d'analyse, en accord avec l'objectif global de l'étude et garantissant l'exploitabilité des données.

Initialement, les objectifs de l'échantillonnage doivent être clairement définis, ainsi que le degré de précision requis. L'ensemble des intervenants (échantillonneurs, analystes et utilisateurs des données) doit être dès lors sensibilisé à ces objectifs et impliqué dans la conception du plan d'échantillonnage, afin de prendre en compte les critères qualitatifs et quantitatifs de chacun.

La liste des étapes à préparer pour l'échantillonnage des sols sur site contaminé est présentée dans le tableau 1, puis discutée dans les parties suivantes du rapport.

OBJECTIFS ET APPROCHE GLOBALE	
♦ Objectifs du projet et degré de précision	2.3
INVESTIGATIONS PRELIMINAIRES	
♦ Synthèse de connaissances préliminaires	3
STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE	
♦ Localisation et répartition des points d'échantillonnage	4
♦ Nombre d'échantillons à prélever (comprenant les échantillons de contrôle)	5.1
♦ Volume des échantillons	
♦ Profondeur d'échantillonnage	5.2
♦ Période d'échantillonnage	
TECHNIQUES D'ECHANTILLONNAGE	
♦ Techniques et protocoles d'échantillonnage (comprenant l'aspect sécurité)	6
♦ Procédures qualité et précautions particulières (comprenant les procédures de décontamination des outils, la gestion des déchets engendrés, ...)	
♦ Sous-traitants liés à l'échantillonnage	
PRELEVEMENT	
♦ Consignes de prélèvement (comprenant le type des échantillons)	7
♦ Type, nombre et volume des récipients utilisés	
♦ Consignes de conservation et de transport	

Tableau 1 - Etapes constitutives du plan d'échantillonnage

2.3. OBJECTIFS DE DIAGNOSTIC DE POLLUTION

L'objectif global d'un diagnostic de pollution intègre un grand nombre de paramètres, et est particulier à chaque cas. Il peut se situer à différents niveaux, et en combiner plusieurs, selon qu'il s'agit de déterminer :

- les types de polluants et leur concentration,
- la localisation et l'identification des sources potentielles de contamination,
- l'extension de la contamination,
- les voies de migration de la contamination,
- les voies d'exposition pour les êtres vivants et le milieu naturel, ainsi que les risques encourus,
- la réponse à une question précise,
- les options de traitement,
- les objectifs de décontamination,
- les risques d'intervention.

Une définition précise de l'objectif de l'étude et du degré de précision souhaité est capitale, car elle conditionne l'ensemble des options d'échantillonnage.

2.4. COMPARAISON DES APPROCHES AMÉRICAINE ET EUROPÉENNE

2.4.1. Approche américaine

Aux USA, bien que l'approche d'échantillonnage, à des fins de diagnostic, soit beaucoup moins développée pour les sols que pour les eaux, elle répond cependant à un canevas très formalisé, et a fait l'objet d'un premier guide pratique publié par l'EPA en 1991 (le "Removal Program Representative Sampling Guidance, Vol. 1 : Soil", EPA, 1991). Il est important de souligner que la plupart des travaux américains dans ces domaines a pour objectif annoncé la décontamination des sites pollués.

D'une manière générale, l'approche américaine est beaucoup plus systématisée et moins ciblée qu'en Europe, en raison d'un souci d'objectivité et d'évaluation comparative globale des sites contaminés, réalisées au cas par cas (cf. sites du Superfund). Les statistiques y jouent un rôle important, que ce soit dans la définition du plan d'échantillonnage (dimensionnement), dans l'analyse et l'interprétation des résultats (lois de distribution, calcul de l'erreur; ...).

Les notions de contrôle et d'assurance qualité sont, quant à elles, très poussées et développées aux Etats-Unis, et font l'objet d'un programme à part entière. L'objectif de qualité est chiffré, et conditionne le dimensionnement de l'ensemble du plan d'échantillonnage (via le nombre d'échantillons), et toute modification ultérieure apportée au plan induit une révision de l'objectif de qualité.

En conséquence, tout constat s'accompagne d'une appréciation qualitative des données, calculable avant et après l'échantillonnage, et prenant en compte les objectifs de l'étude, le degré de précision requis et les contraintes matérielles (moyens, délais, conditions sur site, interférences, ...).

Si l'approche fondamentale est similaire en Europe -où le plan d'échantillonnage est forcément calculé par rapport à un degré de précision, et les résultats analytiques pondérés en fonction des aléas d'échantillonnage et d'analyse-, elle ne fait l'objet d'aucune formalisation et fait partie de l'expertise du concepteur.

2.4.2. Approche européenne

En Europe, l'approche est davantage ciblée et moins exhaustive. Les travaux de normalisation ISO (International Standardization Organisation), auxquels les Américains ne participent pas, apportent une bonne image de l'avancement de la réflexion en Europe, très largement inspirée des pays les plus en avance (Pays-Bas, Allemagne, Grande-Bretagne et France principalement). Ils préconisent une approche de type hypothétique, c'est-à-dire que le plan d'échantillonnage est construit sur la base d'une hypothèse déduite de l'analyse historique préalable du milieu et du site, et que l'interprétation des résultats réside dans la confirmation, l'infirmité ou la révision de l'hypothèse initiale.

L'investigation ne décrit pas directement la distribution de la contamination, mais teste une hypothèse de distribution, selon laquelle elle a été conçue. Dans le cas où l'hypothèse est infirmée, une nouvelle hypothèse est formulée, puis testée, avant de conclure sur la distribution de la contamination. De la même manière, si des données recueillies lors des investigations remettent en cause des hypothèses de départ (ex : profondeur de la nappe, ...), la stratégie d'échantillonnage est réajustée (ex : prélèvement en nappe) avant toute conclusion.

C'est une attitude moins "en bloc" et systématique que celle américaine, plus séquentielle, où l'argumentation de l'expert joue un rôle prédominant, que ce soit dans le choix de la stratégie d'échantillonnage, son dimensionnement, l'appréciation de la qualité des données ou l'interprétabilité et l'interprétation des données.

En outre, il n'y a pas réellement de procédure qualité très arrêtée en Europe en matière d'échantillonnage de sol ; elle reste relative à la procédure d'échantillonnage suivie et doit être en conformité avec l'ISO 9000 (ISO, Part 1, 1993).

A titre d'exemple, l'annexe 1 présente de manière schématique le principe ISO selon lequel une hypothèse est formulée et testée par l'échantillonnage, et montre le type de stratégie à adopter en fonction de l'hypothèse formulée.

3. ACTIONS PRÉLIMINAIRES

3.1. INTRODUCTION

Des actions préliminaires à la définition du plan d'échantillonnage facilitent la connaissance du site et ses potentialités de contamination. Basées à la fois sur un historique du site, une visite de reconnaissance visuelle, une synthèse du contexte naturel, et éventuellement complétées par des investigations préliminaires, elles permettent d'identifier les sources potentielles de contamination et les types de polluant, d'apprécier la vulnérabilité du site et de son environnement, et de détecter les voies éventuelles de migration, les mécanismes de transport et les cibles potentielles.

Dès la phase d'étude historique et de visite du site, les sources majeures de contamination peuvent être détectées et les voies de migration et d'exposition pour l'homme et l'environnement évaluées. La recherche des cibles éventuelles est réalisée sur les voies de migration déterminées, et prend en compte la santé des personnes (enfants, travailleurs, chasseurs, pêcheurs, ...) et la sauvegarde de l'environnement (faune, flore, ...).

Les investigations préliminaires jouent un certain rôle en Europe, puisqu'elles constituent le fondement de l'hypothèse et décident de la stratégie d'échantillonnage ; elles sont prédominantes aux Etats-Unis, où elles orientent différentes options d'échantillonnage.

En outre, elles sont importantes pour une évaluation du risque d'intervention sur le site, en terme de sécurité des personnes.

On doit cependant noter que, dans bien des cas où les délais d'intervention sont limités, la phase d'étude historique est immédiatement suivie de l'investigation complète du site.

3.2. HISTORIQUE DU SITE

Il consiste à étudier l'évolution du site en remontant le plus loin possible dans le passé (avant, pendant et après son activité) et permet d'identifier les potentialités de contamination (polluants, zones suspectes) et les risques que présente le site.

Il est basé sur la synthèse de toutes les données disponibles concernant le site, et peut notamment s'établir à partir des éléments suivants :

- données administratives (arrêtés préfectoraux, autorisations, contrôles, ...),
- archives de l'entreprise (autorisations, études préalables, incidents, litiges, innovations ...),
- études antérieures (notamment liées à la qualité de la nappe),
- enquête auprès de la population et des employés,

- documents cartographiques (plans, cartes, photos aériennes à différentes dates),
- données analytiques (effluents, chaîne de fabrication, milieu naturel, ...),
- description des procédés,
- inventaire et bilan de matières (matières premières, produits, sous-produits, déchets, effluents),
- détail des réseaux de conduites, câbles, fondations et réservoirs,
- localisation des lagunes, décharges et ex-décharges, stockages, et gestion de ces stockages,
- recherche d'informations relatives à des sites similaires,
- prise en compte de l'environnement proche.

Dans la mesure du possible, il doit aboutir à une liste des contaminants potentiels liés à des zones-source suspectées.

3.3. RECONNAISSANCE DU SITE

Une visite de reconnaissance du site, conduite obligatoirement avant l'échantillonnage, est irremplaçable pour se rendre compte des conditions environnementales du site, détecter les zones les plus critiques, évaluer les risques liés à l'échantillonnage et établir le plan d'échantillonnage. Elle est réalisée en parallèle avec l'enquête historique, qu'elle complète, et facilite le contact avec le personnel et la recherche de données particulières.

3.4. SYNTHÈSE DU CONTEXTE NATUREL

Avant même toute investigation plus poussée, une synthèse des données disponibles concernant le milieu naturel est réalisable, qui permet d'apprécier la nature du milieu et d'appréhender sa vulnérabilité. Réalisée à partir des bases de données disponibles (du sous-sol ou relatives à la qualité des eaux souterraines), d'études antérieures, de publications et de documents cartographiques à différentes échelles, elle porte notamment sur les déterminations suivantes :

- structure locale du sol (jusqu'à une dizaine de mètres),
- profondeur de la nappe,
- sens d'écoulement de la nappe,
- repérage des cours d'eau et des plans d'eau (également ceux comblés),
- localisation des puits d'observation et des sources de la nappe,
- et toutes informations préliminaires relatives à la qualité du sous-sol.

3.5. INVESTIGATIONS PRÉLIMINAIRES

Si les connaissances acquises à travers les étapes précédentes sont insuffisantes pour déterminer le plan d'échantillonnage, certaines investigations de terrain sont possibles afin de mieux cibler le type de contaminant présent et le type de distribution de la contamination.

3.5.1. Échantillonnage préliminaire

Un nombre réduit d'ouvrages (reconnaissance visuelle), éventuellement complété par quelques prélèvements-clés analysés en laboratoire, permettent de mieux cibler la campagne d'échantillonnage. La réalisation d'une ou deux analyses globales (de type ICP pour les métaux, ou chromatographie totale pour les composés organiques), permet notamment d'identifier l'ensemble des composés présents.

3.5.2. Techniques de criblage de site ou reconnaissance in situ

Outre l'obtention de données analytiques par des laboratoires, des techniques de criblage analytique de terrain se développent, qui fournissent des données en temps réel, pouvant permettre de cibler les familles de composés chimiques à prendre en compte et de rassembler, en principe, de façon efficace et à des coûts économiques, un grand nombre de données concernant le site. Les zones identifiées à l'issue de ces techniques de criblage peuvent alors faire l'objet d'analyse en laboratoire sur un nombre réduit d'échantillons choisis. Ces techniques ont l'avantage d'apporter, dans des délais très courts, une information assez riche du site et pour un budget relativement réduit.

On citera notamment l'utilisation de détecteurs à photo-ionisation, d'unités portables à fluorescence X, et différents kits d'analyse in situ. Les techniques géophysiques sont également utiles pour détecter toute anomalie souterraine du type structure, réservoir, déchets,

Afin d'éviter au maximum le risque de réponses négatives fausses, la technique choisie doit garantir une limite de détection inférieure aux niveaux à mesurer sur le site, ou être limitée aux zones très contaminées le cas échéant.

4. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

4.1. STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE

La stratégie d'échantillonnage définit le plan d'implantation des points d'observation sur la zone à étudier.

On recense plusieurs stratégies d'échantillonnage : certaines résultent d'une approche statistique (échantillonnage aléatoire, aléatoire stratifié, systématique, systématique aléatoire), hypothétique (échantillonnage de jugement), ou dans un but de recherche spécifique, fonction de la source ou du modèle de migration (échantillonnage de recherche de "hot-spots", recherche par profil, grille circulaire) ou, enfin, par une combinaison de ces différentes approches.

4.1.1. Approches statistiques

4.1.1.1. Échantillonnage aléatoire

La localisation des points d'échantillonnage est déterminée, sur l'ensemble de la zone étudiée, de façon arbitraire, basée par exemple sur l'utilisation d'une table de nombres randomisés (figure 1).

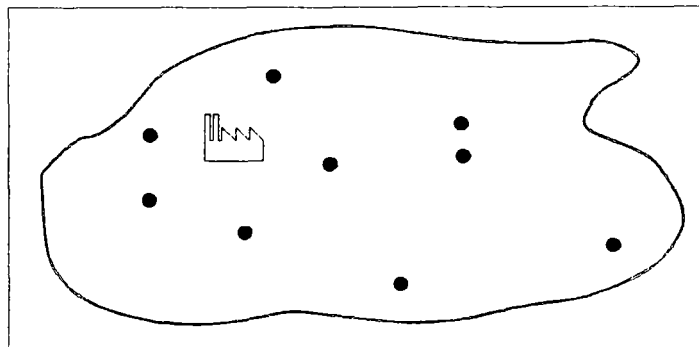


Figure 1 - Echantillonnage aléatoire (EPA, 1991 ; Hazardous Waste, 1992 ; ISO, 1993)

Cette démarche est indispensable pour associer des probabilités et des niveaux de confiance aux résultats d'échantillonnage ; cependant, ces traitements sont faussés si le site n'est pas homogène et les résultats issus d'une telle approche ne caractérisent alors pas les réelles conditions du site. Les déchets rencontrés sur les sites industriels étant rarement homogènes,

d'autres approches seront préférables, permettant notamment de subdiviser le site en parcelles plus homogènes (problèmes d'interpolation).

4.1.1.2. Échantillonnage aléatoire stratifié

L'échantillonnage aléatoire stratifié est une variante de l'échantillonnage aléatoire, où la zone étudiée est subdivisée en zones ou entités plus homogènes, permettant ainsi de se prémunir d'une source d'hétérogénéité (profondeur d'échantillonnage, type de polluant, type de milieu, niveau de concentration, ...). Ces différentes zones ou entités, appelées "strates", sont définies à l'issue de l'étude historique ou des résultats analytiques de criblage et sont alors échantillonnées selon un mode aléatoire (figure 2).

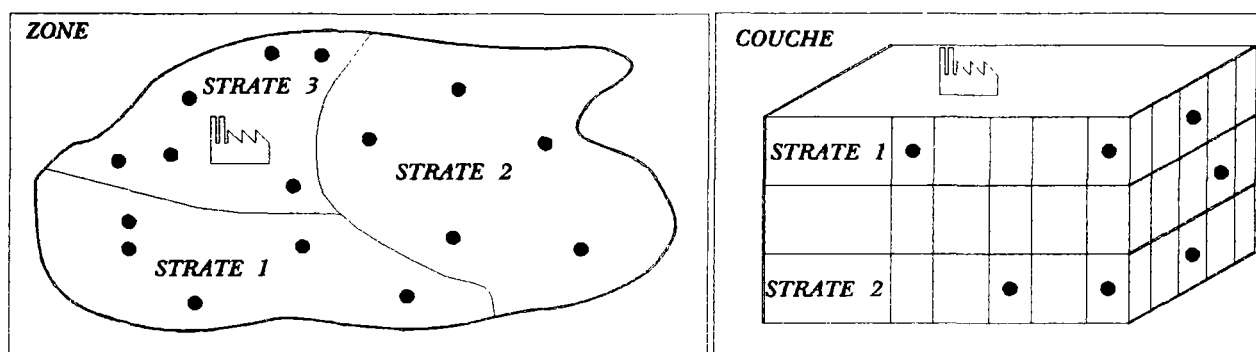


Figure 2 - Echantillonnage aléatoire stratifié (EPA, 1991 ; Hazardous Waste, 1992 ; ISO, 1993)

4.1.1.3. Échantillonnage systématique

L'aire d'étude est subdivisée grâce à un maillage régulier, carré, losangique ou triangulaire, au sein duquel les points d'échantillonnage sont déterminés par les noeuds du maillage ou localisés au centre de ces formes géométriques. L'origine de la grille est placée soit de façon aléatoire, soit de manière à optimiser la couverture de la zone (figure 3).

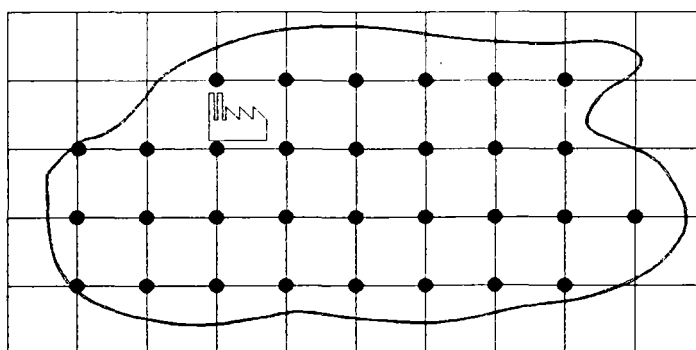


Figure 3 - Echantillonnage systématique (EPA, 1991 ; ISO, 1993)

Dans l'optique américaine, la maille de la grille est déterminée en fonction de la surface à étudier et du nombre d'échantillons réalisables (EPA, 1991). Par ailleurs, elle peut également être ajustée en fonction de la taille minimale des auréoles de contamination à détecter et du niveau de détail souhaité, selon qu'il s'agit de déterminer le degré moyen de contamination de la zone, la localisation de sources localisées, ou l'extension de la contamination (ISO, Part 1, 1993).

Les grilles systématiques ont l'avantage de faciliter la localisation des points et permettent facilement de ré-échantillonner une zone si les premiers résultats le nécessitent.

Cette approche est souvent utilisée pour délimiter l'extension d'une contamination et pour définir les gradients de concentration des contaminants (EPA, 1991, et technique classique d'exploration géochimique et rivière).

4.1.1.4. Échantillonnage systématique aléatoire

Comme pour l'échantillonnage systématique, l'aire étudiée est subdivisée selon un maillage régulier, mais les points d'échantillonnage sont déterminés de façon aléatoire, à l'intérieur de chaque maille (figure 4).

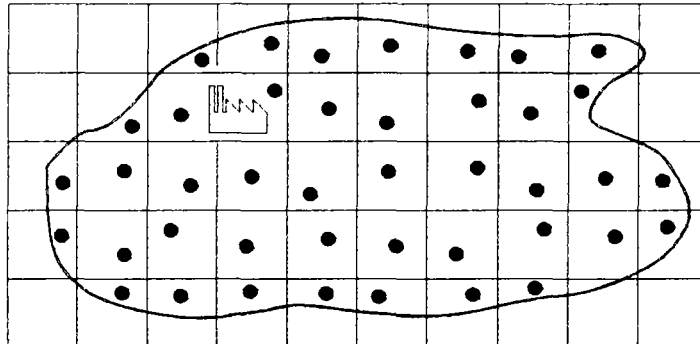


Figure 4 - Echantillonnage systématique aléatoire (EPA, 1991 ; ISO, 1993)

Cette approche est utile pour évaluer la concentration moyenne en polluant à l'intérieur de chaque maille et déterminer celles qui nécessitent un complément d'investigation.

Une variante de ce type d'échantillonnage est également citée pour laquelle seuls quelques points sont déterminés de façon aléatoire, et les autres déduits (échantillonnage systématique semi-aléatoire, Figure 5). La localisation des échantillons, au sein de chaque maille, est référencée par des coordonnées de type X,Y telles que :

- sur la première ligne, les Y sont aléatoires,
- sur la première colonne, les X sont aléatoires,
- sur la $i^{\text{ème}}$ colonne et la $j^{\text{ème}}$ ligne : $X_{ij} = X_{1j}$ et $Y_{ij} = Y_{i1}$ (ISO, Part 1, 1993).

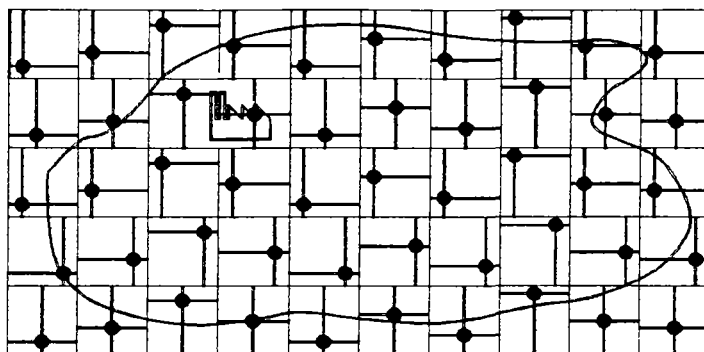


Figure 5 - Échantillonnage systématique semi-aléatoire (ISO, 1993)

4.1.2. Approches de recherche spécifiques

4.1.2.1. Échantillonnage par profils

Les points d'échantillonnage sont répartis régulièrement sur un ou plusieurs axes traversant l'aire étudiée, et se croisant entre eux (Figure 6).

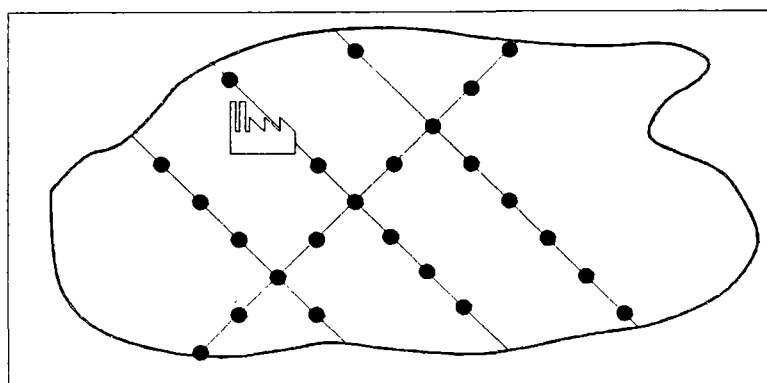


Figure 6 - Échantillonnage par profils (EPA, 1991 ; ISO, 1993)

Cette approche, qui présente l'avantage de limiter le nombre d'échantillons, est couramment utilisée pour déterminer l'extension d'une contamination et définir les gradients de concentration suivant les profils définis. Par ailleurs, elle peut également être étendue à la constitution d'échantillons composites.

4.1.2.2. Échantillonnage de recherche spécifique

C'est une approche qui intègre un maillage systématique ou systématique aléatoire, dans un but de détection de zones "anormales" (par rapport à des standards de décontamination par exemple).

La grille, carrée ou triangulaire, est calculée de manière à couvrir l'ensemble de la zone et en fonction du degré d'erreur admis (c'est-à-dire de la probabilité d'omettre un "hot-spot", compte tenu de la taille des spots à détecter) (Figure 7).

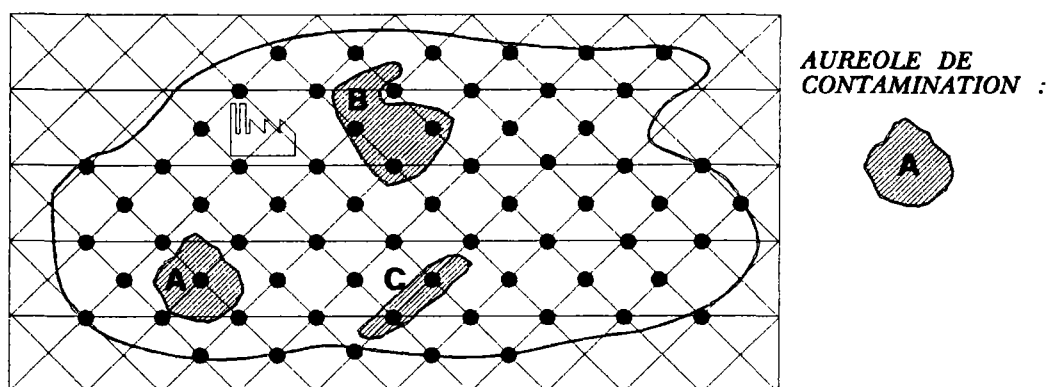


Figure 7 - Échantillonnage de recherche spécifique selon une grille triangulaire (EPA, 1991)

Des tables ont été publiées qui présentent la probabilité d'omettre un hot-spot en fonction de ses dimensions par rapport à la maille de recherche choisie, dans le cas d'une grille triangulaire et dans le cas d'une grille carrée. Le tableau 2 en est une représentation, qui exprime la possibilité d'omettre un hot-spot en terme de taux de réponses négatives fausses.

Par exemple, la probabilité de ne pas détecter une auréole de contamination, de forme circulaire ($E/S = 1$), et de rayon 10 mètres, au moyen d'une grille de recherche carrée de maille 20 mètres ($L/G = 0.5$), est 21 % ; pour une probabilité proche de 0 %, il faut une maille d'environ 15 mètres.

**FALSE NEGATIVE RATES ASSOCIATED WITH ELLIPTICAL HOT SPOT SEARCHES AS A
FUNCTION OF GRID SPACING AND HOT SPOT SHAPE**

Type of grid pattern (L/G)*	False negative rates					
	ES [†]					
	1.0	0.80	0.60	0.40	0.20	0.10
Triangular grid pattern						
0.1	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99
0.3	0.66	0.74	0.80	0.86	0.93	0.96
0.5	0.08	0.27	0.44	0.63	0.82	0.91
0.7	0.00	0.00	0.08	0.33	0.65	0.83
0.9	0.00	0.00	0.00	0.10	0.47	0.72
1.0	0.00	0.00	0.00	0.04	0.37	0.66
Square grid pattern						
0.1	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99
0.3	0.72	0.77	0.80	0.88	0.94	0.97
0.5	0.21	0.38	0.54	0.69	0.85	0.92
0.7	0.00	0.02	0.16	0.42	0.70	0.85
0.9	0.00	0.00	0.00	0.17	0.53	0.76
1.0	0.00	0.00	0.00	0.08	0.44	0.70

[†]Ellipse shape; ES = S/L, where S = short axis of hot spot and L = long axis of hot spot.

*L/G = Long axis of hot spot/grid spacing.

Source: EPA, February 1989.

Tableau 2 - Probabilité d'omettre un hot-spot avec un échantillonnage de recherche spécifique
(Hazardous Waste, 1992)

4.1.3. Approches hypothétiques

4.1.3.1. Échantillonnage de jugement (critique)

Il correspond à une sélection subjective des points d'échantillonnage basée sur l'étude historique réalisée et l'inspection visuelle du site (Figure 8).

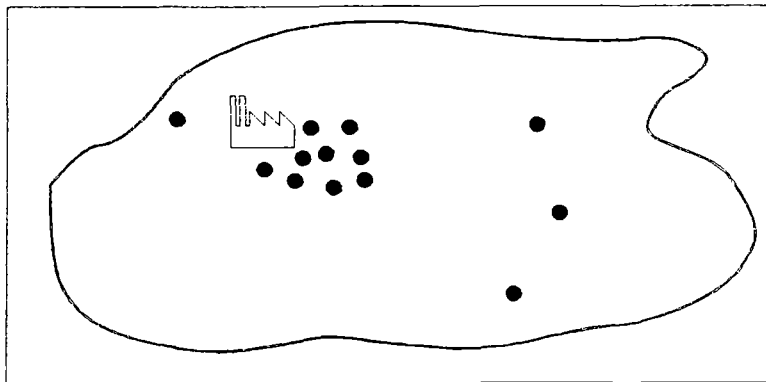


Figure 8 - Échantillonnage de jugement (EPA, 1991 ; ISO, 1993)

Cette démarche est essentiellement choisie pour définir les contaminants présents, et leur concentration sur les zones les plus suspectes, mais elle ne peut pas faire l'objet d'une interprétation statistique globale.

4.1.3.2. Grille circulaire

Les échantillons sont prélevés sur des cercles de rayon croissant, au niveau des 8 points principaux du compas (Figure 9).

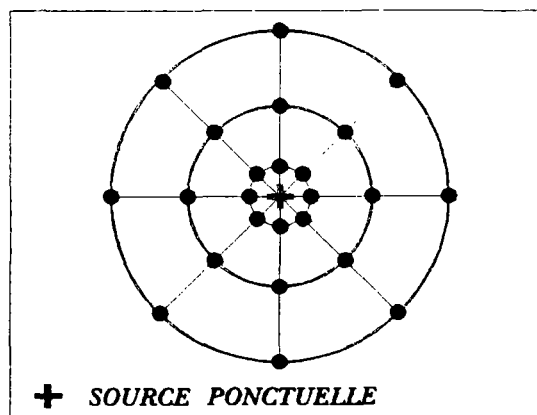


Figure 9 - Échantillonnage selon une grille circulaire (ISO, 1993)

Cette méthode est tout particulièrement adaptée pour les contaminations localisées à source ponctuelle (ex : retombée de cheminée, réservoir, ...). Elle fournit la concentration en substance au centre de la grille (valeurs maximales) et la distribution spatiale des concentrations autour de la source (extension, gradient).

Selon les cas, la densité de points d'échantillonnage peut être modulée, entre le centre de la grille et l'extérieur (contamination plus étendue, gradient faible), ou sur une direction particulière, si l'extension est supposée non-uniforme (direction du vent, écoulement de la nappe, ...). La répartition des points peut également être optimisée par rotation de l'étoile centrale (pas de 22,5°, renouvelable 3 fois par exemple).

4.1.3.3. Grille linéaire

Les échantillons sont régulièrement répartis le long d'une ou plusieurs lignes parallèles, et distantes entre elles du pas d'échantillonnage, avec une fréquence d'échantillonnage décroissante au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source (pas d'échantillonnage x 2, d'une ligne à la suivante, par exemple).

Ce type de distribution est adapté pour les sources de contamination linéaire, de type pipeline (Figure 10).

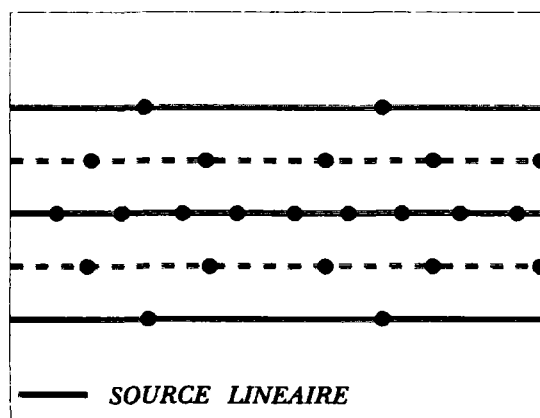


Figure 10 - Échantillonnage selon une grille linéaire (ISO, 1993)

4.1.3.4. Échantillonnage non-systématique

Les échantillons sont régulièrement répartis sur des modèles prédéfinis comportant au moins deux diagonales (du type N, S, W, X, zig-zag, ...).

Ce type d'échantillonnage est utilisé pour la caractérisation de zone de forme et de composition supposées homogènes (terrain agricole, sols de surface localisés, terrils, ...) (Figure 11).

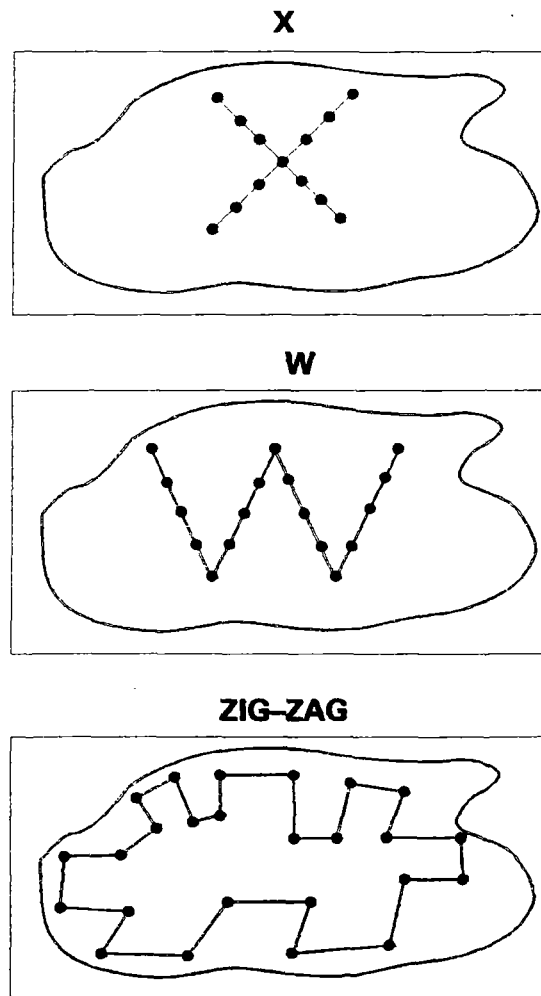


Figure 11 - Echantillonnages non-systématiques (ISO, 1993)

4.2. CHOIX DE LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

La stratégie d'échantillonnage est choisie en fonction de l'objectif d'échantillonnage, et est dimensionnée en fonction des objectifs de qualité des données, des moyens disponibles et des contraintes imposées par le site.

Aucune "recette de cuisine" n'est proposée pour sélectionner la stratégie d'échantillonnage : le choix de l'approche la plus appropriée est réalisé au cas par cas, et peut en combi-

ner plusieurs. Outre la description de chaque stratégie présentée ci-dessus (et comprenant leurs types d'application), plusieurs documents peuvent guider dans le choix de la stratégie la plus appropriée :

- le tableau 3 donne une première grille d'évaluation des différents types d'approches en fonction des objectifs de l'échantillonnage,
- le tableau 4 résume les avantages et les inconvénients des principaux types d'approches,
- l'annexe 1 expose brièvement les types de stratégies adoptés, dans l'approche européenne, en fonction de l'hypothèse de contamination formulée.

<i>Objectif</i>	<i>Stratégie Aléatoire</i>	<i>Stratégie Systématique</i>	<i>Stratégie Systématique aléatoire</i>	<i>Recherche</i>	<i>Aléatoire stratifié</i>	<i>Profil</i>	<i>Jugement</i>
<i>Evaluation du risque</i>	4	2 ^a	3	3	3	2	1
<i>Identification des sources</i>	4	2 ^a	3	2	2	3	1
<i>Délimitation de l'extension</i>	3	1 ^b	1	1	3	1	4
<i>Perspectives de décontamination</i>	3	2	2	4	1	2	3
<i>Contrôle de la décontamination</i>	1 ^c	1 ^b	1	1	3	1 ^d	4
Stratégie : 1 : la plus adaptée 2 : possible 3 : peu adaptée 4 : la moins adaptée	Commentaires : a : à appliquer avec une technique de criblage analytique de terrain b : adaptée seulement si des tendances sont connues c : validation statistique si l'ensemble du site est couvert d : possible si le site est supposé propre (plusieurs techniques)						

Tableau 3 - Evaluation des stratégies d'échantillonnage en fonction de l'objectif (EPA, 1991)

4.3. EN RÉSUMÉ

D'une manière générale, les modèles de type aléatoire offrent le plus de garanties dans l'obtention d'un échantillonnage objectif, et sont considérés comme l'approche la plus intéressante, notamment par les standards britanniques (BSI, 1988) ; le milieu, comme la contamination, sont alors assimilés à des variables aléatoires et étudiés comme tels, ce qui permet ensuite de traiter les données acquises de manière statistique.

COMPARISON OF SOIL SAMPLING STRATEGIES			
<i>Sampling strategy</i>	<i>Description</i>	<i>Application</i>	<i>Limitations</i>
Statistical sampling strategies:			
Random sampling	Representative sampling locations are chosen using the theory of random chance probabilities	<ul style="list-style-type: none"> Sites where background information is not available and no visible signs of contamination are present 	<ul style="list-style-type: none"> May not be cost-effective because samples may be located too close together Does not take into account spatial variability of soils
Stratified random sampling	Site is divided into several sampling areas (strata) based on background or site survey information; each stratum is evaluated using a separate random sampling strategy	<ul style="list-style-type: none"> Large sites characterized by a number of soil types, topographic features, past/present uses, or manufacturing/storage areas 	<ul style="list-style-type: none"> Often more cost-effective than random sampling More difficult to implement in the field and analyze results Does not take into account spatial variability of soils
Systematic grid sampling	Most common strategy; involves collecting samples at predetermined, regular intervals within a grid pattern	<ul style="list-style-type: none"> Best strategy for minimizing bias and providing complete site coverage Can be used effectively at sites where no background information exists Ensures that samples will not be taken too close together 	<ul style="list-style-type: none"> Does not take into account spatial variability of soils
Hot-spot sampling	Systematic grid sampling strategy tailored to search for hot spots	<ul style="list-style-type: none"> Sites where background information or site survey data indicate that hot spots may exist 	<ul style="list-style-type: none"> Does not take into account spatial variability of soil Trade-offs between number of samples, chance of missing a hot spot, and hot spot size/shape must be weighed carefully
Geostatistical approach	Representative sampling locations are chosen based on spatial variability of soil. Resulting data are analyzed using block kriging, which creates contour maps of the contaminant concentrations and the precision of concentration estimates.	<ul style="list-style-type: none"> More appropriate than other statistical sampling strategies because it takes into account spatial variability of soil Especially applicable to sites where presence of contamination is unknown 	—
Nonstatistical sampling strategies:			
Biased sampling	Sampling locations are chosen based on available information	<ul style="list-style-type: none"> Sites with specific known contamination sources 	<ul style="list-style-type: none"> Contaminated areas can be overlooked if they are not indicated by background information or visual signs of contamination Not usually recommended, especially for final soil investigations
Judgment sampling	An individual subjectively selects sampling locations that appear to be representative of average conditions	<ul style="list-style-type: none"> Homogeneous, well-defined sites 	<ul style="list-style-type: none"> Not usually recommended due to bias imposed by individual, especially for final soil investigations

Source: McCoy and Associates, Inc.

Tableau 4 - Comparaison des stratégies d'échantillonnage (Hazardous Waste, 1992)

Les grilles systématiques, rectangulaire ou triangulaire, permettent également un traitement statistique et sont faciles d'utilisation (localisation des points notamment) ; elles sont souvent utilisées en première approche, les zones critiques pouvant alors être échantillonnées à nouveau (optique européenne notamment). Elles permettent également l'application de traitement géostatistiques, dont l'atout par rapport aux autres techniques statistiques est d'intégrer la variabilité intrinsèque du sol.

Cependant, ces approches sont souvent rédhibitoires de par leur coût élevé, compte tenu du nombre d'échantillons à collecter. A l'inverse, les approches orientées par la connaissance a priori du site (échantillonnage de jugement), ou basées sur une hypothèse (approche "intelligente"), sont plus facilement adaptables en terme d'objectifs et de coût, mais sont davantage soumises aux aléas d'expertise.

La sélection d'un nombre réduit de points sur une grille systématique, ou le mélange d'échantillons en échantillons composites pour réduire le nombre d'analyses, sont autant d'approches combinatoires qui permettent d'appréhender différents types de situations.

Dans tous les cas, le choix de la stratégie est directement lié à l'objectif recherché et à la méthode d'interprétation utilisée pour les données ; la réussite du modèle choisi réside dans l'appréciation du degré d'adéquation d'une part, et la pondération des conclusions tirées en conséquence, au même titre que les données elles-mêmes, d'autre part.

5. CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCHANTILLONNAGE

5.1. NOMBRE DE POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE

Aux Etats-Unis, le nombre de points d'échantillonnage est calculé avec précision sur la base des critères de qualité des données, et va de paire avec la localisation de ces points.

Ce calcul repose sur l'optimisation du nombre de points en fonction des objectifs de qualité dans le cas des approches statistiques (équation itérative ; Hazardous Waste, 1992), et sur l'optimisation de la maille de la grille, en fonction de la taille minimale des auréoles de contamination à détecter dans le cas des approches de recherche.

Dans le cas d'échantillonnage plus subjectif (échantillonnage de jugement), le nombre de points ne suit pas de règles particulières ; il est fixé en fonction des objectifs et de la connaissance a priori du site (Hazardous Waste, 1992).

Plus couramment en Europe, le choix de la stratégie d'échantillonnage (localisation des points d'échantillonnage) et du nombre d'échantillons à prélever sont le fruit d'un compromis entre les objectifs visés, la taille du site, le type de contamination, le degré de précision souhaité et les moyens disponibles, compromis la plupart du temps arbitré par le jugement et l'expertise des concepteurs.

Cependant, les prémices d'une certaine formalisation apparaissent en Europe, et se traduisent notamment dans les travaux ISO, qui laissent toutefois une certaine liberté aux experts.

On note que :

- dans les standards britanniques, le nombre minimum de points d'échantillonnage s'élève à 15 pour une surface de 0.5 ha, 25 pour 1 ha et 85 pour 5 ha (BSI, 1988),
- la réflexion néerlandaise préconise, d'une manière générale, un minimum de quatre points d'échantillonnage par hectare, et différencie le cas de contamination supposée homogène, avec 6 points de prélèvement pour 1 ha (surface en ha + 5, soit 10 points pour 5 ha), des cas de contamination supposée hétérogène, avec un minimum de 4 échantillons par foyers (projet de norme néerlandaise ; Nederlands Normalisatie-Instituut, 1991).

De telles variations montrent bien la complexité des problèmes et la difficulté de prendre des standards applicables partout de manière identique, dans le milieu éminemment hétérogène, ouvert et vivant qu'est le sol.

5.2. PROFONDEUR DES ÉCHANTILLONS

La concentration en contaminants varie à la fois horizontalement et verticalement, en fonction de la configuration du site, de la nature du sol, du type de polluants et de l'âge de la contamination, de l'existence d'une nappe et de sa profondeur. Dans le cas de sites pollués, l'extension latérale et verticale est primordiale (approche 3D), ce qui les différencie des sites naturels ou agricoles, où certains éléments sont concentrés sur de vastes étendues, à faible profondeur (approche 2D) (ISO, Part 1, 1993).

En fonction du type de site et de la configuration supposée de la contamination, un ou plusieurs niveaux de profondeur doivent être échantillonnés, de manière à déterminer l'extension de la contamination en profondeur, et le gradient des concentrations. Cependant, ni l'ISO, ni l'EPA ne préconisent de recommandations particulières concernant la profondeur des ouvrages à réaliser et des échantillons à prélever, qui doivent être ajustées au cas par cas.

Compte tenu des objectifs d'échantillonnage, de la nature du sol et du type de polluant, l'échantillonnage peut être limité à la surface (zones non suspectes, contamination maintenue en surface par adsorption, ...), ou étendu en profondeur jusqu'au niveau présumé d'extension de la contamination, en sub-surface (sol perméable, contamination volatile, ...), et en zone saturée (pollution non soluble plus dense que l'eau).

L'échantillonnage de chaque niveau doit prendre en compte chacun des horizons traversés et, à moins d'une directive particulière, chaque horizon est en principe échantillonné séparément et en faisant attention de ne pas les mélanger (ISO, Part 1, 1993). Dans tous les cas, l'échantillonnage doit s'accompagner d'une description précise des horizons de sol traversés et des opérations effectuées sur chacun de ces horizons (ISO, Part 1, 1993).

5.3. NOMBRE D'ÉCHANTILLONS A PRÉLEVER

Le nombre d'échantillons à prélever est directement déduit de la stratégie d'échantillonnage (localisation des points à échantillonner) et des niveaux de profondeur à prospecter. Par exemple, dans le cas d'une grille systématique, un échantillon est prélevé à chaque noeud et pour chaque niveau de profondeur.

En deuxième approche, les mailles apparues critiques peuvent être ré-échantillonnées, à raison alors d'un minimum de 4 échantillons par maille si celle-ci excède 30 m x 30 m (directive EPA ; EPA, 1991).

Les standards britanniques préconisent, quant à eux, un minimum de trois échantillons par points d'échantillonnage, à répartir entre la surface et la profondeur à prospecter (BSI, 1988).

D'autre part, un certain nombre d'échantillons de contrôle visant à l'appréciation qualitative des données peuvent s'ajouter, en fonction du degré de qualité visé.

D'une manière générale, le dimensionnement de la campagne d'échantillonnage et son adéquation aux objectifs de qualité sont très formalisés aux Etats-Unis, plus souples et plus subjectifs en Europe, où seuls des indicateurs sont donnés.

5.4. TYPES D'ÉCHANTILLONS

La caractérisation de l'échantillonnage comprend également la définition du type d'échantillons, selon qu'ils sont remaniés ou non, constitués d'un seul prélèvement ou de plusieurs mélangés (échantillons composites).

5.4.1. Echantillons ponctuels et composites

5.4.1.1. Échantillon ponctuel

Les échantillons sont dits ponctuels, par opposition aux échantillons composites, s'ils sont prélevés en un seul point et à un moment donné. Ils permettent d'identifier et de caractériser la contamination en un point spécifique, et fournissent l'information la plus riche concernant la variabilité à travers le site.

5.4.1.2. Échantillon composite

Les échantillons composites sont constitués de plusieurs prises ponctuelles de sol, chacune ayant été préalablement homogénéisée et le mélange également homogénéisé. Ils sont donc représentatifs de la composition moyenne des échantillons dont ils sont issus et caractérisent la composition moyenne d'une zone (composite spatial ou moyen horizontal) ou d'un profil vertical (composite vertical ou moyen vertical), ce qui réduit le nombre d'analyses à réaliser, et diminue la variabilité intrinsèque de chaque échantillon.

Bien que ce type d'échantillonnage présente une économie évidente, il doit être pratiqué avec beaucoup de précautions pour trois raisons :

- les échantillons composites ne témoignent pas de la variabilité spatiale de la contamination,
- des concentrations faibles sur certaines des prises peuvent ne pas être détectées du fait de la dilution engendrée par le mélange, alors de concentration inférieure à la limite de détection analytique,
- l'homogénéisation des échantillons est rendue très difficile dans le cas de sols humides et argileux, et l'échantillon composite résultant est alors non représentatif de l'ensemble des sous-échantillons.

D'autre part, du fait de la dilution des hautes concentrations, engendrée par la composition d'échantillons, les limites de détection doivent être réduites en conséquence, et les valeurs de référence (seuil de contamination par exemple) doivent être divisées par le nombre de prises élémentaires pour être comparées au résultat composite.

Cette technique ne doit pas être utilisée dans le cas de contaminants volatils, et l'EPA préconise de limiter ces pratiques sur un même point d'échantillonnage et non entre plusieurs localisations.

Des informations supplémentaires concernant la préparation des échantillons composites sont données dans le paragraphe traitant de la préparation des échantillons (§ 7.3.2.5.).

5.4.2. Échantillons remaniés et non remaniés (intacts)

5.4.2.1. Échantillon remanié

Les échantillons remaniés sont des échantillons prélevés sans préserver la structure originelle du sol prélevé, c'est-à-dire que l'échantillon est "meuble" et les particules du sol libres de se recombinaison. Ce type d'échantillon est de ce fait inadapté à la description de profils pédologiques, description qui doit être réalisée in situ avant la prise d'échantillons, et à la réalisation de mesures physiques et d'examen biologiques (ISO, Part 2, 1993).

5.4.2.2. Échantillon non remanié

Par opposition, les échantillons non remaniés sont des échantillons intacts, c'est-à-dire qui conservent la structure du sol et la distribution des particules.

D'une manière générale, les échantillons composites et leurs parties sont des échantillons remaniés, alors que les échantillons ponctuels peuvent être remaniés ou intacts, en fonction de leur utilisation (ISO, Part 2, 1993) et de la façon dont ils sont prélevés.

5.4.3. Échantillons de contrôle et d'assurance qualité

Des échantillons spécifiques au contrôle de la qualité de l'échantillonnage et de l'analyse peuvent être réalisés sur le terrain ou en laboratoire et analysés en plus des échantillons prévus dans le plan d'échantillonnage. Ils permettent de déceler les éventuels biais, attestent de la qualité des données requises et aident à l'interprétation des résultats.

Ces pratiques sont généralisées aux Etats-Unis, dans un souci de validation des données, alors qu'en Europe on rencontre principalement les duplicats de terrain à des fins de contrôles

analytiques, sauf dans les équipes et les laboratoires engagés dans une procédure de contrôle et d'audit qualité.

5.4.3.1. Duplicats de terrain (ou doublon)

Un duplicat de terrain correspond à une portion d'échantillon homogénéisé et traité comme un échantillon séparé. La duplication d'échantillons, très utilisée d'une manière générale, permet d'identifier les biais liés à l'hétérogénéité du site et aux procédures d'échantillonnage et d'analyse.

L'EPA préconise un minimum de 8 échantillons dupliqués pour un traitement statistique (EPA, 1991).

5.4.3.2. Échantillons co-localisés

Les échantillons co-localisés sont prélevés à proximité des échantillons de routine (environ 50 cm) et permettent d'apprécier la variabilité locale du sol et de la contamination (EPA, 1991). Si cette approche doit être généralisée à l'ensemble du site, l'étude de la variabilité nécessite alors un très grand nombre d'échantillons (de l'ordre de 100 échantillons par hectare, soit un tous les 10 m). Cette pratique est principalement utilisée aux USA.

5.4.3.3. Échantillons du fond naturel

Ce sont des échantillons prélevés en amont de la contamination étudiée, dans un lieu où elle n'a pu migrer, qui permettent d'avoir une image précise de la composition initiale du sol, avant la contamination, et sont équivalents à des échantillons "propres" (approche importante lorsqu'il s'agit de sites naturellement riches en métaux par exemple ; EPA, 1991).

5.4.3.4. Blancs de rinçage

Les blancs de rinçage sont des échantillons d'eau issue du rinçage du matériel après décontamination qui permettent, à l'analyse, de vérifier l'efficacité de la procédure de nettoyage entre chaque prélèvement.

5.4.3.5. Échantillons d'évaluation

Ce sont des échantillons préparés par un tiers, contaminés par l'élément concerné et analysés par le laboratoire, de manière à détecter des éventuels biais analytiques (EPA, 1991).

5.4.3.6. Échantillons de test de la matrice

Ces échantillons ont pour but d'apprécier le comportement de la matrice par rapport au contaminant étudié. L'échantillon de test est contaminé en laboratoire par une concentration connue et l'analyse de routine est réalisée, qui permet d'apprécier l'interférence de la matrice par rapport à la procédure d'analyse suivie (phénomènes de relargage, piégeage, ...).

5.4.3.7. Blancs de terrain

Les blancs de terrain sont des échantillons préparés sur le terrain à partir de matériaux "propres" certifiés, et envoyés à l'analyse afin de détecter la contamination éventuelle des échantillons engendrée par les manipulations de terrain et de laboratoire. L'EPA préconise 1 blanc par jour (EPA, 1991).

5.4.3.8. Blancs de parcours

Les blancs de parcours suivent le même principe que les blancs de terrain, mais sont préparés avant de se rendre sur le terrain (pour les contaminants volatils uniquement).

6. TECHNIQUES D'INVESTIGATION

6.1. INTRODUCTION

On regroupe sous le terme générique de "techniques d'investigation" les techniques directes (techniques de "criblage") ou semi-directes (géophysiques) et les techniques d'échantillonnage des sols.

Les premières (techniques directes et semi-directes) sont brièvement rappelées pour leur utilisation lors d'investigations préliminaires, ou comme unique technique d'investigation dans des cas particuliers (l'ISO les préconise notamment dans le cas de contaminations hétérogènes, de points-source inconnus, dont l'étendue est supposée inférieure à 10 % du site ; ISO, Part 5, 1993). En échange, les techniques d'échantillonnage sont davantage développées, et des critères de choix sont également abordés.

6.2. TECHNIQUES DIRECTES ET SEMI-DIRECTES

6.2.1. Criblage analytique de terrain

Les méthodes de criblage analytique de terrain (équipement "léger") permettent de mesurer sur site les contaminants recherchés et de limiter le nombre d'analyses en laboratoire, qui requièrent un délai plus long et un coût généralement plus élevé.

Les données acquises sont parfois d'une qualité suffisante pour caractériser le site, suivre un procédé de décontamination et/ou évaluer le risque de contamination pour le milieu environnant ; cependant, elles ne sont ni quantitatives, ni spécifiques à un composé unique.

Le choix de la technique de criblage doit prendre en compte :

- le coût de la technique par rapport aux autres,
- le délai d'analyse d'échantillon sur le terrain,
- les interférences possibles et les limites de l'appareil (composés détectés, conditions environnementales, ...),
- les limites de détection, les impératifs de qualité et les niveaux de données à mesurer.

Le tableau 5 résume les avantages et les inconvénients de certaines de ces méthodes.

<i>Appareillage</i>	<i>Type d'application</i>	<i>Avantages et Inconvénients</i>
Fluorescence X	Détection de métaux lourds dans les sols	Temps de réponse court - Utilisation "in-situ" - Nécessité d'opérateurs confirmés - Risques d'interférences de la matrice - Détection au ppm - Limite de détection à étalonner sur site, et pouvant être supérieure au niveau recherché
Détecteur à ionisation de flamme	Détection semi-quantitative des COVs dans les sols	Résultats immédiats - Possibilités d'utilisation de la chromatographie en phase gazeuse pour identifier des composés spécifiques - Détection des COVs uniquement - Détection au ppm
Détecteur à photo-ionisation	Détection de la concentration totale dans les sols en COVs et certains composés organiques et inorganiques	Résultats immédiats - Facile d'utilisation - Pas de spécificité par composé - Interférences liées à l'humidité ambiante et aux sources électriques (radios) - Ne prend pas en compte le méthane - Détection au ppm
Kits d'analyse	Détection d'éléments spécifiques, de composés ou de familles de composés dans les sols	Résultats rapides - Faciles d'utilisation - Adaptabilité possible au besoin de l'utilisateur - Nombre limité de types de kits disponibles - Méthodes semi-quantitatives - Interférences en fonction des composés présents - Interprétation colorimétrique de la réponse - Sujet à erreur - Nécessite des expérimentations préalables en vraie grandeur
Détecteur de radiations	Détection de types de radiation dans les sols et les déchets	Facile d'utilisation - Coût réduit - Existence de sondes spécifiques et combinées en fonction des radiations à détecter (alpha, bêta, gamma) - Grande variété au niveau des limites et des unités de détection - Interprétation des résultats délicate

Tableau 5 - Méthodes de criblage de terrain (EPA, 1991)

6.2.2. Techniques géophysiques

Les techniques de détection géophysiques peuvent être utilisées conjointement aux techniques de criblage analytique pour faciliter la délimitation des zones de contaminations souterraines, et détecter la présence de dépôts ou de structures dans le sous-sol. Les données géophysiques peuvent être obtenues relativement rapidement et sans bouleversement du site.

Le tableau 6 résume les avantages et inconvénients de certaines de ces techniques.

<i>Appareillage</i>	<i>Type d'application</i>	<i>Avantages et Inconvénients</i>
Radar géologique	Détection d'anomalies souterraines (lithologie ou objet enterré) Profondeur d'investigation variable, entre 0 et 15 m suivant la nature des terrains	Haute résolution - Génération de profils de mesures en continu - Possibilité de quadriller une zone rapidement - Meilleurs résultats par temps sec et dans des sols sableux (les sols argileux et/ou saturés en eau interfèrent et limitent la profondeur de pénétration) - Interprétation nécessitant l'intervention de géophysiciens confirmés
Magnétomètre	Détection de la présence et de l'extension de matériaux ferromagnétiques dans les sols superficiels (bidons de 200 l identifiables à 3 m)	Facile et rapide d'utilisation - Outil très adapté pour un état initial - Lectures affectées par la proximité de structures en acier - Interprétation nécessitant l'intervention de géophysiciens confirmés
Conductimètre	Détection des variations de conductivité électrique du sol (couches lithologiques, fluides, objets enterrés) Profondeur d'investigation variable en fonction des appareils (0 à 30 m)	Collecte de données rapide - (Possibilité de délimiter à grande échelle une contamination organique et inorganique des fluides de sous-surface) - Interférences liées à la présence de structures - Réalisation et interprétation nécessitant l'intervention de géophysiciens confirmés
V.L.F.	Détection des variations de conductivité électrique en surface et sous-surface par la déformation des ondes à très basses fréquences Profondeur d'investigation jusqu'à 30 m	Utilisation de longues-ondes radios utilisées en communication (10-30 kHz) - Utilisation des émetteurs radio existants - Possibilité de problèmes directionnels - Interprétation nécessitant l'intervention de géophysiciens confirmés
Résistivimètre	Détection des variations de résistivité électrique dans des matériaux superficiels (lithologie, objets enterrés, fluides, structures, ...). Résolution verticale à des profondeurs de l'ordre de 30 m	Détection de variations verticales et horizontales - Travail difficile - Risques d'interférences - Interprétation nécessitant l'intervention de géophysiciens confirmés

Tableau 6 - Techniques géophysiques (EPA, 1991)

6.3. TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS

6.3.1. Introduction

La collecte d'échantillons nécessite une bonne connaissance des outils de prélèvement et le choix du matériel utilisé est capital dans l'obtention des objectifs visés. La technique d'échantillonnage à adopter dépend de la profondeur à échantillonner, du type d'échantillon à prélever et du type de sol présent sur le site.

Globalement, on distingue 5 grands principes d'investigation : les "outils" manuels (pour excavation et pour prélèvement), les tarières "légères" (manuelles et motorisées), les procédés de type "tube", les techniques de foration (tarières mécaniques, carottages, tubes de percussion et d'échantillonnage suspendus par câble, ...) et les procédés d'excavation (fosses et tranchées).

Pour chacun de ces principes d'investigation, un grand nombre de techniques existent, qui sont adaptées à l'échantillonnage de sol à des fins de diagnostic de pollution. Elles ont toutes leur spécificité et sont souvent complémentaires entre elles, certaines étant particulièrement intéressantes de par leurs propriétés de foration (grande profondeur, sols compactés, rapidité d'exécution, ...), d'autres, de par leur qualité d'échantillonnage (échantillons intacts, représentativité, précision, ...).

Un certain nombre de techniques sont décrites dans la partie qui suit, et des critères de choix sont indiqués. Bien que l'inventaire dressé ici ne puisse être exhaustif, il illustre les différents principes d'échantillonnage et met en évidence les paramètres à prendre en compte dans la sélection de la technique, ou des techniques à combiner. Notons que l'inventaire est rendu d'autant plus délicat que les désignations données aux techniques sont souvent spécifiques aux procédés mis en oeuvre, et varient en fonction des pays.

6.3.2. Présentation des différentes techniques

6.3.2.1. "Outils" manuels

Lorsque l'échantillon de sol doit être prélevé en surface ou à faible profondeur (15 à 30 cm), des petits outils, du type pelle, truelle, cuillère peuvent être utilisés. Ils sont également utilisés pour l'échantillonnage d'ouvrages excavés du type fosse, et pour toute opération de prélèvement et de préparation lors du conditionnement.

Ces outils ne permettent pas une très bonne répétabilité et sont déconseillés pour les contaminations volatiles (Keith, 1991). En outre, ils nécessitent d'être en acier inoxydable pour les composés organiques, et en polyéthylène haute densité pour les inorganiques, et doivent être décontaminés (ou remplacés) entre chaque échantillon.

6.3.2.2. Tarières légères

❖ Tarières manuelles

Plusieurs procédés de tarières manuelles sont proposées, qui permettent assez rapidement et au moyen d'un équipement léger de prélever des échantillons de sol à des fins de diagnostic de pollution. On distingue les tarières constituées d'une spirale continue, où l'échantillon est remonté et prélevé entre les dents de la spirale (Fig. 12), de celles comportant une gouge, où l'échantillon est maintenu dans une chambre cylindrique (Fig. 13), dont la forme peut varier en fonction des terrains à prélever (Fig. 14 et 15).

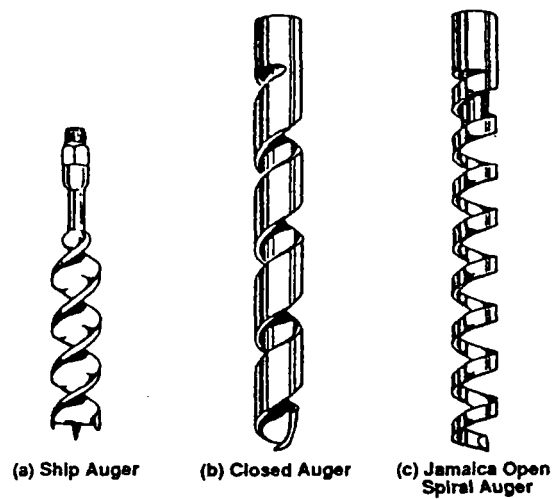


Figure 12 - Types de tarières à vis (ASTM Standards, 1992)

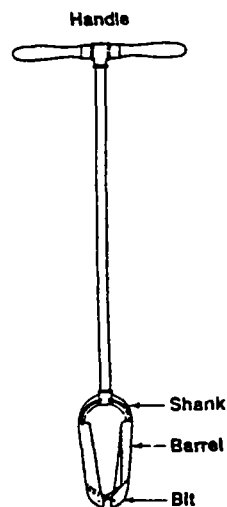


Figure 13 - Tarière à gouge (ASTM Standards, 1992)

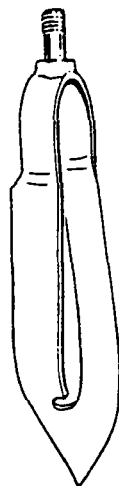


Figure 14 - Tarière de type allemand "Dutch Type Auger" (ASTM Standards, 1992)

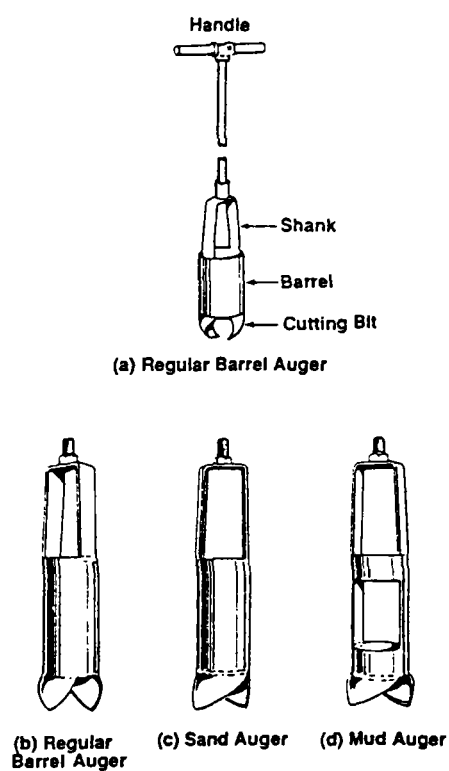


Figure 15 - Types de gouges en fonction du type de sol (ASTM Standards, 1992)

Les différents modèles sont plus ou moins adaptés en fonction du type de sol et du type d'échantillon à prélever ; certains indicateurs d'utilisation sont décrits dans le tableau 7 pour différents types de tarières. D'une manière générale, leur utilisation est plus aisée dans les sables, et peut atteindre 5 mètres (ISO, Part 2, 1993), alors qu'elle est d'utilisation plus difficile si le sol comporte des obstructions particulières ; en échange, la remontée des matériaux est plus aisée dans un sol cohérent que dans un sol meuble.

Dans tous les cas, l'appréciation des profondeurs de prélèvement est assez imprécise et l'échantillon prélevé est remanié. En outre, l'échantillonnage au moyen de tarières manuelles comporte un risque de contamination, soit par retombée de matériels dans le trou, soit lors de la remontée de l'outil ; l'utilisation d'un film en plastique est possible pour limiter ce risque. Pour les échantillons composites, il est important de veiller à ce que le volume prélevé à chaque fois soit identique.

Ce type de technique est principalement réservé à l'échantillonnage de terrain homogène (terrain agricole), ou pour une estimation moyenne des sols de surface (terrils, ...).

❖ *Mototarières*

Ce sont de petites tarières à spirale équipées d'un moteur, qui en facilite la pénétration, maintenues dans l'axe de la foration par deux personnes (Fig. 16).

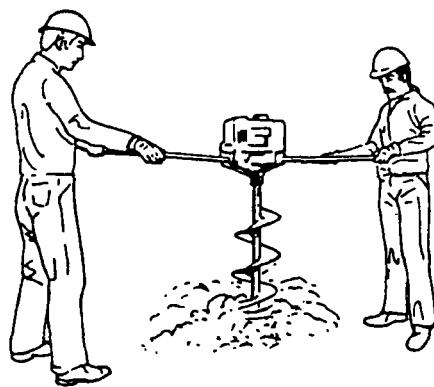


Figure 16 - Utilisation d'une mototarière

Leur utilisation présente les mêmes inconvénients que leurs similaires manuelles, tout en diminuant les difficultés de pénétration. En échange, elles introduisent un risque de contamination supplémentaire, lié au moteur de l'appareil (fuel, fumées, ...), et nécessitent des opérateurs expérimentés et solides, en raison des risques de blocage de la spirale dans le sol. Des mototarières électriques peuvent contribuer à limiter les risques de contamination par l'appareil et certaines, montées sur des véhicules tout-terrain, en facilitent l'utilisation, notamment dans le cas d'échantillonnages répétitifs.

TYPE OF SAMPLER	Obtains Core Sample		Most Suitable Core Types		Operation in Stony Soils		Most Suitable Soil Moisture Conditions			Access to Sample Sites During Poor Soil Conditions		Relative Sample Size		Labor Req'nts	
	Yes	No	Coh.	Cohless	Fav.	Unfav.	Wet	Dry	Inter.	Yes	No	Sm.	Lg.	Sngl.	2/more
A. DRILL RIG SAMPLERS															
1. Multipurpose Drill Rig	♦		♦	♦	♦		♦	♦	♦	♦		♦	♦		
2. Split-barrel Drive Sampler	♦		♦		♦			♦			♦		♦		♦
3. Thin-walled Tube Sampler	♦		♦			♦			♦	♦			♦		♦
4. Piston Sampler	♦		♦			♦	♦			♦			♦		♦
5. Continuous Sample Tube System	♦		♦		♦		♦	♦	♦	♦		♦	♦		♦
6. Hand-Held Power Auger		♦			♦					♦			♦		♦
B. HAND OPERATED SAMPLERS															
1. Screw-Type Auger		♦				♦	♦			♦		♦		♦	
2. Barrel Auger															
a. Post-hole auger		♦	♦		♦		♦			♦			♦	♦	
b. Dutch auger		♦	♦		♦		♦							♦	
c. Regular barrel auger		♦	♦		♦				♦	♦		♦		♦	
d. Sand auger		♦		♦	♦				♦	♦			♦	♦	
e. Mud auger		♦	♦		♦		♦			♦			♦	♦	
3. Tube-Type Sampler															
a. Soil sampling tube															
(1) Wet Tip	♦					♦	♦			♦				♦	
(2) Dry Tip	♦					♦	♦			♦		♦		♦	
b. Veihmeyer tube	♦								♦			♦		♦	

Tableau 7 - Critères d'utilisation des équipements d'échantillonnage (ASTM Standards, 1992)

6.3.2.3. Tubes et sondes (pulse boring ou dynamic probe)

Cette dénomination regroupe un ensemble de techniques où l'échantillonnage est provoqué par poussée d'un tube (ou d'une sonde) dans le sol, entraînant ainsi son remplissage sur toute la hauteur pénétrée. Selon les procédés, le diamètre du tube est variable (autour de 50 mm), et la poussée peut être d'origine mécanique, hydraulique, ou manuelle.

En comparaison des systèmes de type tarière, cette technique présente l'avantage d'être non-rotative, ce qui permet l'obtention d'échantillons intacts ; en échange, elle n'est pas adaptée à des sols compactés.

Différents procédés de ce type sont proposés :

- les tubes échantillonneurs de sol (soil sampling tube ou Lord samplers) (Fig. 17),
- les tubes Veihmeyer (ou King tubes) (Fig. 18),
- les tubes échantillonneurs à parois minces (thin-walled tube samplers ou Shelby tubes) (Fig. 19),
- les "ring-lined barrel samplers" (Fig. 20),
- les échantillonneurs à piston (piston samplers) (Fig. 21).

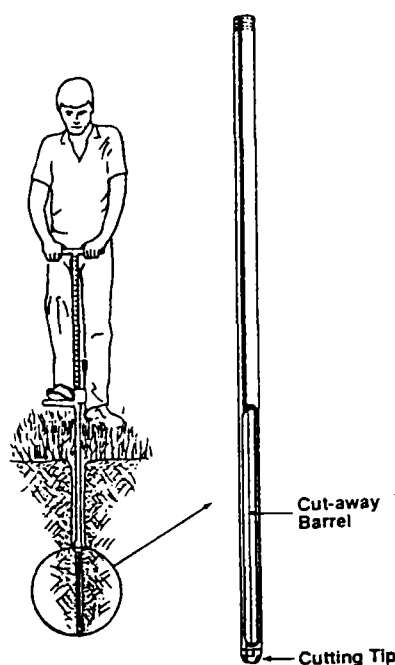


Figure 17 - Tube d'échantillonnage de sol (ASTM Standards, 1992)

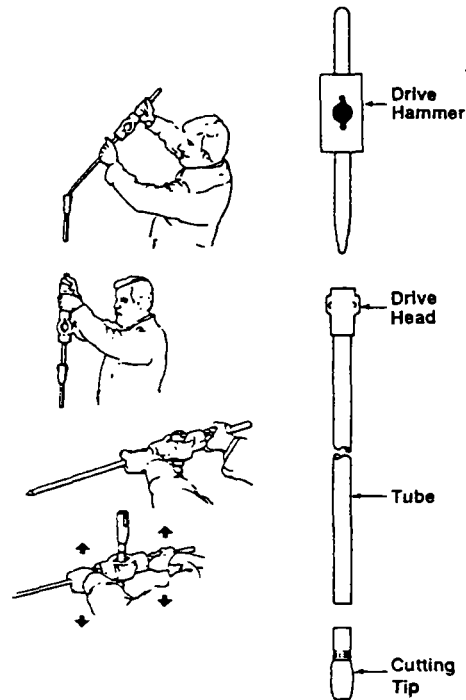


Figure 18 - Tube "Veihmeyer" (ASTM Standards, 1992)

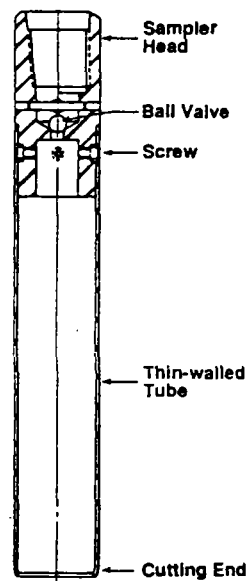


Figure 19 - Tube à parois pinces ou "Thin-walled tube sampler" (ASTM Standards, 1992)

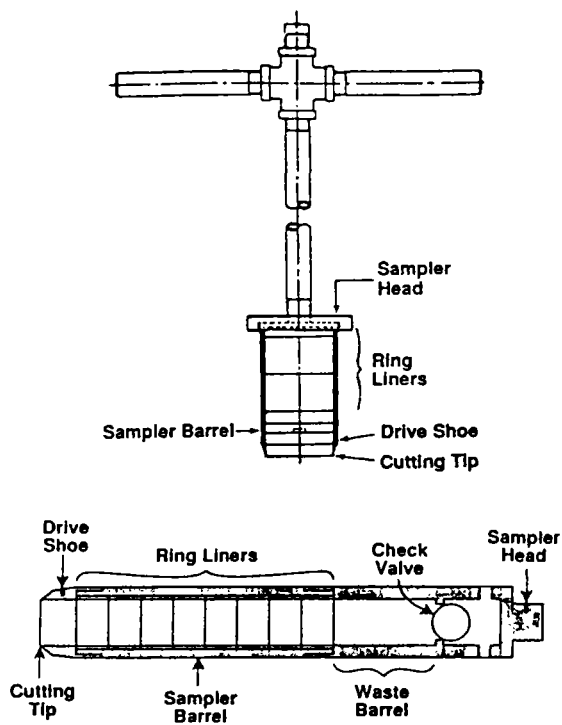


Figure 20 - Tube "Ring-lined barrel sampler" (ASTM Standards, 1992)

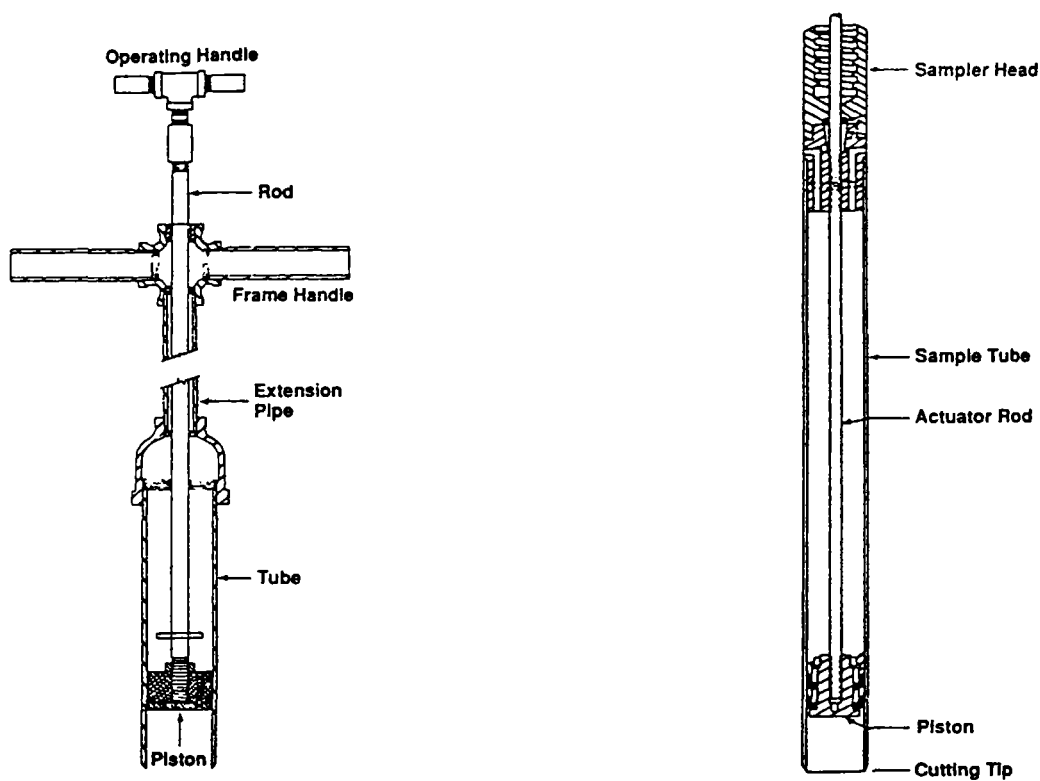


Figure 21 - Echantillonneur à piston (ASTM Standards, 1992)

Ces procédés peuvent être utilisés comme technique d'échantillonnage, ou pour atteindre rapidement la profondeur à échantillonner, en réalisant un sondage tubé continu ; des systèmes existent qui permettent, une fois la profondeur désirée atteinte, d'ôter la tête de foration, et de la remplacer par un équipement d'échantillonnage spécifique, alors poussé dans le sol pour le prélèvement.

6.3.2.4. Techniques de foration

❖ Tarières mécaniques (digger auger)

La foration par tarière est également une forme de foration rotative, où l'outil de tête est une tarière (spirale 360°), enfoncée dans le sol au moyen d'une machine, ce qui lui confère une puissance importante. La procédure de foration consiste à enfoncer la tarière sur environ 1 m, la retirer et ôter les déblais, puis renouveler la foration aussi loin que nécessaire.

Les échantillons ainsi prélevés ne sont pas intacts, et des risques de raclage entre niveaux existent, notamment dans les sols relativement meubles. Le prélèvement peut être effectué soit directement sur la spirale (sols limoneux et argileux par exemple), ou au moyen d'un outil de prélèvement spécifique plus fin introduit dans l'avant-trou foncé à la tarière (shelby tube par exemple, Fig. 22).

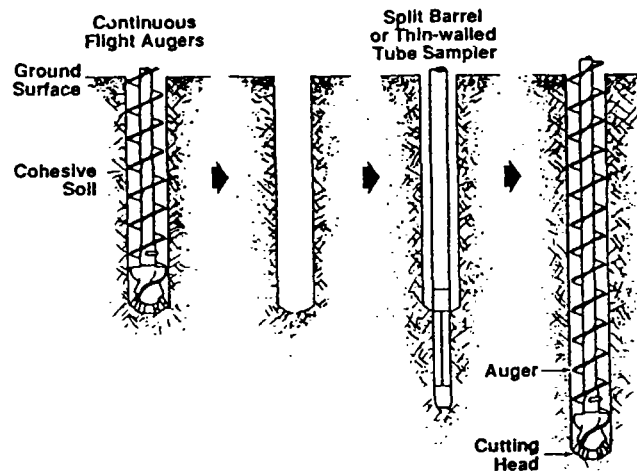


Figure 22 - Foration à la tarière et échantillonnage à l'aide d'un tube (ASTM Standards, 1992)

❖ *Tarières à pales continues (continuous flight auger)*

Procédé similaire au précédent mais constitué d'hélices tout le long de l'arbre de transmission et qui permet, au fur et à mesure de la rotation, de remonter en continu le sol depuis la base du forage jusqu'à la surface. Ce type de procédé présente l'avantage d'une foration rapide, mais ne permet pas de description du profil.

❖ *Tarières à tige creuse et tête amovible (hollow stem auger)*

Procédé similaire au précédent, mais où l'arbre de transmission (où sont fixées les hélices) est lui-même fixé à l'intérieur d'un tube, entraîné lors de la foration avec la tête de forage, et pouvant être laissé en place alors que le système interne est remonté à la surface (Fig. 23).

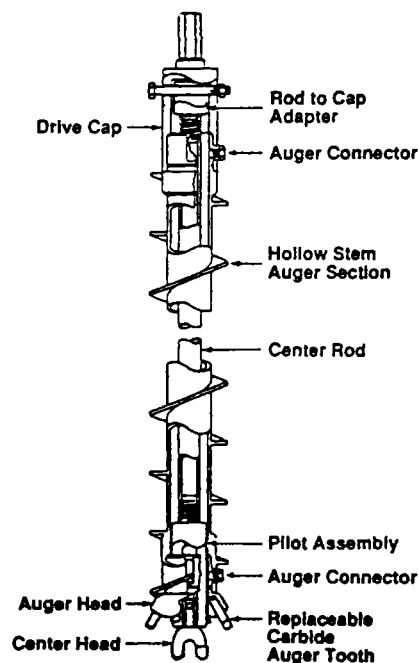


Figure 23 - Composition d'une tarière à tige creuse (ASTM Standards, 1992)

Ce système permet ainsi l'introduction de tout type d'équipement si le diamètre le permet (échantillonneur à tube, instrument de mesure, ...), l'opération de foration pouvant être reprise après (Fig. 24).

Des versions encore plus modernes prévoient l'introduction des équipements dans le tube au fur et à mesure de la foration (Fig. 25).

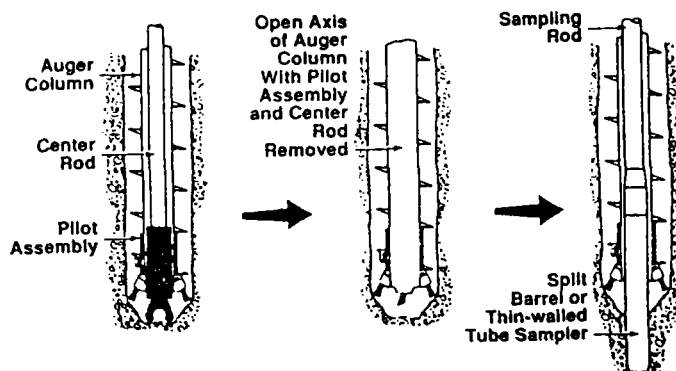


Figure 24 - Foration à la tarière à tige creuse et prélèvement au moyen d'un tube (ASTM Standards, 1992)

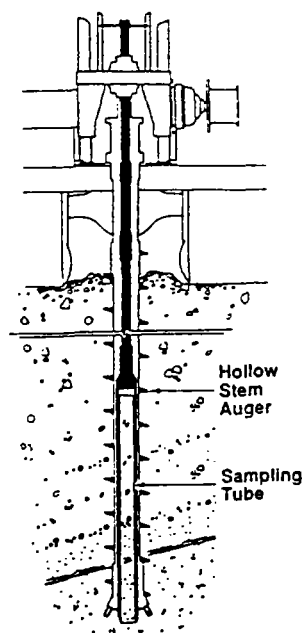


Figure 25 - Echantillonnage en continu sur tarière à tige creuse (ASTM Standards, 1992)

❖ Tarières à auge (bucket auger)

La tarière à auge est constituée d'un large cylindre (pouvant atteindre 30 à 180 cm de large et 60 à 122 cm de long, et dont le fond est équipé d'une fermeture à clapet), enfoncé dans le sol par rotation, au moyen d'un arbre de transmission, jusqu'à ce qu'il soit plein (remplissage par le bas). L'échantillonnage est alors réalisé au coeur de la prise, minimisant ainsi l'incidence du remaniement des sols sur l'échantillon prélevé (Fig. 26).

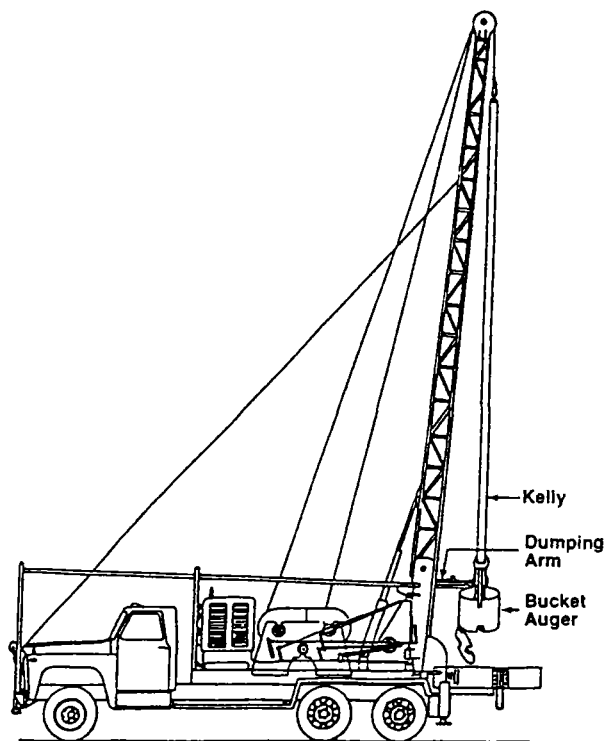


Figure 26 - Tarière à auge (ASTM Standards, 1992)

Ce type de technique est plus adapté dans des sols de type argileux, et la présence excessive de gros galets nécessite de les enlever entre chaque passe, notamment si leur section excède le quart du diamètre du cylindre (ASTM Standards, 1992).

❖ *Tubes de percussion et d'échantillonnage suspendus à un câble*

C'est une technique selon laquelle un puits est foncé par enfoncement gravitaire d'un outil de prélèvement, suspendu à un câble (du type soupape à clapets) et entraîné par un système de transmission motorisé. Au fur et à mesure de l'avancement, le sondage est supporté par un tubage en acier, qui permet également de guider l'outil.

En fonction du type de sol (argiles), la soupape peut progresser plus vite que le tubage ; il peut alors arriver que des fragments de sol se disloquent et tombent au fond du puits, d'où un risque accru de contamination entre niveaux.

Dans les sables, c'est le tubage qui progresse de façon préférentielle, permettant la retenue des terrains, mais avec un risque de remaniement des terrain avant leur extraction.

❖ *Procédés de carottage (soil coring device)*

Ce sont des outils de foration constitués d'un cylindre métallique dont l'extrémité est équipée d'une tête tranchante, et enfoncé dans le sol par rotation. Pendant la foration, un tube en plastique est placé dans le cylindre et recueille l'échantillon tel que, appelé "carotte". Ce type de prélèvement est intéressant pour toutes les déterminations nécessitant des échantillons non remaniés, notamment le dosage des composés volatils. Dans tous les cas, il convient de prélever au coeur de la carotte, et non sur la partie externe en contact avec l'outil.

En fonction du type de foret en tête et du type de sol, la foration est rendue plus ou moins difficile, et peut nécessiter un lubrifiant (eau, air, boue de forage), afin d'éviter l'échauffement de la tête et son encrassement ; la remontée des débris éjectés par le lubrifiant présente alors un risque de contamination.

Des procédés de carottage spécifiques existent, qui sont exposés ci-après.

❖ *Silver - bullet sampler*

C'est un procédé de carottage dont le cylindre comporte un tube échantillonneur en "verre de borosilicate", et est équipé d'une tête en dents de scie qui lui confère une plus grande capacité de foration dans des sols très durs ou très compactés. Il permet d'atteindre des profondeurs très importantes (Hazardous Waste, 1992).

❖ *Split-spoon sampler*

Le "split-spoon sampler" (ou échantillonneur à gouge fendue) est constitué d'un tube en acier inoxydable (ou en acier de carbone) fendu longitudinalement et équipé d'un guide de tête et d'un guide de pied (Fig. 27). L'échantillonneur est amené à la profondeur requise par percussion (profondeur limitée) ou au moyen d'un appareil de foration, à l'intérieur d'un tubage de type tarière à tige creuse, ou à l'intérieur d'un puits après enlèvement de l'équipement de foration (profondeur illimitée).

La prise est échantillonnée une fois démoulée, ou laissée intacte, et la fente tout le long de l'échantillonneur permet de fendre la prise en deux parties semblables (split sample).

Certains procédés, associant notamment le split-spoon sample (échantillonnage) à la tarière à tige creuse (foration), permettent un échantillonnage en continu, au fur et à mesure de la foration (Hazardous Waste, 1992).

❖ *Cônes pénétromètres (cone penetrometer)*

C'est un procédé qui se rapproche du split-spoon sampler, mais dont le tube est en plus équipé d'une fermeture à clapet, qui permet de le maintenir fermé jusqu'à la profondeur requise, alors que l'échantillonneur est enfoncé dans le sol par force. A la profondeur voulue, l'ouverture du tube déclenche l'échantillonnage (Hazardous Waste, 1992).

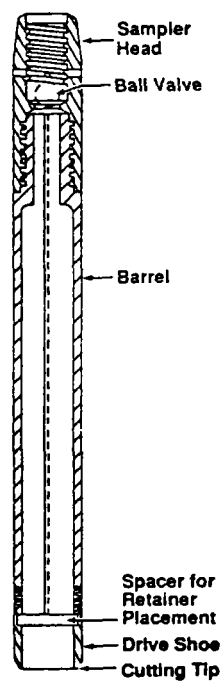


Figure 27 - "Split-spoon sampler" (ASTM Standards, 1992)

Cette technique ne nécessite pas de foration préalable, ce qui présente l'avantage de minimiser la quantité de sols potentiellement contaminés à gérer en fin d'échantillonnage. En échange, elle ne permet pas la formation d'un puits.

❖ ***Foration par lavage (Wash boring ou open hole drilling)***

Cette technique est constituée d'un appareil de forage, d'un trépied et d'un treuil. Un trépan tranchant est enfoncé par percussion, et le sol ainsi fragmenté est éjecté vers la surface via l'eau pompée, à travers la tige creuse de l'appareil de forage. Cette technique nécessite un tubage à l'avancement afin de prévenir des transferts de contamination et pour soutenir l'ouvrage ; elle constitue uniquement une technique de foration (ISO, Part 2, 1993).

6.3.2.5. Excavation (fosses et tranchées)

Cette technique consiste à creuser une fosse de section suffisante pour observer en vraie grandeur la stratification du sous-sol et à effectuer le prélèvement, soit dans la pelle sur le volume de sol excavé (notamment pour les échantillons composites), en évitant tout contact de l'échantillon prélevé avec les parois de la pelle, soit directement sur le parement de la fosse, par raclage des parois au moyen d'un outil manuel. Le prélèvement d'échantillons intacts en fond de fosse ou sur les parois est également envisageable (en fond de fosse, la pelle mécanique peut être utilisée pour remonter l'appareil sans descendre dans la fosse).

L'échantillonnage sur parement est plus représentatif de la variabilité locale (échantillons à intervalles réguliers) ; cependant, il nécessite un raclage préalable des parois à l'aide d'une spatule de manière à ôter la couche superficielle où les passages de la pelle ont engendré un mélange des différents horizons.

Cette technique est souvent utilisée pour des échantillonnage à faible profondeur (jusqu'à -2 m environ), et lorsque l'observation des terrains en place est importante. Dans l'optique américaine, elle est relativement peu utilisée, et limitée à la reconnaissance de zones source ("hot-spot") ou de dépôts de déchets, en raison d'un coût relativement plus élevé que pour l'échantillonnage à la tarière à main et de la non-reproductibilité de l'échantillonnage (Hazardous Waste, 1992). Au BRGM, elle est beaucoup plus généralisée car l'observation des terrains en place permet une meilleure interprétation des résultats analytiques.

Lors du creusement, un avant-trou doit être réalisé manuellement (1 m x 1 m) à titre de repérage, notamment si des réseaux souterrains sont susceptibles d'être rencontrés.

Afin de ne pas engendrer un risque de contamination, le volume de sol excavé est disposé à proximité, et en évitant tout risque de retombée des terres dans la fosse (éventuellement sur une bâche en plastique). Le sol de surface doit être gardé séparément, de manière à être pris en dernier lors du rebouchage ; et cette précaution peut être généralisée à l'ensemble des couches si les niveaux rencontrés le nécessitent.

Le dimensionnement de la fosse est donné en fonction de l'outil utilisé (pelle mécanique de 0.6 ou 0.9 m, ...) et en fonction de la profondeur à atteindre (en moyenne 2 x 2 m pour une

fosse ; \pm 1,5 m de large et de longueur déterminée en fonction des besoins pour une tranchée). La profondeur maximale possible est fonction du type de sol, du type d'outil et du taux d'humidité ; dans les argiles humides, elle peut atteindre 6 m, et sera plus souvent limitée à environ 3 m dans des sables (ASTM Standards, 1992).

Au-delà de 1 m de profondeur, l'utilisation d'outils mécanisés est impérative (pelle mécanique). Si l'excavation nécessite d'aller au-delà de trois mètres, un procédé de remontée en continu du matériel excavé est nécessaire, afin de conserver une bonne vision du fond de trou en permanence.

Ce type de technique est simple en mettre en oeuvre mais nécessite des consignes de sécurité particulières, en raison notamment des risques d'éboulement et de dégagements de gaz toxiques (voir paragraphe 6.3.4.).

6.3.3. Choix de la technique

6.3.3.1. Introduction

L'outil de prélèvement des échantillons peut avoir une incidence sur sa représentativité. Le volume et la géométrie pris en compte par la technique sont également des paramètres importants. Par exemple, l'utilisation d'une tarière manuelle pour un échantillonnage dont l'objectif est de déterminer le niveau de contamination à chaque interface entre horizons du sol est inappropriée, compte tenu du risque de mélange des couches au niveau des interfaces.

D'autre part, les équipements d'échantillonnage se doivent de minimiser "suffisamment" toute sorte de détérioration de l'échantillon, que se soit par dégradation (volatilisation, oxydation, dilution, ...) ou contamination (mélange de faciès, revêtement de surface, imprégnations, ...). Leur nettoyage doit être facile et rapide, ou bien peu coûteux, de manière à être remplacés après chaque usage.

Enfin, certaines procédures d'échantillonnage sont compliquées et nécessitent un apprentissage accru, introduisant une forte probabilité d'erreur le cas échéant.

6.3.3.2. Échantillonnage des sols de surface

Jusqu'à environ 50 cm de profondeur, les échantillons peuvent être prélevés au moyen d'outils légers de type truelle, pelle ou spatule. La couche superficielle du sol est enlevée jusqu'à la profondeur requise au moyen d'un outil d'excavation "propre", et la zone à échantillonner est alors raclée au moyen d'une spatule ou d'une cuillère en plastique ou en acier inoxydable, de manière à mettre de côté la fine couche de sol en contact avec l'outil d'excavation. Ensuite, l'échantillon est prélevé dans un récipient adéquat (acier inoxydable, plastique, verre, ...), homogénéisé de manière à obtenir un échantillon représentatif, puis conditionné. Si l'échantillon doit être analysé pour des composés volatils, il doit être directement conditionné, sans homogénéisation préalable, et en subissant le minimum de brassage. Si la prépa-

ration d'échantillons composites est prévue, l'ensemble des prises est mélangé dans le récipient avant le conditionnement du tout.

Cas d'échantillons de surface analysés pour des composés organiques volatils (Hazardous Waste, 1992)

L'équipement utilisé doit alors permettre un carottage du sol sur un profil équivalent à la profondeur à échantillonner, et les échantillons doivent être collectés par passe de 15 cm et conditionnés immédiatement.

La passe à prélever sur le profil peut être déterminée au moyen d'un détecteur de composés volatils (photo-ioniseur ou ionisation de flamme). Le détecteur est passé tout le long du profil sans contact direct avec le sol, soit le long d'une fente tracée sur tout le profil au moyen d'un couteau ou d'une spatule en acier inoxydable, soit sur la tranche du profil, sectionné à intervalles réguliers. Le prélèvement est réalisé sur une section non remaniée de 15 cm environ, au niveau où la plus forte concentration est détectée.

Sans détecteur de composés organiques volatils, la passe à prélever est déterminée en fonction de la nature du sol :

- si le sol est à dominante argileuse sur les 60 premiers centimètres, le prélèvement est réalisé sur cette portion, plus ou moins en profondeur en fonction du degré d'argile (entre 15 et 30 cm de profondeur pour un sol comprenant plus de 50 % d'argile ; entre 45 et 60 cm pour un sol comprenant entre 15 et 50 % d'argile) ;
- si le sol est peu argilo-limoneux (< 15 % d'argile) sur les 60 premiers centimètres, le prélèvement est réalisé sur les 15 cm supérieurs de la première couche argileuse rencontrée, ou au-dessus du niveau de la nappe s'il n'y a pas de couche d'argile.

Si aucune de ces solutions n'est possible, le prélèvement est réalisé à une profondeur maximale de 3 m environ.

6.3.3.3. *Échantillonnage des sols en sub-surface*

Plusieurs équipements existent qui permettent l'échantillonnage de sol en profondeur ; ils comprennent les tarières manuelles et mécaniques, les procédés de carottage, les tubes et les procédés d'excavation. En fonction de la profondeur à atteindre, du type de sol et des analyses à réaliser, chacune des techniques exposées précédemment est plus ou moins adaptée et nécessite une analyse au cas par cas.

D'une manière générale, l'utilisation de tarières manuelles permet de collecter rapidement des échantillons à faible profondeur, dans la mesure où la nature du sol le permet, et où il n'est pas nécessaire de collecter des échantillons intacts. A profondeur plus importante, ou si le sol est très compacté, on remplace les tarières manuelles par des mototarières, qui nécessitent d'être manipulées par deux personnes, et pouvant atteindre 6 à 8 mètres, ou par des tarières mécaniques.

Cependant, si l'objectif de l'échantillonnage impose la prise d'échantillons non remaniés, notamment pour l'analyse des composés organiques volatils, on utilise une technique permettant le carottage des terrains en place. Les descriptions précédentes ont montré l'existence d'un grand nombre de techniques spécifiques au carottage des sols, dont le principe repose sur le "noyautage" d'un profil cylindrique de sol pris intact au sein d'un tube.

Lorsque la foration est rendue délicate par les conditions du site, et en fonction de l'exigence de qualité, il est possible d'utiliser une technique de foration jusqu'à la profondeur requise, en évitant tout risque de contamination de l'ouvrage au cours de la foration, puis d'utiliser une technique spécifique à la prise d'échantillon après introduction dans le trou.

6.3.3.4. Synthèse

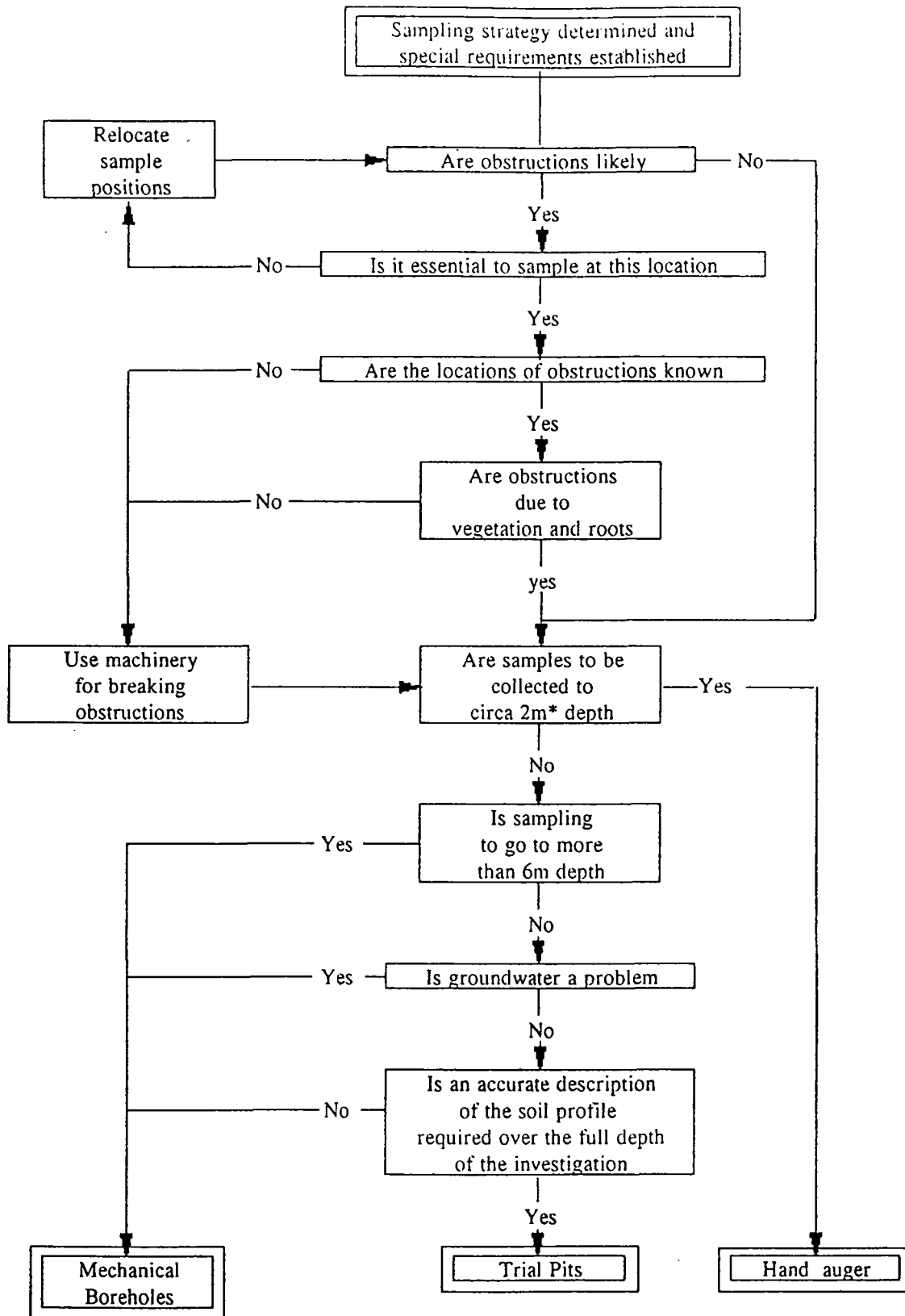
Là encore, il n'existe pas de règles strictes concernant la sélection de la technique d'investigation et d'échantillonnage ; elle est réalisée au cas par cas, en fonction des objectifs d'échantillonnage, des conditions du site et des contraintes matérielles (délais, coût, disponibilité , ...).

Au niveau technique, les critères à prendre en compte sont :

- le type d'échantillons à prélever,
- la (les) profondeur(s) à échantillonner,
- la présence potentielle d'obstructions,
- la nature du sol,
- la taille et la topographie de la zone à échantillonner,
- la profondeur de la nappe souterraine,
- le sens d'écoulement de la nappe,
- l'utilisation ou non de l'ouvrage après l'échantillonnage (équipement piézomètre, ...),
- la sécurité des personnes et la protection de l'environnement.

La figure 28, issue des travaux en préparation à l'ISO, est un exemple d'organigramme de sélection du type de technique, selon qu'il s'agit d'une tarière manuelle, d'un forage mécanique ou d'une fosse de reconnaissance, en fonction de certains de ces critères.

Par ailleurs, les tableaux 8, 9 et 10 résument les principales caractéristiques des différentes techniques exposées précédemment, et constituent une base à la méthodologie de sélection ; le tableau 8 provient des travaux en préparation de l'ISO (approche européenne), alors que les tableaux 9 et 10 sont issus de documents publiés par l'EPA (approche américaine).



* Sampling at greater or lesser depths may be achieved depending upon the nature of the soil.

Figure 28 - Exemple d'organigramme de sélection de la technique d'investigation (ISO, 1993)

APPLICABILITY OF GROUND EXCAVATION, DRILLING AND SAMPLING TECHNIQUES

Designation	Method	Method of Sample Extraction	Normal Area/Diameter	Soil Profile Detail	Suitability for Ground Type		Suitable below Water Table	Type of Sampling Possible	Depth of Sampling	Comments
					Unsuitable for Soil Type	Suitable for Soil Type				
Manual Methods										
Hand auger	Rotary	With auger	50mm-100mm	50mm	Non cohesive gravel, stones, rubble, lumps of material	Clay, silt, cohesive sand and similar ground	No	Disturbed	0-2.0m *	Sampling to 5.0m possible in cohesive sandy ground.
Hand excavation	Digging	With sampling tool	1m x 1m	10mm	Solid concrete or similar obstruction	All types	No	Disturbed and undisturbed	0-1.5m	In unstable ground the sides may need support
Power Driven Sampling Holes										
Power auger	Rotary	With auger	50mm	50mm	Non cohesive gravel, large stones, lumps of material	Clay, silt, cohesive sand and similar ground	No	Disturbed	0.05-2.0m*	Sampling to 5.0m possible in cohesive sandy ground.
Pulse boring/ dynamic probe	Ramming	With sample tool on machine	50mm	25mm	Gravels, large stones, lumps of material	Clay, silt, cohesive sand and similar ground	Yes	Disturbed and undisturbed	0.5-10m	

Tableau 8 - Comparaison des techniques d'échantillonnage : travaux de l'ISO (ISO, 1993)

Designation	Method	Method of Sample Extraction	Normal Area/Diameter	Soil Profile Detail	Suitability for Ground Type		Suitable below Water Table	Type of Sampling Possible	Depth of Sampling	Comments
					Unsuitable for Soil Types	Suitable for Soil Type				
Boreholes										
Cable tool	Percussion	With boring tool	150-250mm	100mm	Obstructions, e.g. tyres, wood, concrete	Clay, silt, cohesive sand and similar ground	Yes	Disturbed and undisturbed	0.5-30m	
Rotary drills	Rotary	Not possible. For borehole formation only	150-500mm	300-500mm	Solid obstructions	All soils	No	None	1.0-40m	Suitable for passing through top layers which are not of interest.
Digger auger	Rotary	Not possible	150-500mm	300-500mm	Solid obstructions	All soils	No	None	1.0-20m	Suitable for passing through top layers which are not of interest.
Continuous flight auger	Rotary	Not possible	150-500mm	300-500mm	Solid obstructions	All soils	No	None	1.0-20m	Suitable for passing through top layers which are not of interest.
Hollow stem auger	Rotary	With sampling equipment down stem	150-500mm	50mm	Solid obstructions	All soils	Yes	Disturbed and undisturbed	1.0-20m	Sampling down centre stem with auger in situ
Wash boring	Pressure	Not possible	30-150mm	Not possible	Strongly cohesive soil, gravels, stone, brick	Silt, sand, fine gravel	No	None	0-10m	Suitable for passing through top layers which are not of interest.
Machine Excavations										
Trial Pit	digging	With sampling tools	3m-4m x 1m	10mm	Large solid obstructions	All soils and material	No	Disturbed and undisturbed	0-6m	

Tableau 8 (suite) - Comparaison des techniques d'échantillonnage : travaux de l'ISO (ISO, 1993)

Equipment	Applicability	Advantages and Disadvantages
Trier	Soft surface soil	Inexpensive; easy to use and decontaminate; difficult to use in stony, dry, or sandy soil.
Scoop or trowel	Soft surface soil	Inexpensive; easy to use and decontaminate; trowels with painted surfaces should be avoided.
Tulip bulb planter	Soft soil, 0-6 in.	Easy to use and decontaminate; uniform diameter and sample volume; preserves soil core (suitable for VOA and undisturbed sample collection); limited depth capability; not useful for hard soils.
Soil coring device	Soft soil, 0-24 in.	Relatively easy to use; preserves soil core (suitable for VOA and undisturbed sample collection); limited depth capability; can be difficult to decontaminate.
Thin-wall tube sampler	Soft soil, 0-10 ft	Easy to use; preserves soil core (suitable for VOA and undisturbed sample collection); may be used in conjunction with bucket auger; acetate sleeve may be used to help maintain integrity of VOA samples; easy to decontaminate; can be difficult to remove cores from sampler.
Split spoon sampler	Soil, 0 in.-bedrock	Excellent depth range; preserves soil core (suitable for VOA and undisturbed sample collection); acetate sleeve may be used to help maintain integrity of VOA samples; useful for hard soils; often used in conjunction with drill rig for obtaining deep cores.
Shelby tube sampler	Soft soil, 0 in.-bedrock	Excellent depth range; preserves soil core (suitable for VOA and undisturbed sample collection); tube may be used to ship sample to lab undisturbed; may be used in conjunction with drill rig for obtaining deep cores and for permeability testing; not durable in rocky soils.
Bucket auger	Soft soil, 3 in.-10 ft	Easy to use; good depth range; uniform diameter and sample volume; acetate sleeve may be used to help maintain integrity of VOA samples; may disrupt and mix soil horizons greater than 6 inches in thickness.
Hand-operated power auger	Soil, 6 in.-15 ft	Good depth range; generally used in conjunction with bucket auger for sample collection; destroys soil core (unsuitable for VOA and undisturbed sample collection); requires 2 or more equipment operators; can be difficult to decontaminate; requires gasoline-powered engine (potential for cross-contamination).

Tableau 9 - Comparaison des techniques d'échantillonnage : synthèse EPA en 1991 (EPA, 1991)

COMPARISON OF SOIL SAMPLING EQUIPMENT

<i>Sampling device</i>	<i>Application</i>	<i>Limitations</i>
Spoons and scoops	<ul style="list-style-type: none"> • Surface soil sampling or sampling from the sides of pits or trenches 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited to relatively shallow depths
Hand bucket auger	<ul style="list-style-type: none"> • Sampling from depths of 3–40 inches • Relatively fast sampling method 	<ul style="list-style-type: none"> • May not retain dry, loose, or granular material • Destroys the structure of cohesive soil • Cannot be used to collect samples for core analysis • Should not be used for collecting samples for volatile organic analysis • Difficult to bore through tight clays and cemented sands
Power auger	<ul style="list-style-type: none"> • Used to bore holes to 20–25 ft when hand augering is not feasible; a hand auger is typically used to collect the sample • Reduces sampling time 	<ul style="list-style-type: none"> • High initial cost • Potential for sample contamination • More rigorous decontamination procedures required • Cannot be used in rocky soils
Soil coring device	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent for collecting core samples for volatile organic analysis 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficult to bore through rocky or tightly packed soil
Silver-bullet sampler	<ul style="list-style-type: none"> • Provides core samples similar to those of the soil coring device • Serrated bit allows it to bore through rocky or tightly-packed soils • Can reach greater depths than the soil coring device 	NA
Split-spoon sampler	<ul style="list-style-type: none"> • Collects representative soil samples from a large range of depths • Ideal for collecting split samples, volatile organic samples, and geologic data 	<ul style="list-style-type: none"> • Requires a drilling rig for obtaining deeper samples
Shelby tube	<ul style="list-style-type: none"> • Provides relatively undisturbed core samples • Used to collect geologic data • Inexpensive • Tube may be used to ship the sample without disturbing it • Easily cleaned 	<ul style="list-style-type: none"> • Cannot retain loose and watery soils • Cannot be used in rocky soils • May be difficult to extract sample
Cone penetrometer	<ul style="list-style-type: none"> • Modification of standard split-spoon sampler • Releasable tip allows split-spoon samples to be collected without drilling • Amount of soil cuttings generated greatly reduced 	NA
Backhoe	<ul style="list-style-type: none"> • Collects shallow subsurface soil samples for detailed study of soil characteristics • Should only be used when attempting to find hot spots or buried waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Not cost-effective • Sampling results not reproducible • Presents serious health and safety risks

NA = Not applicable.

Sources: EPA (2/1/91) and the New Jersey Department of Environmental Protection and Energy.

Tableau 10 - Comparaison des techniques d'échantillonnage : synthèse EPA en 1992
(Hazardous Waste, 1992)

6.3.4. Précautions diverses

Les risques liés à la pratique des différentes techniques d'échantillonnage sont de trois ordres :

- risques pour les personnes (aspect sécurité),
- risques pour l'environnement (aspect protection),
- risques d'interférences à la représentativité de l'échantillon (aspect qualité).

6.3.4.1. Sécurité des personnes

Dresser un inventaire exhaustif des consignes de sécurité n'est pas l'objet de ce rapport, et il faudra se reporter par exemple aux documents préparés par l'ISO, Partie 2 (norme à paraître).

Cependant, toutes les mesures de sécurité doivent être recensées et respectées pour éviter les risques d'exposition des personnes. Outre tout l'aspect chantier qu'engendre une campagne d'échantillonnage (manipulation d'engins, encombrement des voies de circulation, travaux souterrains, percussion, bruit, ...), et qui nécessite tout un nombre de mesures, les personnes présentes sur le site doivent se préserver des risques de contaminations, accrus par les travaux de foration. Par exemple, pour descendre en fond de fosse ou dans une tranchée il convient de s'équiper d'un casque, de gants de protection, de bottes armées et d'un masque s'il y a des risques de dégagements toxiques, ainsi que d'un harnais (risques d'éboulement), une deuxième personne restant, pendant toute la durée de l'opération, en surface pour intervenir en cas d'incident ou d'accident.

Toutes les précautions doivent être prises pour éviter le contact direct des intervenants avec des matériaux pollués.

Selon les sites, l'intervention est soumise aux règles de sécurité en vigueur, et nécessite un certain nombre d'autorisations et de permis de fouilles, notamment dans le cas de sites industriels en activité.

6.3.4.2. Protection de l'environnement

La réalisation d'ouvrages peut constituer une source de contamination de l'environnement par perturbation du milieu, création de voies préférentielles de migration des polluants dans le sous-sol ou la nappe, déplacement d'un pôle de contamination (perforation d'une poche, d'une couche imperméable, remblaiement), nuisances particulières (odeurs, fumées, boues transportées par le passage d'engins, ...). La liste des précautions à prendre n'est pas exhaustive, et ce sont l'expérience, la sensibilisation et le bon sens des opérateurs qui permettent de faire les bons choix.

Notons cependant quelques indicateurs de précaution :

- minimiser les risques en limitant l'étendue des zones d'investigation et de manipulation,
- nettoyer l'ensemble du matériel après chaque point de prélèvement,

- recombler les fosses dans la mesure du possible dans l'ordre dans lequel elles ont été excavées (notamment couches suspectes au-dessus du niveau de la nappe),
- lorsque le toit de la nappe est peu profond, réaliser le comblement des fosses avec précaution afin de prévenir d'un éventuel effet de chasse en cas de contamination (flottants notamment) ou remontée des contaminants en surface,
- cimenter les forages suspects pour éviter une dispersion de la contamination et matérialiser la surface pour les relocaliser facilement et éviter leur démolition par le passage d'engins,
- mettre en décharge le matériau de foration,
- stopper les ouvrages si une couche imperméable est rencontrée (fondation, tarmac, argile), et/ou cimenter l'ouvrage à la fin,
- tuber le forage à l'avancement pour éviter le risque de contamination entre niveaux,
- etc.

6.3.4.3. Intégrité de l'échantillon prélevé

Dans la mesure du possible, tout risque d'interférence de la technique à la représentativité du prélèvement doit être minimisé (mélange de couche, mauvaise appréciation des cotes de prélèvement, contamination de l'outil, ...). Là encore, la liste des précautions à prendre n'est pas exhaustive et doit faire l'objet d'un inventaire au cas par cas, exercé le plus souvent directement sur le terrain. Les précautions liées aux techniques d'investigation les plus couramment citées sont les suivantes :

- nettoyage de l'ensemble des outils et équipements utilisés entre chaque échantillon,
- tout risque de contamination lié aux appareils (fuel, graisse, lubrifiant, ...) doit être contourné, et seuls l'eau ou tout lubrifiant n'interférant pas avec la matrice ou l'analyse peuvent éventuellement être utilisés,
- le prélèvement doit être réalisé avec une pelle en acier inoxydable, dont la qualité est régulièrement contrôlée.

6.3.5. Choix des opérateurs

L'équipe d'échantillonnage doit être formée à l'ensemble des aspects techniques exposés ci-dessus (technicité de l'ouvrage, aspect sécurité) et impliquée dans l'objectif global de l'échantillonnage, afin d'être à même d'agir en accord avec cet objectif. D'une manière générale, elle est constituée d'une équipe de foreurs et d'une équipe de concepteurs, les compétences et intérêts de chacun pouvant ainsi être partagés.

7. PRÉLÈVEMENT, CONDITIONNEMENT ET TRANSPORT

7.1. INTRODUCTION

L'opération de prélèvement, conditionnement et transport constitue la phase de réalisation de l'échantillonnage, tel qu'il a été conçu. Phase capitale dans la qualité des données acquises et de celles issues des phases ultérieures (analyse et traitement), elle est souvent réalisée dans des délais assez courts, et est sujette à toute sorte d'aléas imprévisibles.

D'une manière générale, toutes les précautions doivent être prises, notamment pour minimiser les risques de dégradation ou de contamination des échantillons, dégradation par effet de volatilisation, oxydation ou biodégradation, contamination par effet de mélange, mise en contact ou imprégnations ambiantes.

7.2. REPÉRAGE DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE SITE

Le repérage des points sur le site constitue la première étape de l'intervention. Il doit être effectué le plus précisément possible par rapport au plan d'échantillonnage prévu, et soigneusement reporté sur un fond cartographique adéquat, de manière à pouvoir renouveler l'échantillonnage si besoin, intervenir de façon ponctuelle sur une zone, ou stocker et traiter les données dans un système d'information géographique.

Il est réalisé par équipe d'au moins deux personnes et nécessite un simple outillage de repérage (type topofil, théodolite, ...). Dans le cas d'un site présentant des risques d'ouvrages souterrains (réseaux d'eau potable, égout, pipe-line, réservoir, ...), la localisation doit être effectuée à l'aide d'une personne compétente, connaissant bien le site, et munie de documents de localisation des dits ouvrages.

Pour un traitement statistique des données recueillies (échantillonnage non-subjectif), la sélection des points d'échantillonnage doit être réalisée avec précaution, et toute interférence aux localisations prévues (végétation, accessibilité, subjectivité, ...) constitue un biais au plan d'échantillonnage statistique (EPA, 1991). Selon l'ISO, si certaines localisations d'échantillons "prévues" sont rendues impossibles (arbres, bâtiment, fondations, réseaux utilitaires, ...), des dispositions doivent être envisagées (suppression du point ou déplacement, dans une marge d'environ 10 % de la maille). Dans tous les cas, ces modifications doivent être explicitées et prises en compte dans le rapport (ISO, Part 1, 1993).

7.3. PRÉLÈVEMENT

L'opération de prélèvement peut affecter la représentativité de l'échantillon. D'une manière générale, les résultats analytiques seront d'autant plus représentatifs que le volume prélevé est important.

7.3.1. Volume prélevé

Le volume d'échantillon approprié est dépendant de la profondeur et de la surface échantillonnée.

Selon la nature du problème posé et les éléments recherchés, les échantillons sont collectés en surface (0 - 10 cm), en surface étendue (0 - 15 cm), et/ou à des intervalles de profondeur d'environ 30 à 50 cm. Notamment, les composés non solubles, tels que les dioxines ou les PCB, se trouvent principalement piégés dans les 15 premiers centimètres ; les contaminants solubles, tels que certains métaux, les acides, les cétones et les alcools, se trouveront plus en profondeur, à moins qu'une couche d'argile constitue une barrière suffisante à leur pénétration. Les contaminants en solution, tels que les PCP, présents dans le fuel diesel, et les pesticides, présents dans les solvants, peuvent pénétrer à des profondeurs beaucoup plus importantes, en fonction du type de sol.

Pour les échantillons de surface, l'EPA préconise une surface minimale d'échantillonnage d'environ 30 x 30 cm² ; plus en profondeur, la conservation d'un tel diamètre d'échantillonnage est rendu plus difficile et peut interférer à la représentativité de l'échantillon.

La quantité prélevée pour l'analyse est la même pour un échantillon individuel ou un échantillon composite (500 g environ de sol fin selon l'ISO ; ISO, Part 1, 1993), la seule différence résidant dans l'homogénéisation suffisante des échantillons composites, avant prélèvement.

Pour les sols destinés à servir de référence ou être conservés, l'ISO préconise une quantité plus importante (2 000 g). D'autre part, certains traitements nécessitent des quantités et des préparations plus spécifiques (essais granulométriques, ...).

7.3.2. Préparation

La préparation de l'échantillon comprend l'ensemble des manipulations de l'échantillon, depuis son extraction du sous-sol jusqu'à son analyse par le laboratoire.

Citons notamment les manipulations suivantes :

- élimination des corps étrangers,
- tamisage de l'échantillon,
- homogénéisation de l'échantillon,
- division de l'échantillon,
- composition d'échantillon composite.

La procédure de préparation employée dépend des objectifs d'échantillonnage et d'analyse ; c'est son adéquation qui garantit l'intégrité de l'échantillon. Par exemple, le criblage et l'homogénéisation des échantillons entraînent une perte en composés volatils et sont inappropriées dans le cas de contamination par ce type de composés

7.3.2.1. Élimination des corps étrangers

Les éléments étrangers à la matrice du sol, qui ne sont pas significatifs de l'état du site, et pourraient même interférer à l'analyse chimique des échantillons (brindilles, débris de verre, gros galets propres, briques, ...) sont ôtés de la prise, à moins que leur présence soit massive (> 10 %) et réellement significative d'une éventuelle contamination (alors signalée au laboratoire d'analyse).

Les éléments éliminés lors du prélèvement (du type gravillons, débris, ...) doivent être estimés (en poids) et mentionnés dans le rapport.

7.3.2.2. Tamisage des échantillons

Le tamisage consiste à diviser l'échantillon en classes granulométriques homogènes, soit parce que l'analyse le nécessite, soit pour étudier la distribution du contaminant en fonction de la taille des particules, ce qui est souvent très important pour définir les techniques de dépollution à mettre en oeuvre sur un site pollué.

Avant tamisage, l'échantillon doit être séché : on parle alors de "tamisage à sec" ; le tamisage sous eau existe également, mais il est plus complexe à mettre en oeuvre et à maîtriser. Dans tous les cas de contamination par les volatils, le tamisage est interdit. Par ailleurs, l'opération de tamisage elle-même, ou la sélection d'une seule frange granulométrique, entraîne des pertes chimiques et physiques qu'il est important de prendre en compte.

7.3.2.3. Homogénéisation des échantillons

L'homogénéisation de l'échantillon a pour but d'obtenir un prélèvement représentatif de la totalité de la prise. Cette opération est notamment nécessaire pour la constitution d'échantillon composite, ou si l'échantillon doit être divisé en plusieurs parties identiques.

L'homogénéisation est réalisée manuellement, à l'aide d'une cuillère inoxydable (dans un creuset ou sur un plateau), ou mécaniquement.

La figure 29 illustre la procédure d'homogénéisation, chaque étape devant être répétée 5 fois selon l'EPA.

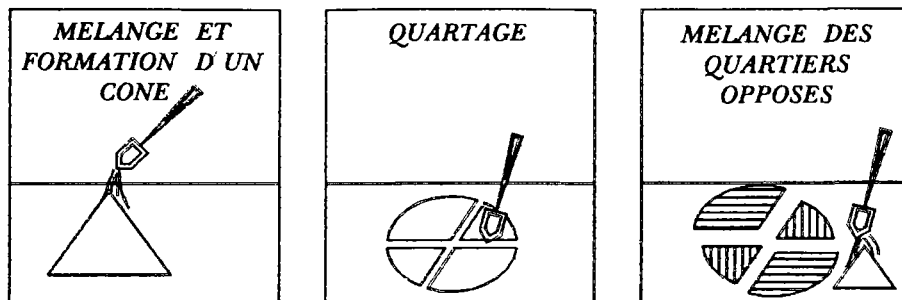


Figure 29 - Procédure d'homogénéisation (à répéter au minimum 5 fois)

7.3.2.4. Division d'échantillons

Lorsque plusieurs portions de l'échantillon doivent être analysées séparément, celui-ci doit être divisé en autant d'échantillons équivalents, permettant notamment de réaliser des contrôles analytiques, de mesurer la variabilité intrinsèque de l'échantillon, et celle liée à la mise en solution et à l'analyse. Avant d'être partagé, l'échantillon doit être soigneusement homogénéisé (Fig. 29).

7.3.2.5. Composition d'échantillons

La composition d'échantillons, aboutissant à des échantillons dits "composites", est le procédé physique par lequel plusieurs prises individuelles de sol sont combinées et homogénéisées. Les prises individuelles doivent être toutes identiques en volume et en poids et être homogénéisées.

La méthode de sélection des prises et le nombre de prises mélangées doivent être spécifiés et pris en compte dans l'interprétation. Elles doivent être prélevées selon le même protocole, pour un volume identique, et être homogénéisées.

Cette technique ne doit pas être utilisée dans le cas de contaminants volatils.

Les échantillons composites constituent ainsi une moyenne des différents points échantillonnés, ce qui réduit le nombre d'analyses à réaliser et diminue la variabilité intrinsèque de chaque échantillon. Chacun des échantillons ponctuels qui compose le mélange doit également être conditionné à part de manière à être analysé séparément si une contamination est détectée sur l'échantillon composite. En outre, du fait de la dilution des hautes concentrations, engendrée par la composition d'échantillons, les limites de détection doivent être réduites en conséquence, et les valeurs de référence (seuil de contamination par exemple) doivent être divisées par le nombre de prises pour être comparées au résultat composite (Keith, 1991).

7.3.3. Description de l'échantillonnage

7.3.3.1. Description de l'échantillon et du profil échantillonné

L'échantillon est décrit soit individuellement, soit comme partie d'un profil ; cette description doit être réalisée sur le terrain, au moment du prélèvement. Les éléments décrits sont notamment :

- le type de sol,
- le groupe de sol,
- le type de roche sous-jacente,
- l'épaisseur des différents niveaux et horizons traversés,
- la couleur,
- l'odeur,
- la teneur estimée en matière organique,
- la teneur estimée en carbonate,
- les teneurs estimées en oxydes de fer,
- l'humidité,
- la densité,
- la texture,
- etc.

7.3.3.2. Description du site

D'autre part, le maximum d'informations relatives aux conditions de réalisation de l'échantillonnage sont utiles à la validation et à l'interprétation des résultats, et doivent être soigneusement notées. Citons pour exemple les caractères suivants :

- le paysage et la végétation,
- les conditions climatiques,
- le relief, la pente, les traces d'érosion,
- le régime des eaux souterraines et superficielles,
- l'historique des activités environnantes,
- les sources potentielles de contamination.

7.4. CONDITIONNEMENT ET TRANSPORT

7.4.1. Conditionnement

Le choix du contenant est essentiel pour garantir l'intégrité de l'échantillon. Outre les sacs ou les flacons en plastique, on peut utiliser des flacons en verre comportant un goulot suffisam-

ment large, et fermés par un couvercle vissé ou à fermeture par pression. Les sacs en plastique sont interdits pour les terres contaminées susceptibles de contenir des polluants organiques.

Les contenants sont choisis en fonction de leur compatibilité avec le matériau échantillonné, leur résistance physique et chimique, et le volume à prélever. En effet, les contenants doivent non seulement assurer l'intégrité des échantillons (au niveau des contaminants à doser), mais aussi leur propre intégrité pendant toute la durée du transport et du stockage (risque de dégradation). Les critères à prendre en compte sont (ISO, Part 1, 1993) :

- le pouvoir de sorption du contenant par rapport au contaminant testé,
- la propreté du contenant (risque de contamination de l'échantillon si mauvais nettoyage),
- le risque de contamination de l'échantillon par le matériau du contenant,
- les risques de réaction entre le contenant et les polluants,
- la résistance thermique,
- la résistance mécanique,
- l'étanchéité à l'eau et au gaz,
- la facilité de ré-ouverture,
- les dimensions, la capacité et le poids,
- la disponibilité (approvisionnement),
- la possibilité de recyclage (à éviter toutefois).

Le tableau 11, issu de travaux ISO, présente les types de contenants les plus appropriés en fonction des polluants présents, et des polluants à doser.

D'une manière générale, pour les sols, l'utilisation de flacons en verre, à large goulot, et comprenant un joint hermétique, est préconisée (bocal de confiture *Le Parfait* par exemple).

Il est également possible de conserver les échantillons intacts dans l'équipement d'échantillonnage et de les expédier tels quels au laboratoire (tubes PVC scellés, en sortie du carotier).

Dans tous les cas, le choix des contenants doit être décidé en accord avec le laboratoire qui réalisera les analyses (interférences du polluant et du contenant, perte par adsorption/absorption et volatilisation, ...)

La fermeture des échantillons doit être étanche afin d'éviter toute volatilisation (solvants, humidité, ...), et l'espace à l'air libre minimisé (également dans le cas des sacs en plastique, même si le contenant est lui-même peu étanche). Tout risque de dommage porté aux échantillons doit être contourné (doubler les sacs en plastique, emballage, ...).

Les échantillons devant être analysés pour des éléments organiques doivent être conservés à des températures de l'ordre de 4°C et à l'obscurité.

SUITABILITY OF SAMPLE CONTAINERS

Tableau 11 - Type de conditionnement en fonction des contaminations présentes et des éléments à analyser (ISO, 1993)

Container Material	CONTAMINATION PRESENT					ANALYTICAL REQUIREMENTS					Advantage	Disadvantage
	Acid	Alkaline	Oils Tars	Solvents	Gas	Inorganic	Oils Tars	Solvents and Organic Compounds	Volatile Compounds			
Plastic bag	++	++	-	-	+	+ *	-	-	-	Low cost	Removing excess air/easily damaged	
Plastic bucket	++	++	-	-	-	++ **	-	-	-	Low cost	-	
Wide mouthed glass bottles*** (screw capped)	++	-	++	++	-	++	++	-	-	Inert	Fragile	
Aluminium cans (screw capped)	-	-	++	++	-	++	++	+	+	-	Cost/aluminium contamination Affected by acids/alkali	
Tins with push fit lids	-	-	++	++	-	++	++	+	+	-	Rusting Affected by acids	

++ Very suitable + May be suitable - Unsuitable

It is recommended that the analysing laboratory should be consulted to ensure that the appropriate sample container is used.

* Should not be used for contaminated land investigations.

** Should not be used for contaminated land investigation where it is possible that analysis for organic contamination may be required.

*** For optimum performance when volatile organic compounds are present, may require use of undisturbed sample with solvent such as methanol.

7.4.2. Étiquetage

Chaque échantillon doit être référencé dès son conditionnement et de manière à éviter tout risque d'ambiguïté. La référence est inscrite soit directement sur le contenant, soit à l'intérieur (contaminant non organique), soit sur une étiquette collée sur le contenant. Si le couvercle est indépendant du récipient, la référence doit être indiquée sur les deux parties.

Dans tous les cas, les moyens utilisés doivent résister aux conditions auxquelles est soumis l'échantillon (température, rayonnement solaire, composés chimiques, ...) et ne pas endommager la qualité de l'échantillon (éviter les feutres et certaines colles d'étiquette pour la recherche d'éléments volatils en traces).

Une procédure de contrôle doit être réalisée au niveau de l'étiquetage des échantillons et de leur dispatching.

7.4.3. Transport et stockage

Le transport et le stockage des échantillons nécessitent également d'être rigoureux et compatibles avec les analyses à réaliser par la suite.

Les échantillons doivent être stockés fermés et transportés au froid et à l'abri de la lumière (utilisation de glacières). Dans certains cas (examens microbiologiques notamment), les exigences de température sont accrues (jusqu'à -25°C) et nécessitent des équipements encore plus spécifiques (camions frigorifiques, dioxyde de carbone solide, nitrogène liquide).

En outre, le transport d'échantillons intacts nécessite un minimum de vibrations et de chocs afin de ne pas endommager la structure originelle. Les échantillons remaniés, de matériau fin, peuvent avoir subi un ré-arrangement intergranulaire pendant le transport, qui peut nécessiter une homogénéisation avant traitement analytique.

Toutes les directives législatives en vigueur doivent être observées. Pour le transport et le stockage d'échantillons pollués, toutes options de conditionnement et de transport nécessitent d'être compatibles avec les analyses projetées et les objectifs visés.

Arrivés au laboratoire, les échantillons doivent encore être conservés au froid et à l'abri de la lumière. La durée de conservation est relativement courte dès qu'il s'agit de composés organiques ; elle dépend des produits et de la nature et composition du sol.

7.4.4. Traçabilité

Un minimum d'informations sont à relever pour chaque échantillon, de manière à pouvoir les consulter à tout moment. L'ISO préconise un rapport de l'ensemble des opérations effectuées relatives à l'échantillonnage. Ce rapport doit être laissé à la disposition du laboratoire et des équipes réalisant l'interprétation.

A ce titre, la préparation de formulaires standards facilite la saisie des données et évite les oublis.

Les données minimales à indiquer sont :

- la référence de la donnée (identificateur, date, heure, conditions climatiques, opérateur, ...),
- la localisation du site d'échantillonnage et de l'échantillon (information réduite du type coordonnées, abréviation, ...),
- la procédure d'échantillonnage (méthode de prélèvement, préparation, observations diverses, ...),
- les conditions et délais de transport et de stockage.

Afin de permettre la traçabilité des données, il est important que la référence attribuée à chaque échantillon soit conservée tout le long de la chaîne de traitement. Le type d'identificateur attribué ne doit présenter aucune ambiguïté et garantir l'unicité pour chaque échantillon. Plusieurs principes de numérotation des échantillons permettent de garantir leur unicité et éventuellement de faciliter leur localisation (intégration des coordonnées du point d'échantillonnage par exemple) ; dans tous les cas, l'utilisation d'identificateurs simples et courts est préférable pour limiter le risque d'erreur de retranscription.

7.4.5. Élimination des échantillons

Après l'acquisition des résultats d'analyses et l'acceptation du rapport, les échantillons doivent être éliminés. Ces sols pollués s'apparentent dans bien des cas à des déchets, dont l'élimination doit suivre la législation en vigueur.

CONCLUSION

La revue de l'état de l'Art, en matière d'échantillonnage de sols pollués, a constitué le fond de ce rapport. Elle a porté à la fois sur les pratiques mises en oeuvre ou préconisées aux USA (travaux EPA) et sur celles utilisées ou préconisées en Europe, en s'appuyant surtout sur les travaux de normalisation en cours à l'ISO, mis en place essentiellement par l'Allemagne, la Grande-Bretagne, les Pays-Bas et la France, en accord avec de nombreux autres pays, hors USA qui n'y participent pas.

Malgré quelques différences, toutes ces pratiques suivent le même type de processus et s'accordent à constater la complexité d'échantillonner un milieu hétérogène. De ce fait, pratiquement toutes préconisent des "guides de bonnes pratiques" et insistent sur ce qu'il ne faut pas faire. La notion de "mode opératoire" ne s'applique, quant à celle, que cas par cas en fonction des caractéristiques du site à étudier, de la nature des polluants présents et des problèmes posés.

En effet, l'échantillonnage de sol pour caractériser une pollution ne consiste pas en une simple prise d'échantillons, prélevés sans réflexion préalable et transportés dans n'importe quelles conditions aux laboratoires.

La mise au point d'un protocole d'échantillonnage doit être conçue pour atteindre un objectif préalablement défini, et doit répondre à deux questions : que cherche-t-on ? et pourquoi ?

Dès lors, il est important de définir, cas par cas, les différents paramètres à prendre en compte, mais dans tous les cas ces paramètres doivent permettre de choisir au mieux :

- la stratégie d'échantillonnage : localisation géographique, densité, nombre de prélèvements et endroits précis où prélever, ...
- les techniques de "foration" du sol et d'échantillonnage, qui se doivent de préserver la nature initiale du prélèvement et de n'interférer en rien avec les résultats obtenus par l'analyse,
- les conditions de conditionnement, stockage, transport puis élimination des échantillons après usage.

Tous ces points ont été passés en revue dans le présent document, qui constitue ainsi un "guide méthodologique pour la pratique de l'échantillonnage".

Enfin, il est important de souligner la nécessaire expérience professionnelle, acquise dans des contextes différents et pour des produits différents, que doivent posséder les équipes ayant à charge l'échantillonnage.

BIBLIOGRAPHIE

ASTM STANDARDS, 1992 - Standard Guide for Sampling from the Vadose Zone - *ASTM Standards on Groundwater and Vadose Zone investigations - D 4700 - 91*, pp. 95-111.

BROWN D.J.F., BOAG B., JONES A.T. and TOPHAM P.B., 1990 - An Assessment of the Soil-Sampling Density and Spatial Distribution Required to Detect Viruliferous Nematodes (Nematoda : Longidoridae and Trichodoridae) in Fields - *Scottish Crop Research Institute - Invergowrie, Dundee DD2 5DA, Scotland, U.K.*, pp. 153-160.

BRUNER R.J., 1986 - A Review of Quality Control Considerations in Soil Sampling - *Quality Control In Remedial Site Investigations, T5*, Edited by C. Perket, pp. 35-41.

BSI (British Standards Institution), 1988 - Code of Practice for the Identification of Potentially Contaminated Land and its Investigation - *Draft for Development, DD 175: 1988*, pp. 1-25.

BUSCHE D.F. and BURDEN D.S., 1991 - Sampling of Contaminated Sites - *Hazardous Materials Control, May/June 1991*, pp. 35-40.

COMMUNAUTE ECONOMIQUE EUROPEENNE, 1986 - Directive du Conseil du 12 Juin 1986, relative à la protection de l'Environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture - *86/278/CCE, Annexe XI*, pp. 1-6.

DEMANZE C., 1992 - Etat de la Normalisation Concernant l'Analyse des Sols Contaminés - *La Décontamination des Sols Pollués - Séminaire du 17 et 18 Juin 1992 organisé par le Forum du Droit des Affaires ; Intervention de Christian DEMANZE, Chef de la Division Environnement, Laboratoires WOLFF*, pp. 1-21.

ENTZ T. and CHANG C., 1991 - Evaluation of Soil Sampling Schemes for Geostatistical Analyses : A case Study for Soil Bulk Density - *Can. J. Soil Sci. 71, May 1991*, pp. 165-176.

GARRETT P., 1988 - How to Sample Ground Water and Soils - *The National Water Well Association Publisher, GB1001.72.S3G37*, pp 34-35.

HADLEY P. W., REYNOLDS S.D. and SEDMAN R. M., 1991 - A Technical Basis for Evaluating Soil as a Medium of Exposure - *Hazardous Waste & Hazardous Materials, Vol. 8, n° 2*, pp. 143-149.

THE HAZARDOUS WASTE CONSULTANT, 1992 - Soil Sampling and Analysis . Practices and Pitfalls - *Vol. 10, Issue 6, Nov.-Dec. 92*, pp. 4.1-4.26.

HESS K. M., HERKELRATH W. N. and ESSAID H. I., 1991 - Determination of subsurface fluid contents at a crude-oil spill site - *Journal of Contaminant Hydrology, 10(1992)*, pp. 75-96.

ISO STANDARD, 1993 - Soil Quality - Sampling - Part 1 : Guidance on the Design of Sampling Programmes - *ISO Standard 10381-3.1, Projet du 20/04/93*, pp. 1-45.

ISO STANDARD, 1993 - Soil Quality - Sampling - Part 2 : Guidance on Sampling Techniques - *ISO Standard 10381-3.1, Projet du 06/04/93*, pp. 1-46.

ISO STANDARD, 1993 - Soil Quality - Sampling - Part 3 : Guidance on Safety - *ISO Standard 10381-3.1, Projet du 240/06/93*, pp. 1-46.

ISO STANDARD, 1993 - Soil Quality - Sampling - Part 4 : Guidance on the Procedure for the Investigation of Natural and Cultivated Sites - *ISO Standard 10381-3.1, Projet du 21/06/93*, pp. 1-22.

ISO STANDARD, 1993 - Soil Quality - Sampling - Part 5 : Guidance on the Procedure for the Investigation of Urban and Industrial Sites on Soil Contamination - *ISO Standard 10381-3.1, Projet du 28/06/93*, pp. 1-35.

KEITH L. H., 1991 - Environmental Sampling and Analysis : A Practical Guide - Ed. Lewis Publishers, Chelsea, *ISBN 0-87371-381-8*, pp 1-119.

KEITH L. H., 1990 - Environmental Sampling : A Summary - *Environmental Sciences Techno., Vol. 24, n° 5*, pp. 610-617.

MEGNEGNEAU R., 1993 - Introduction aux procédures d'investigation et aux méthodes d'échantillonnage des sites industriels pollués (sol, eau souterraine) - *Rapport de stage au MPCA non publié, Oct. 93*, pp 1-48.

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DE BADE-WURTEMBERG, 1988 - Altlasten-Handbuch, Wasserwirtschaftsverwaltung, *Heft*, p. 123.

NEDERLANDS NORMALISATIE-INSTITUUT, 1991 - Soil Investigation Strategy for Exploratory Survey - *Nederlandse Voornorm NVN 5740, ISBN 90-5254-062-4*.

PERRODIN Y., GOURDON R. et BLANCHARD J. M., 1993 - Diagnostic et Expertise des Sites Contaminés : Quelles analyses pour Quelles Conclusions ? - *Environnement et Technique / Info-Déchets n° 129, Sept. 93*, pp. 49-57.

PERSSON L. and BERGSTRÖM L., 1991 - Drilling Method for Collection of Undisturbed Soil Monoliths - *Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 55*, pp. 285-287.

PETERSEN R. G. and CALVIN L. D., 1965 - Sampling - Chapter 5, pp 54-72. *In Methods of Soils Analysis, Part 1 (Agronomy, a series of monographs, n° 9) - American Society of Agronomy, Inc. Publisher, The National Water Well Association*, p. 770.

SCOVAZZO P. and STRUBBLE R., 1990 - The Environmental Redevelopment of a Railyard and Facility - *Journal of Hazardous Materials, 25*, pp. 277-287.

SOCIETE FRANCAISE DE PHYTIATRIE ET DE PHYTOPHARMACIE, 1980 - Principes Généraux pour l'Elaboration d'un Protocole d'Echantillonnage d'un Sol (en vue de la détermination de sa teneur en résidus) - *Société Française de Phytatrie et de Phytopharmacie, Versailles* pp. 1-20.

EPA, 1992 - Guidance for Performing Site Inspections Under CERCLA - Interim Final, EPA/540-R-92-021, Directive 9345.1-05, Sept. 1992, pp. 15-92.

EPA, 1991 - Removal Program Representative Sampling Guidance - Volume 1 : Soil - EPA 9360.4-10, pp 1-46.

VEPRASKAS M.J., HOOVER M.T., BEESON J.L., CARPENTER M.S. and RICHARDS J.B., 1990 - Sampling Device to Extract Inclined, Undisturbed Soil Cores - *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 54, pp. 1192-1195.

A N N E X E 1

Adoption d'une stratégie d'échantillonnage en fonction de l'hypothèse formulée (ISO)

A titre d'exemple, ce document reprend de manière synthétique les différents points énoncés par l'ISO, qui sont à prendre en compte pour formuler une hypothèse testée par l'échantillonnage et pour adopter la stratégie d'échantillonnage la mieux adaptée au problème posé.

1. Objectifs de l'investigation

La stratégie d'investigation est choisie en fonction des objectifs poursuivis, et portera sur différents critères :

- cartographie (variabilité spatiale horizontale et verticale),
- hiérarchisation de sites (niveau de contamination, variabilité verticale),
- contrôle (niveau moyen, variabilité spatiale horizontale et verticale, évolution temporelle),
- optimisation* (niveau moyen, évolution temporelle),
- charge maximale* (niveau moyen, variabilité verticale, évolution temporelle),
- évaluation du risque (niveau moyen, variabilité horizontale et verticale, évolution temporelle),
- réhabilitation (niveau moyen, variabilité horizontale et verticale).

2. Méthodologie globale

La méthodologie de l'ISO s'articule en trois points :

- formulation d'une hypothèse de départ concernant la contamination du site, basée sur les investigations préliminaires (historique, connaissance du milieu, ...),
- évaluation de la potentialité de risque (voies de migration, extension 3D, hydrogéologie, ...),
- développement de mesures de réhabilitation.

3. Investigations préliminaires

Objectif : type et localisation(s) des contaminants.

Historique remontant le plus loin possible (contaminant persistant ; ex : métaux) :

- évolution du site et des environs dans le passé,
- activités développées ayant pu engendrer des sources de contamination (étude des procédés successifs, substances concernées, ...) et localisations précises des sources potentielles,
- bilan de matières (déchets, matières premières, produits et sous-produits, effluents, ...),
- détail des réseaux de conduites, câbles, fondations, réservoirs, dépôts passés et présents sur les sites,
- recherche d'informations relatives à des sites similaires,
- prise en compte de l'environnement proche.

* terrain agricole

Contexte naturel :

- structure locale du sol (jusqu'à une dizaine de mètres),
- profondeur de la nappe,
- sens d'écoulement de la nappe (au moins horizontalement),
- repérage des cours d'eau, plans d'eau (également ceux comblés),
- localisation des puits d'observation et des sources de la nappe,
- toutes informations préliminaires relatives à la qualité du sous-sol .

Méthodologie :

- visite préliminaire du site et des environs,
- utilisation de cartes adéquates, régionale (1/25 000) et locale (1/2 000 - 1/2 500), plans du site (conduites, ...),
- prise en compte des archives (autorisations, études préalables, incidents, litiges, innovations, ...),
- enquête auprès des voisins, employés, ...,
- photos aériennes plus ou moins récentes,
- prise en compte des archives liées à la qualité des eaux de la nappe (inspection, exploration, ...).

A l'issue de l'investigation préliminaire, une hypothèse de contamination doit être formulée, comprenant le type du/des polluants, le niveau de concentration et le type de distribution (degré d'hétérogénéité du polluant et du sol). La stratégie d'investigation est fondée sur cette hypothèse, qui sera alors testée (confirmée/infirmer) à l'issue de ces investigations.

Dans le cas d'un site urbanisé, la première préoccupation est de vérifier si le sol est contaminé, l'utilisation passée, actuelle et future du site, et des abords du site prenant une importance primordiale le cas échéant (notion d'évaluation du risque). Pour les sites industriels, le premier objectif repose davantage sur l'extension de la contamination et sur les solutions à envisager.

4. Formulation de l'hypothèse

Une première hypothèse est formulée, liée à la présence ou à l'absence de contamination :

- site probablement non contaminé,
- site probablement contaminé.

Si la présence d'une contamination est postulée, une deuxième hypothèse est formulée concernant la distribution de la contamination :

- distribution homogène,
- distribution hétérogène et point-source(s) connu(s),
- distribution hétérogène et point-source(s) inconnus.

Cette deuxième hypothèse, rarement généralisable sur tout un site ou pour l'ensemble des substances suspectées, peut être formulée en sous-hypothèses (par substance ou par zone) ; chaque hypothèse doit prendre en compte :

- nature de la source de contamination et biais de contamination (source ponctuelle, diffuse, ...),
- nature du/des polluant(s) (solubilité dans l'eau, interaction avec l'argile (métaux), interaction avec la matière organique du sol (composés organiques principalement),
- nature du sol et stratification (sable très perméable, argiles imperméables, sols tourbeux),
- durée depuis laquelle la pollution est dans le sol,

- profondeur de la nappe et son régime (battement, conditions climatologiques, ...).

Par exemple, une pollution ancienne dans un sol sableux très perméable donnera plutôt lieu à une distribution homogène (peu d'affinité du polluant avec le sable, mobilité importante), alors qu'une pollution récente dans des argiles se caractérisera davantage par une distribution hétérogène (grande affinité, extension limitée). Dans le cas d'une pollution diffuse ancienne, combinée à un sol très hétérogène, on étudiera la contamination comme autant de contaminations homogènes, pour chaque type de sol.

La stratégie doit être mise au point de manière à tester le plus sûrement possible chaque hypothèse.

5. Interprétation des résultats et évaluation de l'hypothèse

L'hypothèse est évaluée en regard des résultats d'analyse, et relativement à une grille de valeurs de référence, adoptée par les autorités compétentes (pas de normes européennes, avancement variable en fonction des pays).

Le test s'effectue en deux temps :

- présence/absence de contamination,
- distribution supposée,

c'est-à-dire que l'investigation ne va pas décrire la distribution de la contamination, mais infirmer ou confirmer une hypothèse de distribution, sur laquelle a été bâtie l'investigation : dans le cas où l'hypothèse est infirmée, une nouvelle hypothèse devra à son tour être formulée et testée, avant de conclure sur la distribution de la contamination. De la même manière, si des données recueillies lors des investigations remettent en cause des hypothèses de départ (ex : profondeur de la nappe, ...), il est nécessaire de réajuster la stratégie d'investigation (ex : prélèvement en nappe) avant toute conclusion. La figure 28 du rapport donne un organigramme du type de démarche à suivre.

Dans tous les cas, l'ensemble des données prises en compte dans l'élaboration de l'hypothèse (investigations préliminaires), et l'hypothèse elle-même (présence/absence de contamination, type de pollution, distribution, ...), doivent être commentées dans le rapport.

6. Stratégie d'investigation

Les aspects à prendre en compte dans l'élaboration d'une stratégie d'investigation sont les suivants :

- la profondeur des ouvrages et les niveaux à échantillonner,
- le modèle d'échantillonnage,
- le nombre d'échantillons d'eau et de sol à prélever,
- le nombre d'échantillons à analyser et leur sélection (comportant l'utilisation d'échantillons mélangés si besoin),
- les substances à analyser.

La stratégie d'investigation est définie de façon distincte pour chacune des sous-parties du site, si celui-ci a été divisé lors de la formulation des hypothèses de contamination ; les indications apportées ici concernant les différents aspects à prendre en compte pourront être combinées pour les hypothèses mixtes, en fonction de chaque cas particulier.

7. Site supposé non contaminé

- Echantillonnage systématique des sols.
- Echantillonnage des eaux amont et aval au site.
- Liste de substances fixée (spectre le plus large possible), + teneur en matière organique.
- Investigation distincte de 4 couches (4 x 0.5 m environ et zone saturée) (les échantillons de surface sont collectés en plusieurs points proches).
- Nombre d'échantillons de sol proportionnel à la surface.
- Nombre d'échantillons de sol supérieur à celui des eaux (plus représentatif).
- Optimisation du nombre d'échantillons de sol par le biais de mélange (grand nombre d'échantillons mélangés préférable à peu d'échantillons, avec un maximum de 10 échantillons par mélange) ; limiter les mélanges par niveau de profondeur permet d'observer la spatialisation verticale, et par zone localisée permet d'observer, à plus grande échelle, la spatialisation horizontale.
- Hypothèse confirmée si aucune substance n'est détectée ; le cas échéant, les échantillons composant le mélange "anormal" doivent être analysés, les analyses affinées (si c'est un groupe de composés qui a été détecté), et une nouvelle hypothèse doit être reformulée.

8. Site supposé contaminé

- Ouvrages et échantillonnage limités aux niveaux de profondeur suspectés.
- Priorité aux investigations dans la nappe si la pollution l'a atteinte.
- Distribution supposée homogène :
 - . échantillonnage systématique,
 - . nombre d'échantillons proportionnel à la surface (précision fonction du nombre d'échantillon),
 - . 5 échantillons prélevés au minimum,
 - . possibilité de mélanger les échantillons pour l'analyse (sauf volatils).
- Distribution supposée hétérogène et point-sources connus :
 - . échantillonnage aux points suspectés,
 - . nombre d'ouvrages fonction de l'étendue et du nombre de point-sources,
 - . 1 ouvrage par point-source au minimum,
 - . 4 échantillons prélevés par point-source au minimum,
 - . pas de mélange d'échantillons pour l'analyse,

- . hypothèse retenue si la majorité des teneurs est très supérieure au seuil fixé.
- Distribution supposée hétérogène, point-sources inconnus d'étendue supposée > 10 % :
 - . échantillonnage systématique,
 - . nombre d'échantillons basé sur l'estimation de l'étendue des point-sources,
 - . 4 échantillons de sol prélevés au minimum ,
 - . 4 échantillons d'eau de la nappe prélevés au minimum si la pollution l'a atteinte,
 - . hypothèse retenue si seuls quelques points sont contaminés (sinon, étendue des point-sources et type de distribution à revoir).
- Distribution supposée hétérogène, point-sources inconnus d'étendue supposée < 10 % :
 - . échantillonnage systématique,
 - . nombre d'échantillons important,
 - . mélange d'échantillons si sources à hautes concentrations (pourcentage de chance de détecter les point-sources à évaluer),
 - . 4 échantillons de l'eau de la nappe au minimum si la pollution l'a atteinte,
 - . si pollution peu mobile et sources très ponctuelles : technique de criblage.
- Echantillonnage des eaux amont et aval.
- Analyses pour les substances suspectées.
- Détermination de la teneur en matière organique du sol (échantillon mélangé).
- Mesure du pH et de la conductivité pour les échantillons pris en nappe.

Le mélange des échantillons est préférable en laboratoire, permettant, outre une meilleure manipulation, de conserver les échantillons individuels pour des ré-analyses éventuelles.

Au vu d'un tel document, élaboré par des experts praticiens reconnus au niveau international, on comprend très vite :

- la complexité que représente l'échantillonnage d'un milieu hétérogène (le sol) auquel sont associés des "polluants" eux-mêmes distribués dans ce milieu de manière hétérogène,
- la nécessaire expérience professionnelle, acquise dans des contextes différents et pour des produits différents, des équipes qui ont à charge l'échantillonnage.