

> Confinement d'anciennes décharges à assainir

État de la technique, possibilités et limites



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

> Confinement d'anciennes décharges à assainir

État de la technique, possibilités et limites

L'ordonnance du 4 décembre 2015 sur la limitation et l'élimination des déchets (ordonnance sur les déchets, OLED) est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2016; elle remplace l'ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets (OTD). La présente aide à l'exécution a été adaptée en conséquence. Le reste du contenu s'appuie sur la première édition parue en 2007.

Valeur juridique de cette publication

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEV en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et favorise ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur. Les aides à l'exécution de l'OFEV (appelées aussi directives, instructions, recommandations, manuels, aides pratiques) paraissent dans la collection «L'environnement pratique».

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Prof. et ing. dipl. Harald Burmeier; ing. dipl. Christian Poggendorf;
ing. dipl. Diana Rosenau; ing. dipl. Martin F. Lemann; ing. dipl. Benno Kästli

Conseillers

Bernhard Hammer (géologue), Christoph Wenger (minéralogiste),
Christoph Reusser (biologiste);
toutes les sections de la division Sites contaminés et déchets
industriels, OFEV;
membres de la commission spécialisée OTAS

Référence

Burmeier H., Poggendorf C., Rosenau D., Lemann M.F., Kästli B. 2007:
Confinement d'anciennes décharges à assainir. État de la technique,
possibilités et limites. 2^e édition actualisée, octobre 2016; 1^{re} édition
2007. L'environnement pratique n° 0720. Office fédéral de
l'environnement, Berne. 69 p.

Graphisme et mise en page

Karin Nöthiger, Niederrohrdorf

Photographie de couverture

Algroup (à présent ALCAN)

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/0720-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2007

> Table des matières

Abstracts	5		
1 Introduction	7		
1.1 Buts de l'aide à l'exécution	7		
1.2 Structure du document	8		
2 Données de base	10		
2.1 Bases légales	10		
2.2 Assainissement dans le cadre du traitement de sites contaminés	11		
2.3 Principes de l'assainissement	12		
2.4 Autres documents de base régissant l'assainissement des anciennes décharges	13		
3 Dangers liés aux anciennes décharges nécessitant un assainissement	14		
3.1 Généralités	14		
3.2 Voie de contamination par les eaux souterraines	15		
3.3 Voie de contamination par les eaux de surface	17		
3.4 Voie de contamination par l'air	17		
3.5 Voie de contamination par contact direct	19		
4 Buts du confinement des anciennes décharges devant être assainies	20		
5 Confinement de surface	22		
5.1 Généralités	22		
5.2 Choix des dispositifs de confinement	23		
5.2.1 Dispositifs visant à empêcher ou minimiser la pénétration d'eaux météoriques	23		
5.2.2 Couverture simple	25		
5.3 Structure de base des dispositifs de confinement de surface	25		
5.3.1 Étanchéité de surface	25		
5.3.2 Couverture simple qualifiée	28		
5.3.3 Couverture simple	29		
5.4 Composants du dispositif de confinement de surface	30		
5.4.1 Généralités	30		
5.4.2 Évaluation des matériaux d'étanchéité	32		
5.4.3 Utilisation de matériaux alternatifs	33		
5.5 Conception du système de confinement de surface	33		
5.6 Calculs et vérifications	35		
5.6.1 Contrôles en matière de mécanique des sols	35		
5.6.2 Calculs statiques	36		
5.6.3 Calculs hydrauliques et pneumatiques	36		
5.7 Plan d'assurance-qualité	37		
5.8 Utilisation ultérieure de la surface de la décharge	38		
6 Confinement vertical	40		
6.1 Généralités	40		
6.2 Choix du système de confinement vertical	41		
6.3 Parois étanches	41		
6.3.1 Exigences générales relatives aux sites confinés avec des parois étanches	41		
6.3.2 Exigences générales relatives aux parois étanches	43		
6.3.3 Structure générale des étanchéités verticales	43		
6.3.4 Types de parois étanches	44		
6.3.5 Particularités de mise en œuvre	47		
6.4 Procédés hydrauliques actifs	48		
6.4.1 Utilisation	48		
6.4.2 Équipements dans les systèmes actifs de confinement hydraulique	50		
6.4.3 Dimensionnement	50		
6.5 Procédés hydrauliques passifs (barrières réactives perméables)	51		
7 Étanchéité de fond	53		
7.1 Généralités	53		
7.2 Types d'étanchéité de fond	55		
8 Captage et traitement des gaz	56		
8.1 Explications de base sur la formation des gaz	56		
8.2 Quantité et composition des gaz produits	58		
8.3 Dangers liés aux gaz de décharge	59		
8.4 Captage et élimination des gaz	60		
8.5 Stabilisation aérobie	62		

9	Captage et traitement des lixiviats	63
10	Évacuation des eaux	65
11	Contrôle des résultats et suivi	66
11.1	Contrôle des résultats	66
11.2	Suivi	66
11.2.1	Généralités	66
11.2.2	Exploitation des ouvrages à long terme	67
11.2.3	Préservation des ouvrages à long terme	67
11.2.4	Contrôle de l'état de fonctionnement des ouvrages	67
11.2.5	Surveillance des voies de contamination	68
Annexes		69

> Abstracts

These executive guidelines provide an overview of the state of the art in matters of confinement of old landfills. They constitute a decision aid regarding the possible remediation measures and their cost benefit effectiveness, and are intended for cantonal and federal authorities, as well as for those obliged to carry out a remediation process and for planning engineers.

The guidelines mainly deal with municipal dumps and urban waste landfills and are divided into three sections:

- > a text part in which the threats to the environment posed by old landfills are described, the fundamentals of confinement explained and the basic requirements in that matter outlined;
- > Appendix A describing the technical systems;
- > Appendix B containing a glossary, abbreviations and literature sources.

Keywords:

Landfill
Contaminated site
Confinement
Remediation

Die Vollzugshilfe gibt einen Überblick über den Stand der Technik bei der Sicherung von Deponie-Altlasten. Sie bietet den Vollzugsbehörden auf Kantons- und Bundesebene, wie auch den Sanierungspflichtigen und planenden Ingenieuren eine Hilfestellung für die Entscheidung über mögliche Sanierungsmassnahmen sowie deren Wirtschaftlichkeit. Gegenstand sind dabei vor allem Gemeinde- und Siedlungsabfalldepotien.

Die Vollzugshilfe gliedert sich in drei Teile:

- > Textteil: Beschreibung der Umweltgefährdungen von Deponie-Altlasten Grundlagen und grundsätzliche Anforderungen der Sicherung,
- > Anhang A: Beschreibung der technischen Systeme,
- > Anhang B: Begriffsbestimmungen, Abkürzungen und Literatur.

Stichwörter:

Deponie
Altlast
Sicherung
Sanierung

La présente aide à l'exécution donne une vue d'ensemble de l'état de la technique en matière de confinement de d'anciennes décharges devant être assainies. Elle concerne principalement les anciennes décharges communales et de déchets urbains. Conçue comme aide à la décision concernant les mesures d'assainissement possibles et leur efficacité économique, elle s'adresse aux autorités d'exécution cantonales et fédérales, ainsi qu'à ceux qui sont tenus d'assainir un site et aux ingénieurs chargés de la planification. L'aide à l'exécution est divisée en trois parties:

- > le présent document décrit les dangers pour l'environnement dus aux anciennes décharges devant être assainies, explique les bases du confinement et indique les exigences fondamentales en la matière;
- > l'annexe A détaille les systèmes techniques;
- > l'annexe B comprend la définition des termes techniques, des abréviations et une bibliographie.

Mots-clés:

Décharge
Site contaminé
Confinement
Assainissement

Il presente aiuto all'esecuzione fornisce una panoramica sullo stato della tecnica nel settore della messa in sicurezza dei siti contaminati da discariche. La pubblicazione offre alle autorità esecutive cantonali e federali, ma anche a chi è tenuto a risanare una discarica e agli ingegneri addetti alla pianificazione, un strumento di supporto per stabilire le misure di risanamento possibili e per valutare la loro redditività. Il testo interessa soprattutto le discariche comunali e le discariche per rifiuti urbani.

L'aiuto all'esecuzione è strutturato in tre parti:

- > Testo: descrizione dei pericoli che i siti contaminati da discariche costituiscono per l'ambiente;
- > Allegato A: descrizione dei sistemi tecnici;
- > Allegato B: definizione dei termini, abbreviazioni e indicazioni bibliografiche.

Parole chiave:

Discarica

Sito contaminato

Circoscrizione

Risanamento

1 > Introduction

1.1 Buts de l'aide à l'exécution

Les décharges contrôlées d'aujourd'hui, conçues selon l'état actuel de la technique pour répondre aux normes législatives en vigueur, visent à préserver durablement l'environnement. Pour atteindre cet objectif, la stratégie de gestion dite des trois barrières est appliquée, à savoir:

- > la barrière naturelle constituée par le site lui-même (caractéristiques géologiques, hydrogéologiques),
- > la barrière représentée par les dispositifs techniques de confinement (étanchéités, réseaux de collecteurs, concept d'exploitation),
- > la barrière liée à l'inventaire des déchets (types de déchets et leurs propriétés, genre de traitement appliqué, dégradation des polluants).

L'idée maîtresse est de concilier au mieux ces trois champs de contraintes, en respectant les exigences légales minimales – le but étant de réduire autant que possible l'impact de la décharge sur l'environnement. Il s'agit donc de mettre en place un système global stable dans la durée. Associé à l'inventaire des déchets, ce système permet d'éviter les émissions de polluants grâce aux techniques les plus récentes, ou du moins de les capter et d'empêcher qu'ils ne se propagent dans l'environnement.

Au contraire des décharges contrôlées d'aujourd'hui, les anciennes décharges ont été construites et exploitées le plus souvent sans être optimisées sur la base des trois barrières susmentionnées. Leurs concepts de réalisation lacunaire ne tenaient pas suffisamment compte de la convergence nécessaire entre les déchets stockés, les caractéristiques du site et les systèmes de confinement. Les anciennes décharges peuvent ainsi émettre dans l'environnement des substances en plus ou moins grande quantité et/ou présenter un réel danger de contamination, dû surtout à la défaillance ou à l'absence des systèmes techniques. Elles doivent souvent alors être considérées comme des sites contaminés (c.-à-d. des sites nécessitant un assainissement).

Dans de nombreux cas, il n'est ni techniquement possible, ni financièrement supportable de décontaminer de telles sites (c.-à-d. retirer les polluants du sous-sol). La présente aide à l'exécution se concentre donc sur les stratégies ou les techniques permettant de les confiner.

Il existe, pour les décharges contrôlées actuelles, un ensemble de règlements techniques visant à prévenir l'émission de substances dangereuses pour l'environnement, règlements qui décrivent de manière spécifique, c.-à-d. pour chaque type de décharges, les exigences que doivent satisfaire le site et les systèmes techniques mis en place. En revanche, aucune stratégie de confinement «normalisée» n'a encore été élaborée pour

les anciennes décharges, qui émettent des quantités significatives de polluants et doivent donc être assainies en tant que sites contaminés. La nature des déchets stockés dans ces dernières et leur emplacement étant connus, la méthode pour réduire, voire empêcher les émissions de polluants consiste, outre la décontamination à proprement parler à choisir les dispositifs techniques de confinement. Au vu de l'absence de législation en la matière, il faut développer et optimiser des solutions ad hoc, qui tiennent compte des propriétés spécifiques du site et de l'inventaire des déchets stockés – ce qui représente une nécessité tout autant qu'une opportunité.

L'objectif du présent document est de fournir des aides pour choisir un dispositif technique de confinement adapté à chaque situation. À cet effet, il clarifie l'état actuel de la technique et présente les possibilités offertes par les différents systèmes ainsi que leurs limites. Il ne s'agit donc pas tant d'entrer jusque dans le moindre détail technique des dispositifs, mais plutôt de présenter de manière transparente les critères de choix et d'optimisation.

La présente aide à l'exécution s'intéresse avant tout aux décharges communales et aux décharges de déchets urbains qui, bien souvent ont, outre les ordures ménagères, aussi accueilli des gravats de démolition et des déchets de l'industrie et de l'artisanat, parfois même des déchets spéciaux.

Elle s'adresse en priorité aux autorités d'exécution cantonales et fédérales, dont la tâche sera d'évaluer si les systèmes techniques d'assainissement proposés sont appropriés et susceptibles d'être approuvés; elle vise également à assister dans l'exécution des travaux ceux qui sont tenus d'assainir un site ainsi que les ingénieurs chargés de la planification. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et la commission spécialisée OTAS y trouveront par ailleurs les bases importantes pour juger de la recevabilité des demandes de subventions au titre de l'ordonnance fédérale du 5 avril 2000 relative à la taxe pour l'assainissement des sites contaminés (OTAS).

1.2 Structure du document

La présente aide à l'exécution comporte trois parties:

- > Le présent document traite des différentes menaces que font peser sur l'environnement les anciennes décharges devant être assainies; il présente les bases utiles et décrit les exigences auxquelles doivent satisfaire les dispositifs de confinement, en vue d'écarter le danger que représente le site.
Il montre également comment définir les objectifs de confinement par rapport aux menaces identifiées et met en évidence quels éléments doivent être pris en compte au cours des travaux.
Enfin, le document présente, pour les principaux systèmes de confinement, chaque composant technique et donne des indications pour en faciliter le choix; il explique aussi l'effet de chaque élément sur le système global. L'objectif est d'explicitier clairement quels dispositifs et différents composants sont disponibles.

Document principal

-
- > Dans l'annexe A figurent des descriptions détaillées des différents systèmes techniques destinés à confiner les anciennes décharges devant être assainies, en particulier concernant leur intégration dans la stratégie de confinement global. Elle contient encore des données techniques, des recommandations quant à l'utilisation, des indications spécifiques sur les coûts et une évaluation complète. Cette annexe est conçue comme un complément aux descriptions et aux évaluations figurant dans le présent document.

 - > L'annexe B contient la définition des termes spécialisés utilisés dans l'aide à l'exécution, ainsi que les abréviations et acronymes employés. Une bibliographie y est jointe (en grande partie en allemand).

Annexe A**Annexe B**

2 > Données de base

2.1 Bases légales

La loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE; RS 814.0) constitue la base légale principale pour assainir les décharges et autres sites pollués par des déchets. Elle règle l'obligation d'assainir (art. 32c LPE), la prise en charge des frais (art. 32d LPE) et la taxe destinée au financement des mesures (art. 32e LPE).

Cette loi est concrétisée par l'ordonnance fédérale du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (OSites; RS 814.680) et par l'ordonnance fédérale du 5 avril 2000 relative à la taxe pour l'assainissement des sites contaminés (OTAS; RS 814.681). L'OSites contient des prescriptions concernant la présente aide à l'exécution dans les sections suivantes:

- > Section 3: Besoins de surveillance et d'assainissement
- > Section 4: Buts et urgence de l'assainissement
- > Section 5: Assainissement
- > Section 6: Obligation de prendre des mesures d'investigation, de surveillance et d'assainissement

L'ordonnance fédérale du 4 décembre 2015 sur la limitation et l'élimination des déchets (Ordonnance sur les déchets, OLED) contient, quant à elle, des dispositions concernant la réduction et le traitement des déchets ainsi que l'aménagement et l'exploitation d'installations de traitement des déchets, en particulier de décharges contrôlées. L'OLED peut également servir de base pour déterminer les principales exigences auxquelles doivent satisfaire les différents composants techniques des systèmes de confinement des anciennes décharges devant être assainies. En particulier, l'annexe 2 de l'OLED détermine les exigences relatives à l'aménagement et à la fermeture définitive de décharges contrôlées, qui comprend leur étanchéification, leur drainage et leur dégazage. Ces dispositions peuvent donc, par analogie, également s'appliquer aux anciennes décharges devant être assainies.

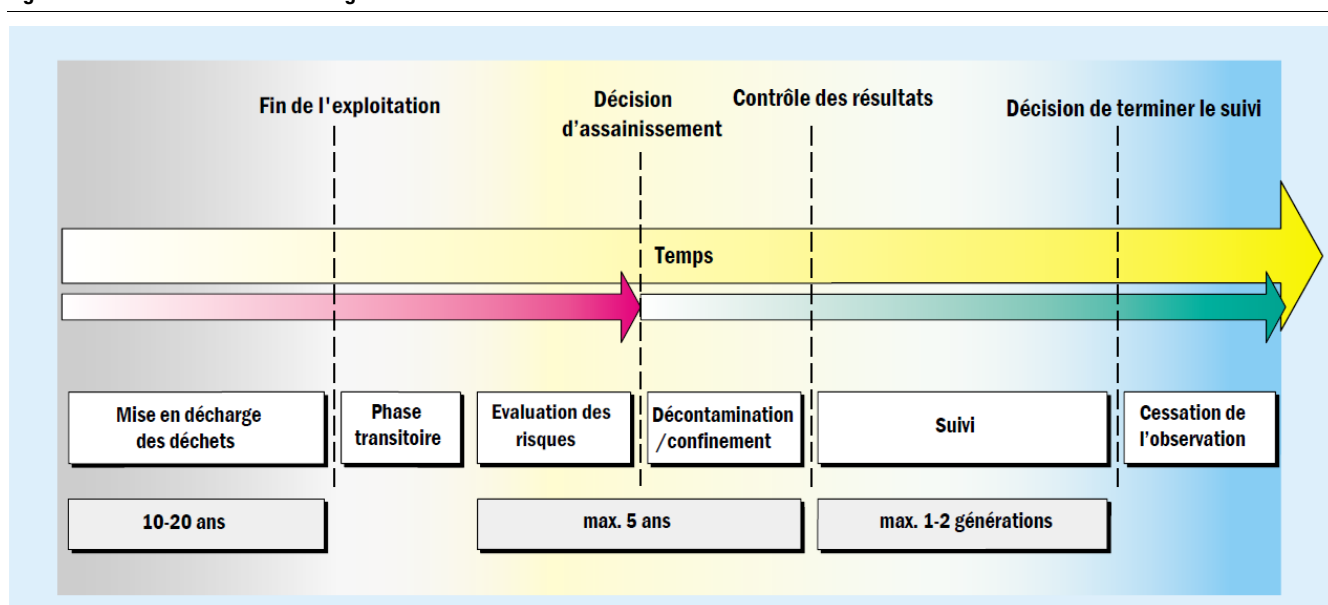
Il en va de même pour l'ensemble des règlements connexes existants (normes, ordonnances, etc.). Par exemple, la norme SIA 203 «Décharges contrôlées» s'applique à la planification, la construction et l'aménagement d'une décharge contrôlée répondant aux exigences fixées dans l'OLED; elle est aussi valable pour la remise en état de parties d'installations existantes. Elle peut donc être utilisée pour les différents éléments techniques des systèmes de confinement.

2.2

Assainissement dans le cadre du traitement de sites contaminés

Comme le montre la figure 1 ci-dessous, les phases de vie d'une ancienne décharge devant être assainie commencent à la fin de la période d'exploitation (c'est-à-dire dès la cessation de l'entreposage de déchets) et sont ponctuées par les étapes suivantes: évaluation des risques, décision d'assainir, exécution des travaux d'assainissement, contrôle des résultats et suivi de la décharge; l'observation de la décharge cesse au moment où l'on décide qu'elle ne nécessite plus de surveillance.

Fig. 1 > Phases de vie d'une décharge contaminée



L'assainissement de la décharge constitue la dernière étape du processus de traitement d'un site contaminé, ainsi que le prescrit en particulier l'OSites. La question du besoin d'assainissement doit être réglée sur la base de l'investigation préalable (estimation de la mise en danger). Pour cette raison, la présente aide à l'exécution se fonde également sur les conclusions de cette estimation de la mise en danger. Par ailleurs, vu le sujet considéré, elle ne s'applique qu'aux anciennes décharges sur lesquelles les investigations requises ont été menées et pour lesquelles des mesures doivent être prises afin de limiter le danger de contamination de l'environnement.

Les modalités d'assainissement d'un site comprennent la décontamination et/ou le confinement du terrain. La restriction d'utilisation ne correspond plus à une modalité d'assainissement. Comme pour tous les sites contaminés, les anciennes décharges ayant un besoin d'assainissement doivent être assainies avec la méthode la plus adaptée définie par une analyse détaillée des variantes d'assainissement.

2.3

Principes de l'assainissement

En vertu de l'art. 32c, al. 1, LPE, les décharges contrôlées et les autres sites pollués par des déchets doivent être assainis

- > «lorsqu'ils engendrent des atteintes nuisibles ou incommodes ou
- > qu'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent.»

L'OSites concrétise cette obligation d'assainissement et définit dans quelles conditions la nécessité d'assainir est avérée, suivant la nature des émissions et les conditions d'exposition (cf. tab. 1).

Tab. 1 > Appréciation des besoins d'assainissement

Besoins d'assainissement relatifs:	Un site nécessite un assainissement:
aux eaux souterraines:	• si la concentration de polluants en aval du site dépasse les valeurs limites prescrites (cf. art. 9, al. 2, let. a à c, OSites), ou • si le site nécessite une surveillance et qu'il présente un danger concret de pollution des eaux souterraines en raison d'une rétention ou d'une dégradation insuffisante des substances provenant du site (cf. art. 9, al. 2, let. d, OSites);
aux eaux de surface:	• si, dans l'eau qui s'écoule dans les eaux de surface, la concentration observée des substances provenant du site dépasse la valeur de concentration admissible (cf. art. 10, al. 2, let. a, OSites), ou • si le site nécessite une surveillance et qu'il présente un danger concret de pollution des eaux de surface en raison d'une rétention ou d'une dégradation insuffisante des substances provenant du site (cf. art. 10, al. 2, let. b, OSites);
à l'air:	• si l'air interstitiel du sous-sol dépasse la valeur de concentration en polluants admissible, et • si les émissions dégagées par le site atteignent des endroits dans lesquels des personnes peuvent se trouver régulièrement pendant un certain temps (cf. art. 11 OSites);
au sol:	• si le site pollué porte atteinte aux sols ou que son sol porte atteinte à l'homme, aux animaux et aux plantes (cf. art. 12 OSites); les sols pollués au sens de l'OSites seront évalués d'après la législation sur la protection des sols.

Le but de l'assainissement est défini à l'art. 15 OSites dans les termes généraux suivants:

Il s'agit d'éliminer les atteintes, ou les dangers concrets d'apparition de telles atteintes, qui ont été à l'origine des besoins d'assainissement.

Cela signifie concrètement que les atteintes ou les dangers effectifs doivent être éliminés de manière durable. Il ne faut pas reporter sur les générations futures la responsabilité de devoir assainir le site. En d'autres termes, il faut pouvoir, en l'espace d'une ou de deux générations, prendre les mesures nécessaires pour assainir le site et le transmettre aux générations futures sans qu'il soit nécessaire de prendre encore d'autres mesures.

Par ailleurs, l'ensemble des opérations d'assainissement doit permettre de réduire sensiblement les menaces pesant sur l'environnement. La meilleure façon de vérifier si tel est le cas est de procéder à un écobilan.

Les objectifs de l'assainissement peuvent être atteints de la manière suivante (cf. art. 16 OSites):

- > en éliminant les substances dangereuses pour l'environnement (**décontamination**),
- > en empêchant et en surveillant durablement la dissémination des substances dangereuses dans l'environnement (**confinement**),
- > en restreignant l'utilisation du sol lorsque celui-ci est pollué (**restriction**).

2.4

Autres documents de base régissant l'assainissement des anciennes décharges

L'OFEV a édité différentes aides à l'exécution ou documents de travail concernant le traitement des sites contaminés, en particulier l'exécution des mesures d'assainissement. Citons les principaux:

1. Sites contaminés: recenser, évaluer, assainir (OFEFP 2001)
2. Élaboration de projets d'assainissement de sites contaminés (L'environnement pratique; OFEFP 2001)
3. Concept de gestion des sites contaminés pour la Suisse – Objectifs et mesures (Cahier de l'environnement N° 220, OFEFP 1994)
4. Glossaire des sites contaminés (L'environnement pratique, OFEFP 1995)

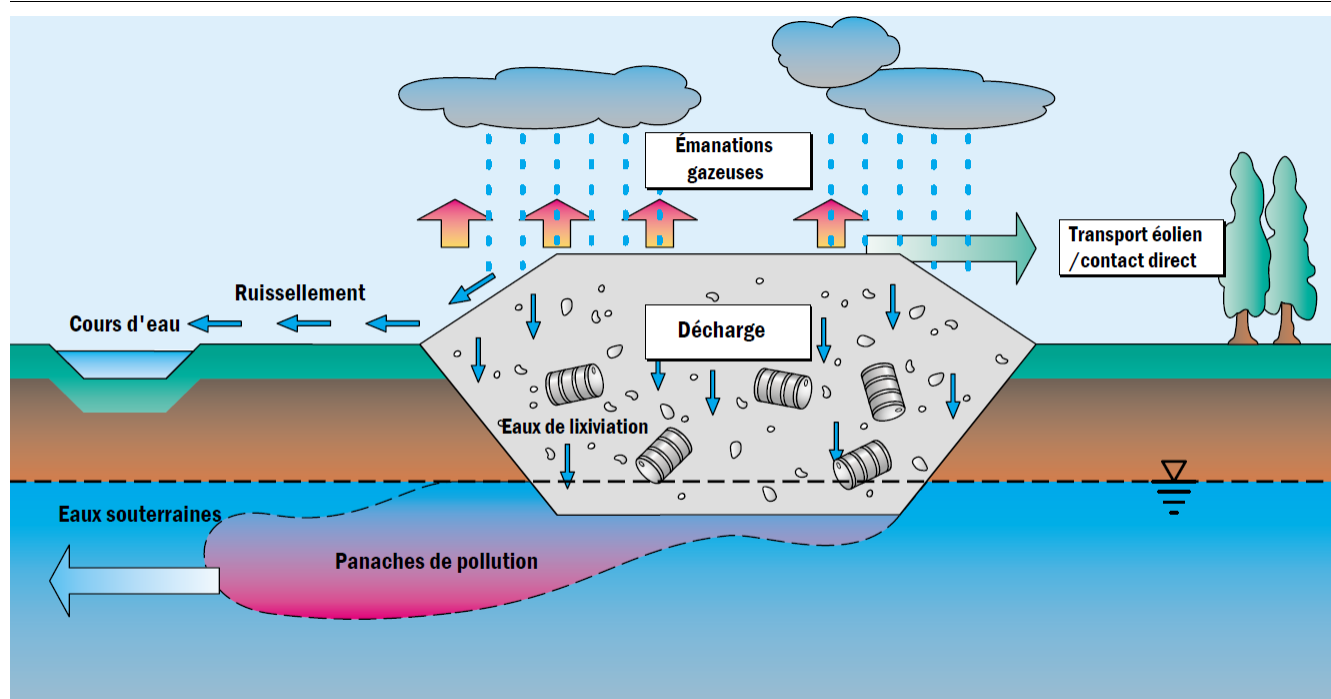
3 > Dangers liés aux anciennes décharges nécessitant un assainissement

3.1 Généralités

Comme les autres sites pollués, une décharge peut provoquer différentes émissions de polluants et mettre en danger les milieux à protéger, telles que les eaux souterraines, les eaux de surface, l'air ou le sol (cf. fig. 2). Les phénomènes pouvant entraîner la diffusion des polluants sont les suivants:

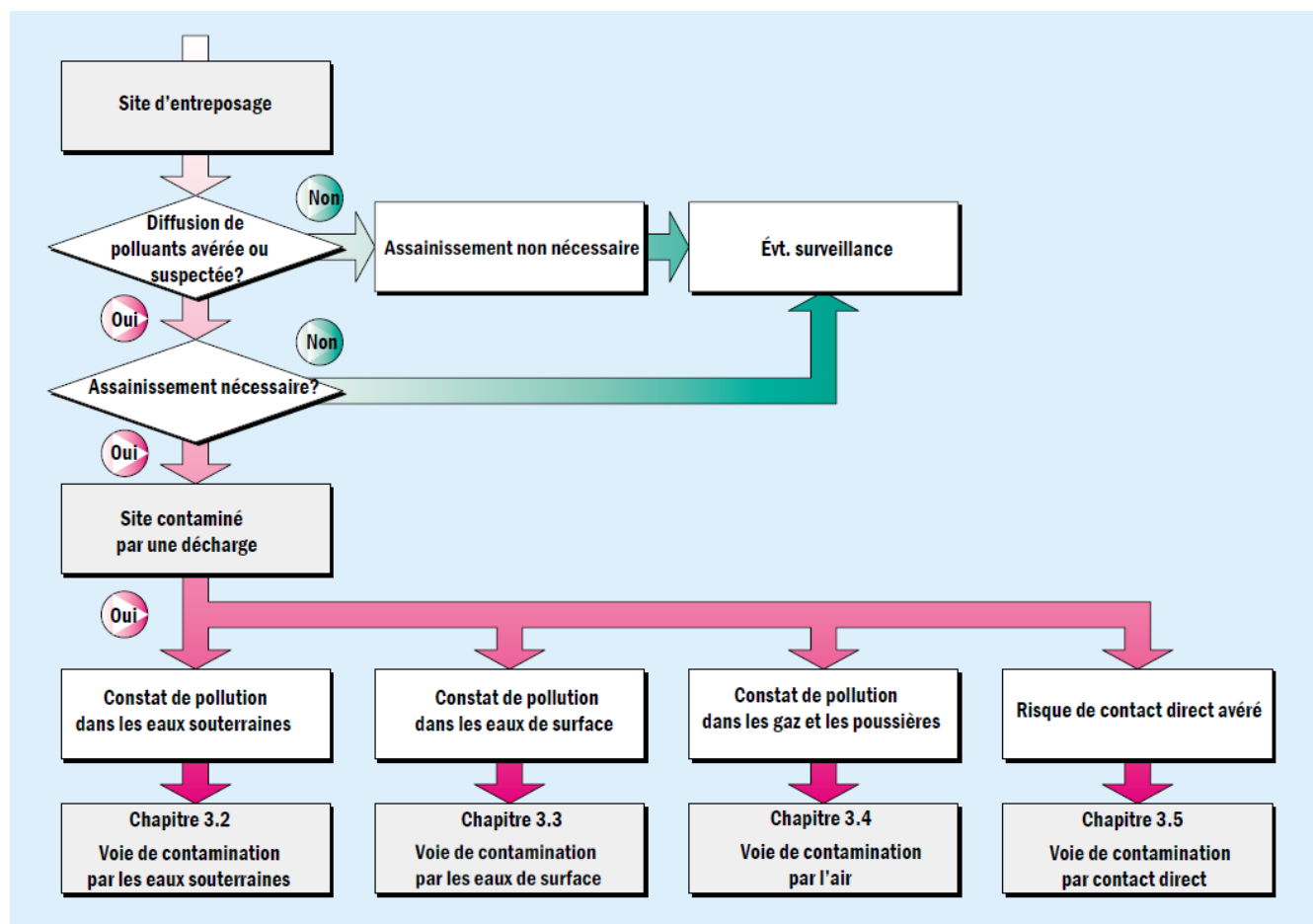
- > lixiviation (contamination des eaux d'infiltration/de percolation par les substances contenues dans les déchets),
- > ruissellement (contamination des eaux par la surface de la décharge),
- > formation de panaches de pollution dans les eaux souterraines,
- > émanations gazeuses (méthane, gaz toxiques),
- > érosion éolienne (transport de poussières entraînées par le vent) / contact direct,
- > contact direct d'êtres vivants avec des déchets entreposés en surface.

Fig. 2 > Émissions des décharges



Pour un site d'entreposage donné, on détermine s'il nécessite un assainissement en analysant les voies de contamination décrites à la figure 3.

Fig. 3 > Besoins d'assainissement pour les différentes voies de contamination



Dans les paragraphes suivants, les différentes voies que peuvent emprunter les polluants lorsqu'ils se diffusent dans l'environnement sont présentées, ainsi que les différentes solutions techniques pour minimiser, voire bloquer les émissions. Cette présentation vise à mettre en évidence comment les différentes solutions techniques partielles concourent à la sécurité de l'ensemble du système.

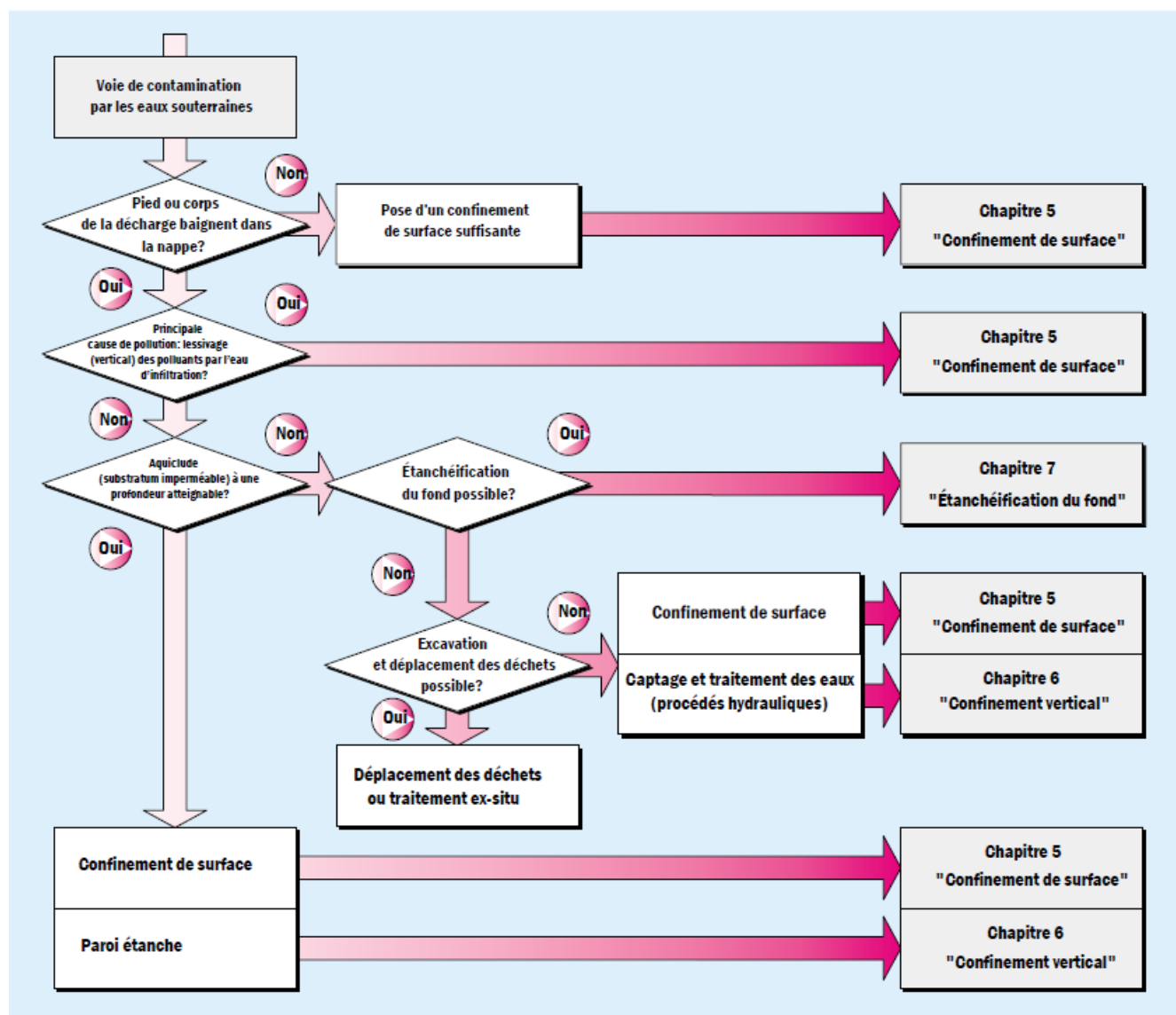
3.2 Voie de contamination par les eaux souterraines

Les anciennes décharges doivent être assainies, respectivement confinées, le plus souvent en raison d'une contamination des eaux souterraines. Pour choisir quelles mesures de confinement doivent être prises, on analyse avant tout la position du corps de la décharge par rapport à la nappe phréatique. Deux situations doivent être distin-

guées: soit la décharge est en contact direct avec l'eau souterraine (les déchets baignent partiellement ou totalement dans la nappe), soit la décharge est située entièrement au-dessus du niveau de la nappe. Dans le second cas, seules les eaux météoriques s'infiltrant depuis la surface peuvent traverser verticalement la décharge et rejoindre la nappe.

Les caractéristiques géologiques du site influencent grandement les mesures d'assainissement à prendre; elles peuvent même nécessiter de retirer les matériaux de la décharge et de les stocker ailleurs. La figure 4 ci-dessous illustre le raisonnement à suivre.

Fig. 4 > Détermination des mesures de confinement adéquates (eaux souterraines)

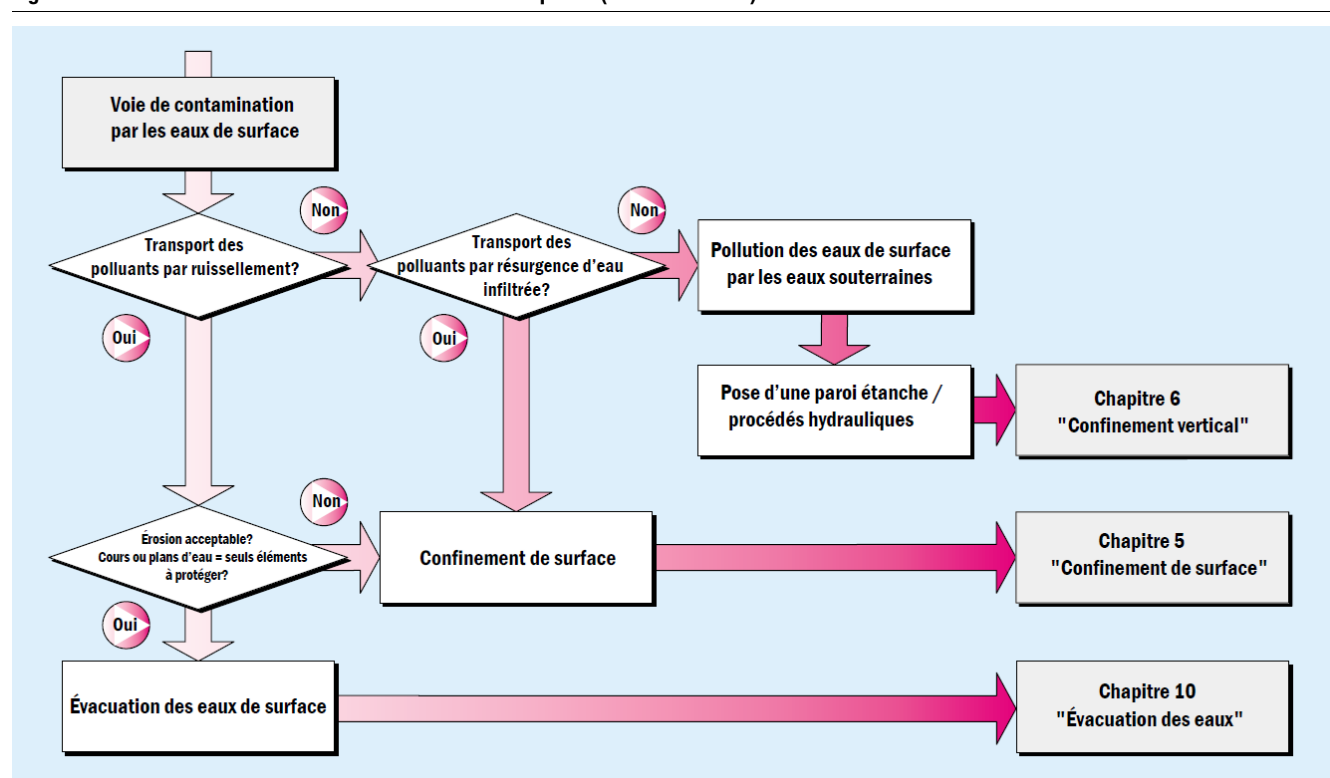


3.3

Voie de contamination par les eaux de surface

Les polluants issus de la décharge peuvent être entraînés par les eaux de surface, soit par ruissellement superficiel (lessivage par l'eau s'écoulant sur la surface de la décharge) et contact direct avec des eaux de surface (cours d'eau ou lac), ou par infiltration dans les eaux souterraines. Pour ces raisons, les mesures de confinement à envisager doivent porter tant sur la surface de la décharge que sur la prévention de la contamination de l'eau souterraines par infiltration.

Fig. 5 > Détermination des mesures de confinement adéquates (eaux de surface)



3.4

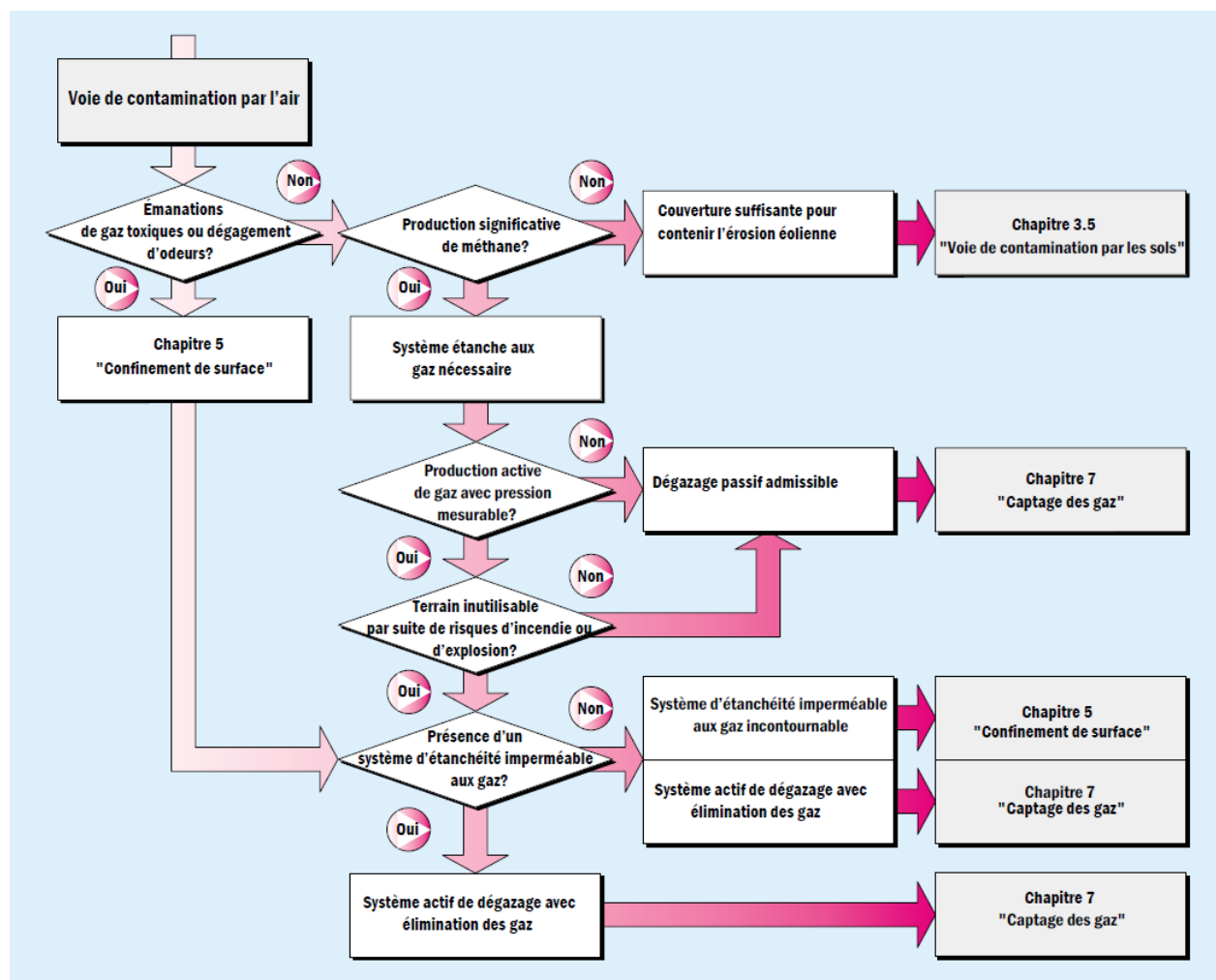
Voie de contamination par l'air

Les anciennes décharges devant être assainies se caractérisent souvent par des dégagements de polluants dans l'atmosphère, soit sous forme de gaz (comme le méthane ou le gaz carbonique, produits dans la décharge par dégradation des matières organiques), soit sous forme de gaz provenant des déchets eux-mêmes (p. ex. hydrocarbures chlorés ou aromatiques), soit encore sous forme de poussières arrachées à la surface de la décharge par le vent (érosion éolienne). Les odeurs incommodantes tenaces sont considérées comme aussi graves que les dangers provoqués par les gaz. Dans les décharges d'ordures ménagères conventionnelles, la production de gaz de décharge est souvent associée à une pollution des eaux souterraines. En effet, la dégradation microbienne

des déchets stockés libère de l'eau dans le corps de la décharge. Cette eau s'ajoute à l'eau de percolation.

Pour les anciennes décharges devant être assainies en raison de leur émission de gaz, voire de gaz toxiques, le confinement passera par une étanchéification de la surface de la décharge en considérant uniquement la problématique de la pollution atmosphérique. De plus, si les processus de formation des gaz sont encore en cours, il s'agira de capter ces gaz et de les éliminer. La difficulté réside dans le fait que les gaz se forment de manière aléatoire dans le corps de la décharge (en fonction des conditions d'humidité régnantes à l'intérieur et des possibles infiltrations des eaux météoriques); il en va de même pour la surface de la décharge, d'où ils peuvent s'échapper de toutes parts. Il est donc insuffisant de prévoir des captages de gaz sur les seuls secteurs où une grande concentration de gaz a été observée («hot spots»), puis de les éliminer. La figure 6 ci-dessous illustre le raisonnement à suivre.

Fig. 6 > Détermination des mesures de confinement adéquates (air)

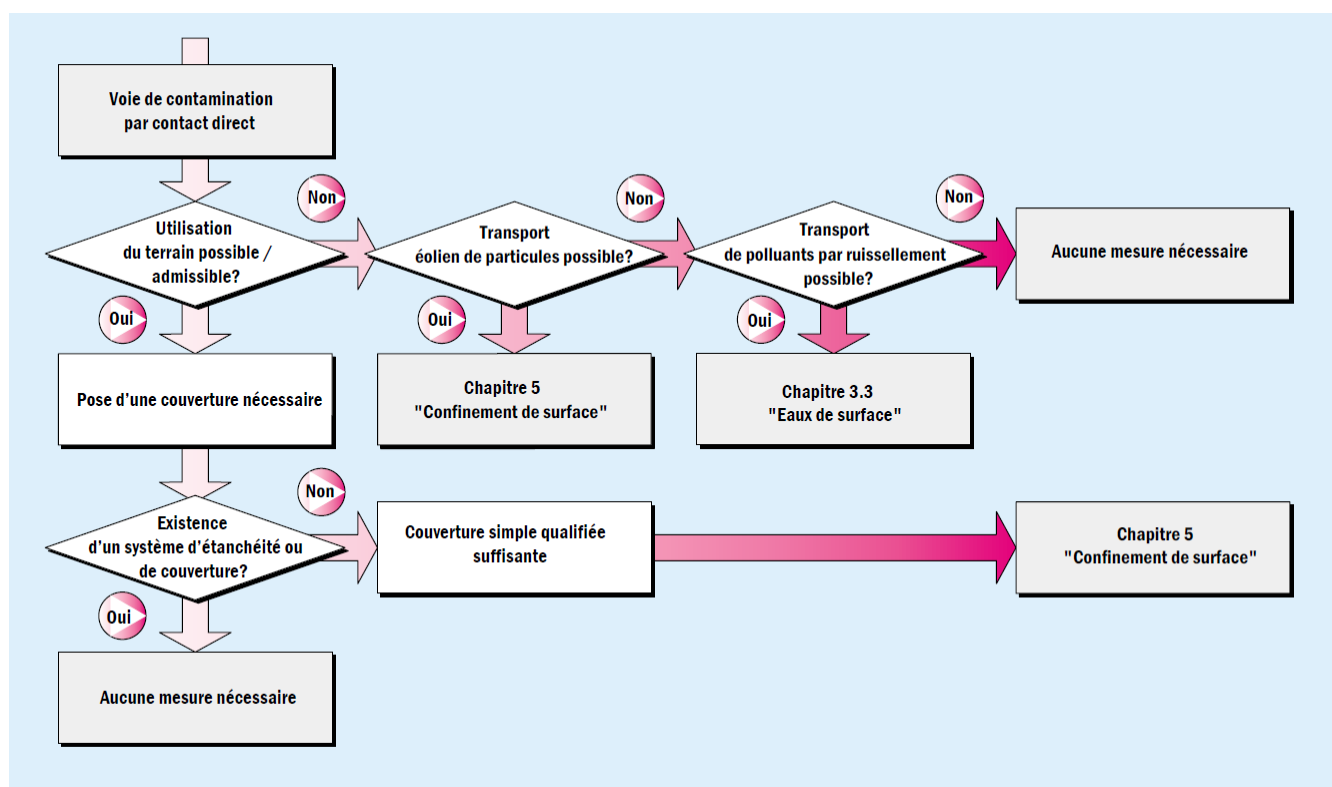


3.5

Voie de contamination par contact direct

Cette voie de contamination suppose que des matériaux pollués stockés affleurent à la surface de la décharge, et que donc toute personne ou animal peut entrer en contact direct avec des matériaux pollués. Ceci est notamment le cas lorsque la décharge est encore en exploitation. Aussi, les mesures de confinement se concentrent-elles sur la couverture de la décharge.

Fig. 7 > Détermination des mesures de confinement adéquates (contact direct)



4 > Buts du confinement des anciennes décharges devant être assainies

L'assainissement des anciennes décharges vise à traiter le site pour qu'il puisse, à moyen terme, être transmis aux générations futures sans qu'elles n'aient plus à prendre de mesures de gestion ou de surveillance.

Pour arriver à un tel résultat, il faut avoir réussi à minéraliser presque entièrement le contenu de la décharge. En particulier, pour la plupart des anciennes décharges de déchets urbains contenant une grande part de déchets organiques, il faut que les processus de dégradation biologique soient terminés. Un des signes d'une minéralisation complète est que la décharge n'émet pratiquement plus de gaz.

Les procédés de confinement traités dans le présent document ne visent donc pas en premier lieu à rendre la surface de la décharge totalement étanche à l'eau: il ne s'agit pas d'empêcher toute pénétration d'eaux météoriques et toute infiltration, mais d'en réduire la quantité pour éviter une mise en danger des milieux à protéger (p.ex. les eaux souterraines). Un certain équilibre hydrique est aussi visé, afin d'éviter de dessécher le corps de la décharge pour permettre aux processus de dégradation biologique d'avoir lieu, tout en limitant ses émissions. La minéralisation des déchets peut alors se poursuivre jusqu'à son terme afin que la décharge atteigne cet état souhaité où il n'est plus nécessaire de la gérer ou de la surveiller (la décharge est vue comme un réacteur biologique). Les eaux souterraines doivent, le cas échéant, être protégées à l'aide d'un dispositif technique adéquat et surveillées par des mesures de contrôle.

L'étanchéification totale d'une ancienne décharge à assainir n'est envisageable que dans certains cas particuliers: soit les propriétés des matériaux déposés rendent impossible leur minéralisation intégrale, soit les dangers qu'ils font courir à la nappe phréatique sont si graves qu'il faut absolument éviter toute mobilisation de polluants. Il faut aussi tenir compte d'un risque de défaillance des dispositifs d'étanchéité sur le long terme: si de l'eau pénètre à nouveau dans le corps de la décharge, les processus de dégradation peuvent recommencer, provoquant à nouveau des émissions. C'est la raison pour laquelle une décharge rendue totalement étanche ne pourra jamais être remise aux générations futures dans un état tel qu'il n'est plus nécessaire de la surveiller: ces ouvrages devront être exploités et suivis pour une durée indéterminée. Ainsi, lorsqu'un tel projet d'étanchéification totale est prévu, et que le suivi de la décharge devrait alors être assuré au-delà d'une à deux générations, il faut étudier la possibilité de décontaminer entièrement le site, c'est-à-dire d'excaver tous les matériaux déposés et les éliminer.

Une autre mesure de décontamination consiste à humidifier volontairement le corps de la décharge, en vue d'accélérer la stabilisation des matériaux entreposés. Cette solution n'est toutefois plus considérée comme du confinement. Dans ce cas, de l'eau externe ou l'eau de percolation récupérée de la décharge est infiltrée dans le terrain. Une telle solution n'est toutefois envisageable que lorsque des mesures supplémentaires – comme l'étanchéification du fond de la décharge et la collecte des eaux de percolation – permettent de garantir que les eaux souterraines ne seront pas menacées.

Un autre moyen d'accélérer les processus de dégradation des matières organiques, et donc la stabilisation d'une décharge, consiste à y introduire de l'air afin de créer des conditions aérobies (p. ex. par le procédé dit Biopuster, cf. ch. 8.5).

5 > Confinement de surface

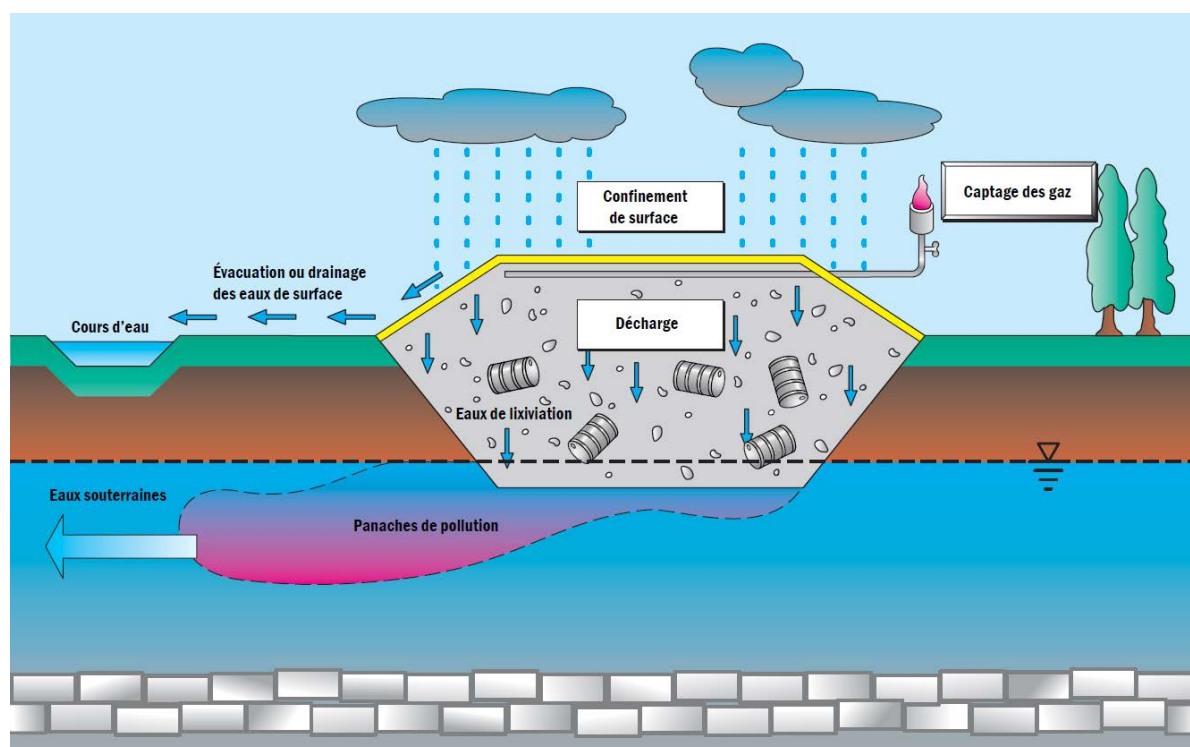
5.1 Généralités

Le dispositif de confinement de la surface de la décharge vise principalement à :

- > empêcher ou minimiser la diffusion des polluants, pour limiter leur impact sur les milieux à protéger;
- > réduire les apports d'eaux percolant à travers le corps de la décharge;
- > réduire les émissions de polluants volatils et de gaz;
- > diminuer les odeurs incommodantes et l'érosion éolienne (entraînement de poussières et autres particules potentiellement contaminées par le vent)
- > remettre le site en culture;
- > garantir un confinement à long terme;
- > réduire les coûts d'entretien.

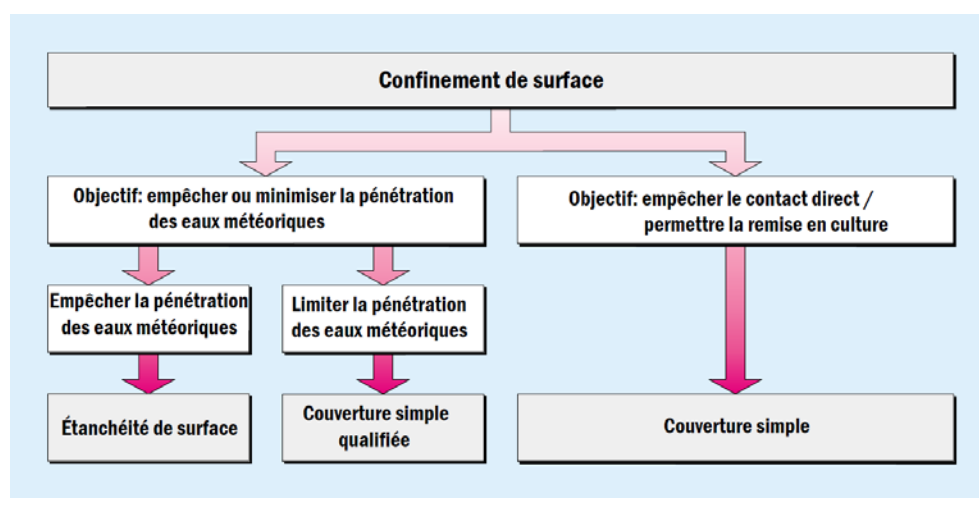
Le fonctionnement général du dispositif de confinement de la surface est présenté dans la figure 8.

Fig. 8 > Principe de fonctionnement du dispositif de confinement de surface



La figure 9 ci-dessous permet de classer les différents éléments du dispositif de confinement de surface en fonction des objectifs fixés pour l'ensemble du confinement de la décharge à assainir.

Fig. 9 > Classement des dispositifs de confinement de la surface par rapport aux objectifs à atteindre



5.2 Choix des dispositifs de confinement

Le premier pas consiste à choisir un système de confinement de la surface adapté à la situation. Ce choix dépend des caractéristiques du site, des propriétés des matériaux stockés et de l'état des étanchéités naturelles ou techniques déjà en place; il est également crucial de tenir compte de la menace concrète que fait peser la décharge sur l'environnement.

5.2.1 Dispositifs visant à empêcher ou minimiser la pénétration d'eaux météoriques

Ces dispositifs se répartissent en deux catégories en fonction des objectifs fixés: empêcher totalement toute pénétration d'eau ou réduire la quantité d'eau infiltrée. Il s'agit des catégories suivantes:

Étanchéité de surface

Les différentes formes d'étanchéités minérales ne peuvent pas offrir une garantie absolue quant à l'infiltration des eaux: il peut arriver, sous certaines conditions, que des fissures se forment, laissant l'eau pénétrer dans la décharge.

Cependant, si l'on examine l'ensemble des dispositifs mis en œuvre, en particulier la couche pour la remise en culture et le maintien de l'équilibre hydrique, on observe que les quantités d'eaux de percolation résiduelles sont minimales. Cette situation est souvent admissible si le potentiel de danger de la décharge est limité. La présence d'une légère humidité peut même être souhaitable, car elle facilite la stabilisation des matériaux entreposés.

Il existe d'autres formes particulières d'étanchéités de surface, à savoir les systèmes totalement étanches («barrières anti-convection»), qui, s'ils sont mis en place dans les règles de l'art, bloquent tout écoulement de l'eau, et ce indépendamment de la saison ou des conditions météorologiques. Ces derniers ne doivent cependant être utilisés qu'à titre exceptionnel en raison de leur effet de «momification» (dessiccation du sol). Parmi ce type d'étanchéités ne figurent pour l'instant que des systèmes multicouches avec des lés d'étanchéité en matière synthétique et des étanchéités bitumineuses.

Couverture simple qualifiée

Les couvertures qualifiées, composées d'une couche de matériaux terreux pour la remise en culture, réduisent massivement l'infiltration des eaux. Une certaine quantité d'eau résiduelle pénétrant en moyenne annuellement dans le corps de la décharge est toutefois acceptable.

Les couvertures simples qualifiées sont donc particulièrement recommandées si le potentiel de danger de la décharge est réduit et que la pluviométrie est faible (650–700 mm par an).

Le choix entre un dispositif presque totalement étanche et un autre un peu moins étanche dépend des caractéristiques du site, des étanchéités naturelles ou techniques existantes et du potentiel de danger des déchets entreposés. Les critères décisionnels sont énumérés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tab. 2 > Critères pour choisir un système de confinement de surface adapté

Choix entre

Système de confinement hautement imperméable	Système de confinement moyennement imperméable
Caractéristiques du site peu favorables, p. ex. • couches géologiques très perméables • nappe phréatique proche de la surface • pluviométrie importante	Caractéristiques du site favorables, p. ex.: • sous-sol étanche • nappe phréatique relativement profonde et protégée par une bonne couche de séparation • faible pluviométrie
Système d'étanchéité technique dans le sous-sol inexistant ou déficient	Système d'étanchéité technique dans le sous-sol de bonne qualité
Potentiel de danger des déchets élevé	Potentiel de danger des déchets faible
Pas de nécessité de stabiliser les matériaux entreposés par adjonction d'eau de percolation (momification)	Intention de stabiliser rapidement les matériaux entreposés

Un autre critère important dont il faut tenir compte est celui de l'imperméabilité de la surface aux gaz. Les seuls dispositifs permettant d'éviter les fuites de gaz sont les systèmes munis de barrières anti-convection. Les autres systèmes présentent des perméabilités résiduelles et laissent donc du gaz s'échapper en plus ou moins grande quantité de la décharge. Il s'agit dès lors de vérifier dans quelle mesure les risques liés à ces fuites de gaz résiduelles sont acceptables.

5.2.2 Couverture simple

Si l'on s'en tient à une couverture simple, aucun critère décisionnel supplémentaire n'est nécessaire, puisque le niveau d'exigence pour la fonction de protection est relativement bas. Il faut cependant décider si la couverture est suffisante pour garantir un confinement à long terme ou si elle doit être considérée comme une mesure transitoire. Le choix des matériaux terreux de couverture et leur mise en place doivent répondre aux exigences de l'ordonnance fédérale du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol, RS 814.12) et du manuel «Sols et construction» de l'OFEV.

5.3 Structure de base des dispositifs de confinement de surface

5.3.1 Étanchéité de surface

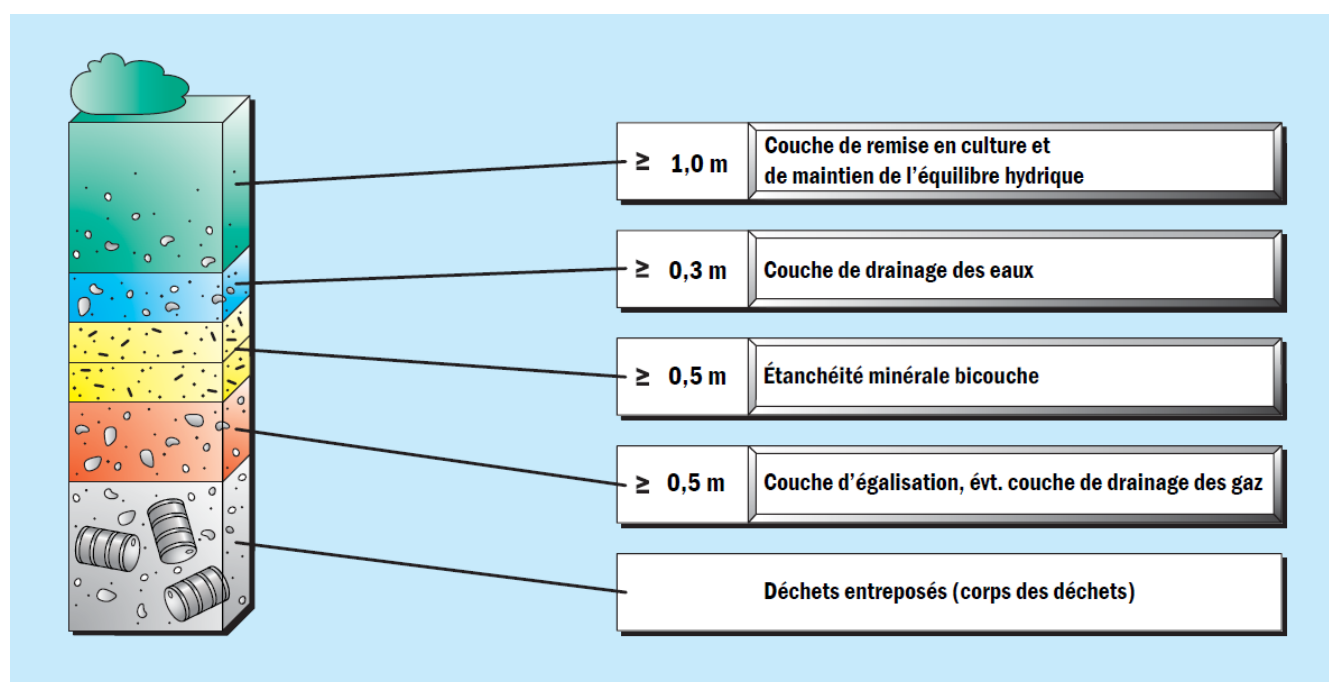
Les éléments déterminants d'une étanchéité de surface sont, d'une part, la couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique (cf. ch. 5.2.2), posée sur une couche d'étanchéité, d'autre part, la couche d'égailisation et de drainage des gaz, elle-même posée sur le corps de la décharge. Le tableau 3 ci-dessous décrit en détail les composants de ce type d'étanchéité, leur agencement et leur fonction.

Tab. 3 > Nature et fonction des composants de l'étanchéité de surface

Composants	Constitution	Fonctions
Couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique	Végétation ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.1.1	• Protection contre l'érosion • Évapotranspiration • Intégration dans le paysage
	Sol de remise en culture Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.1.2	• Égalisation de la surface du sol • Stabilisation du sol par enracinement • Rétention des eaux météoriques • Protection contre le dessèchement (facultatif) • Protection contre le gel (facultatif) • Régularisation des arrivées d'eau dans la couche de drainage
Couche de drainage des eaux	Couche de drainage des eaux ⇒ Ch. 5.4.1 et ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.2	• Captage et évacuation des eaux de percolation (pour éviter des poches d'eaux stagnantes) • Dans certains cas, protection de la couche d'étanchéité contre des atteintes mécaniques et contre la pénétration des racines (nattes de drainage)
Couche d'étanchéité	Couche de protection	• Protection de l'étanchéité
	Étanchéité ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.3	• Protection (imperméabilité) contre les eaux météoriques • Protection (imperméabilité) contre les gaz de décharge (s'il s'en forme) • Barrière de protection contre les racines (lés d'étanchéité en matière synthétique)
	Évt. système de détection des fuites ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.4	• Surveillance de l'efficacité de l'étanchéité
	Couche de protection	• Protection de l'étanchéité
Couche d'égailisation et de drainage des gaz	Couche de drainage des gaz Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.5	• Évt. protection de la couche d'étanchéité (couche de sable) • Support pour la pose de la couche d'étanchéité • Captage et évacuation des gaz de décharge (s'il s'en forme)
	Couche d'égailisation Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.6	• Remblais nivelé pour la couche de drainage des gaz et la couche d'étanchéité • Égalisation de la surface du corps de la décharge (constitution d'une pente minimale)

La méthode la plus souvent employée pour **étanchéifier la surface** est de mettre en place une double couche de matériaux minéraux (annexe A, ch. 1.3.1) d'une épaisseur $\geq 0,50$ m (cf. fig. 10).

Fig. 10 > Structure générale d'une étanchéité de surface

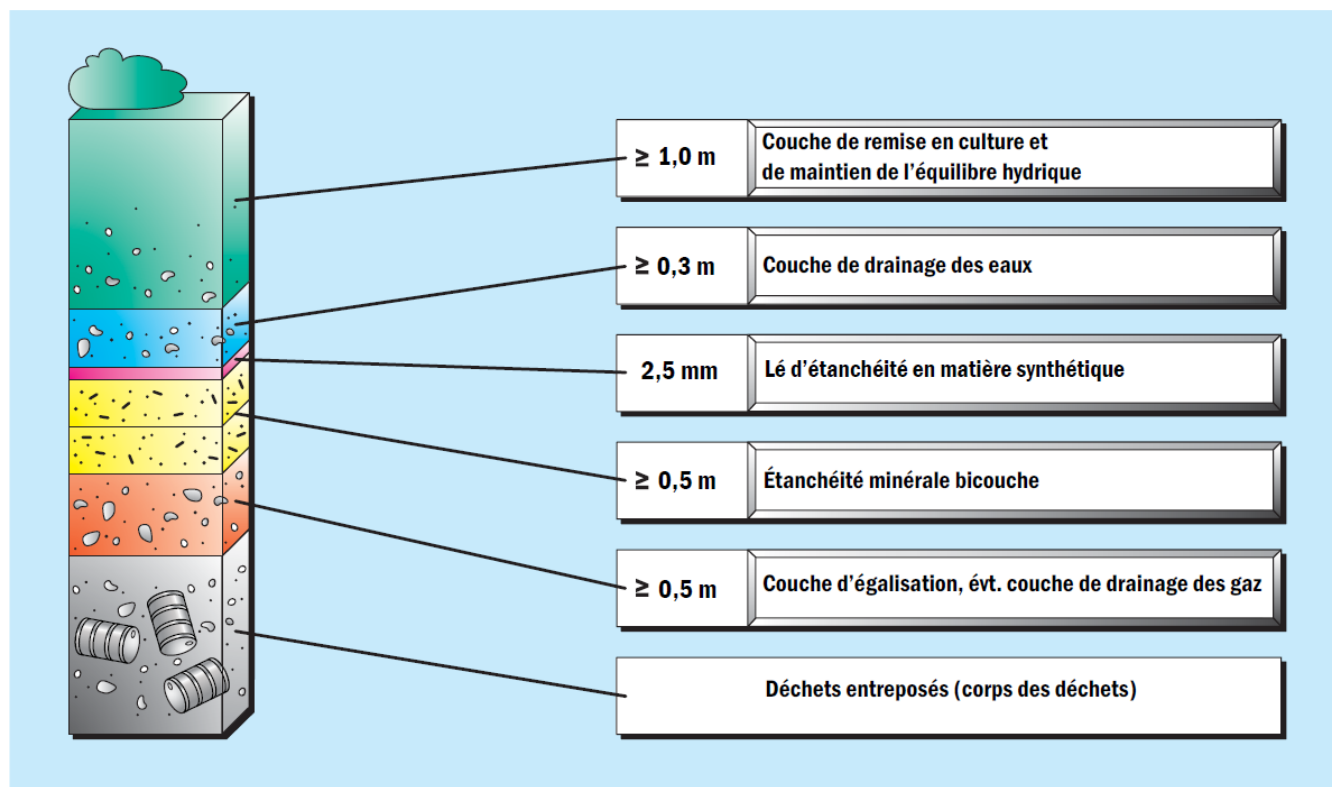


Cette structure peut être remplacée par la succession d'éléments suivants, considérée comme équivalente :

- > mélange minéral enrichi de bentonite (annexe A, ch. 1.3.7), dans certains cas particuliers d'une épaisseur $< 0,5$ m (à déterminer au cas par cas),
- > nattes de bentonite (annexe A, ch. 1.3.3) en deux couches pour les secteurs de décharge à faible pente,
- > barrière capillaire (annexe A, ch. 1.3.5) lorsque la production de gaz est à peu près terminée.

Si l'on souhaite poser une **étanchéité de surface** complètement imperméable, avec **barrière anti-convection**, des lés d'étanchéité en matière synthétique (épaisseur $\geq 2,5$ mm, cf. annexe A, ch. 1.3.2) sont associés à une étanchéité minérale bicouche (annexe A, ch. 1.3.1) d'une épaisseur $\geq 0,50$ m (cf. fig. 11).

Fig. 11 > Structure générale d'une étanchéité de surface dotée d'une barrière anti-convection



En lieu et place de la combinaison décrite ci-dessus, il est aussi possible de mettre en place les éléments d'étanchéité énumérés ci-dessous :

- > lés d'étanchéité en matière synthétique d'une épaisseur $\geq 2,5$ mm (annexe A, ch. 1.3.2), comme seul élément d'étanchéité lorsque le potentiel de danger des déchets est minime, ou en combinaison avec un système de détection des fuites (annexe A, ch. 1.4),
- > couche d'étanchéité bitumineuse (annexe A, ch. 1.3.6) en remplacement des lés synthétiques, qui permet dans certains cas de réduire l'épaisseur de la couche minérale sous-jacente, voire d'y renoncer totalement,
- > mélange minéral enrichi de bentonite (annexe A, ch. 1.3.7), dans certains cas d'une épaisseur $< 0,5$ m (à déterminer au cas par cas), comme étanchéité minérale associée à des lés d'étanchéité synthétiques ou une étanchéité bitumineuse (renoncer à la couche en matière synthétique est possible si l'on optimise la couche de remise en culture),
- > nattes en bentonite (annexe A, ch. 1.3.3) en combinaison avec des lés d'étanchéité synthétiques, pour autant qu'il soit possible de justifier cette option.
- > barrière capillaire (annexe A, ch. 1.3.5) en tant que composant minéral, en combinaison avec un lé synthétique ou une étanchéité bitumineuse; cette solution n'est admise que si la production de gaz est presque terminée.

5.3.2 Couverture simple qualifiée

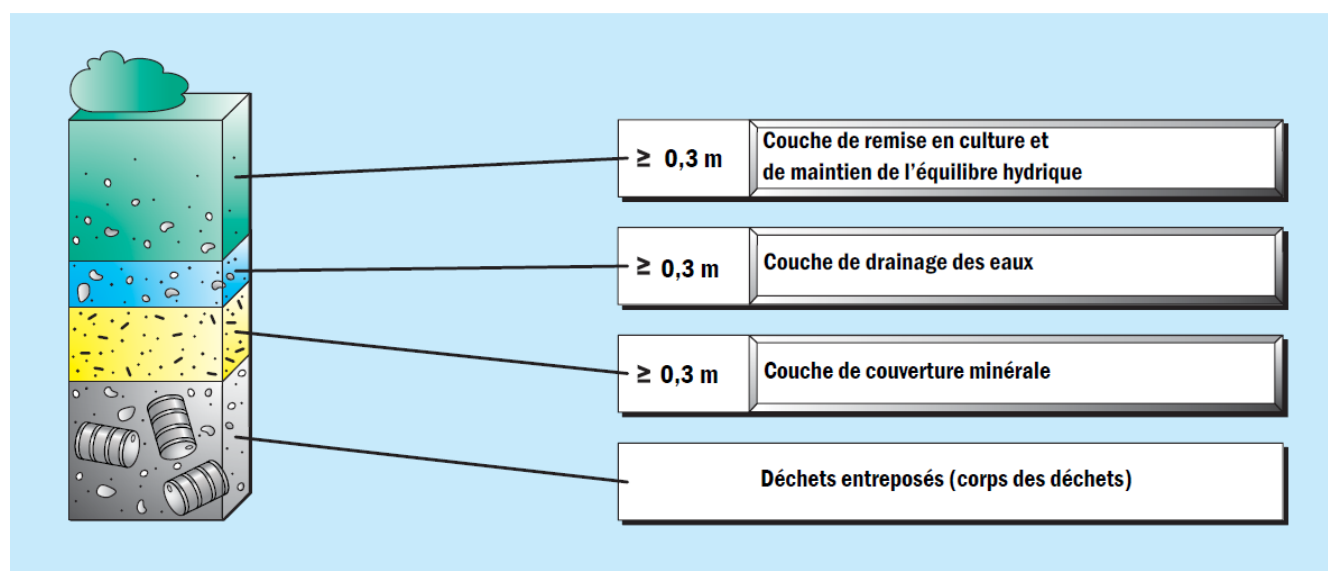
Le tableau 4 ci-dessous rend compte de la structure (succession des couches) d'une couverture simple qualifiée.

Tab. 4 > Nature et fonction des composants d'une couverture simple qualifiée

Composants	Constitution	Fonctions
Couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique	Végétation ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.1.1	Cf. tab. 3: Nature et fonction des composants de l'étanchéité de surface
	Sol de remise en culture ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.1.2	Cf. tab. 3: Nature et fonction des composants de l'étanchéité de surface
Couche de drainage des eaux	Couche de drainage des eaux ⇒ Ch. 5.4.1 et annexe A, ch. 1.2	Cf. tab. 3: Nature et fonction des composants de l'étanchéité de surface
Couche de couverture	Couche de couverture minérale	Réduction de la pénétration d'eau Minimisation des émanations de gaz et d'odeurs

En règle générale, une couverture simple qualifiée se compose de trois couches successives d'au moins 30 cm d'épaisseur, à savoir, de bas en haut, une couche de couverture minérale, une couche de drainage des eaux et une couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique (cf. annexe A, ch. 1.1 et 1.2, et fig. 12 ci-dessous).

Fig. 12 > Structure générale d'une couverture simple qualifiée



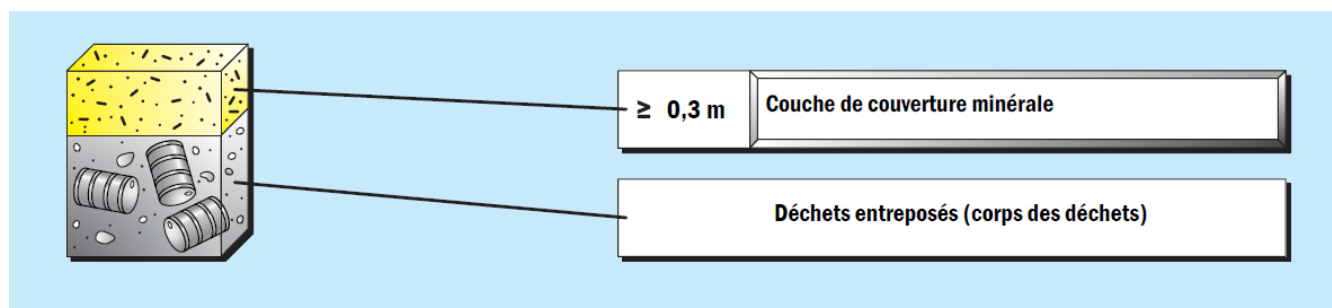
5.3.3 Couverture simple

La couverture dite simple présente une structure élémentaire composée d'une seule couche. Sa structure et ses fonctions sont expliquées ci-dessous dans le tableau 5 et à la figure 13.

Tab. 5 > Nature et fonction des composants de la couverture simple

Composant	Constitution	Fonctions
Couche de couverture	En règle générale, couverture du sol monocouche, évt. mise en place par couches, peut être associée à des lés en matière synthétique	• Réduction de l'infiltration des eaux • Réduction de la migration des gaz • Prévention de tout contact direct avec les matières contaminées et toute dissémination des polluants par transport éolien • Suivant le cas, amélioration de l'aspect du site et meilleure intégration de la décharge dans le paysage • Réduction des odeurs nauséabondes • Réduction du risque d'incendie

Fig. 13 > Structure générale d'une couverture simple



5.4 Composants du dispositif de confinement de surface

5.4.1 Généralités

Une fois prise la décision de principe concernant le système de confinement à privilégier pour la surface de la décharge, il faut choisir concrètement les composants d'étanchéité et de couverture à mettre en œuvre.

Ce faisant, il convient de tenir compte des contraintes qui peuvent affecter le système de confinement, à savoir:

- > les pressions hydrauliques,
- > les tassements différentiels,
- > les conditions climatiques,
- > l'érosion,
- > la stabilité,
- > les contraintes mécaniques des sols,
- > la pénétration des racines,
- > les nuisances liées aux petits animaux, et
- > les émanations de gaz ou de vapeurs.

La prise en compte des facteurs susmentionnés permet de déterminer les principales exigences auxquelles devront satisfaire le système de confinement ou de ses composants et ainsi orienter le choix de ces derniers, notamment en fonction des critères suivants:

- > étanchéité (à l'eau ou aux gaz),
- > résistance mécanique (p. ex. stabilité, résistance aux tassements),
- > durabilité (résistance à la sécheresse, à la pénétration des racines, aux intempéries, etc.),
- > faisabilité (facilité ou difficulté de mise en œuvre, p. ex. efforts techniques requis, pose indépendante des conditions atmosphériques, disponibilité des matériaux de couverture),
- > sécurité du système (possibilités d'effectuer des contrôles ou des réparations),
- > coûts.

Les explications qui suivent, relatives à chacun des composants du **système de confinement de surface** de la décharge, permettront de choisir ceux-ci en relation étroite avec les contraintes du site (l'annexe A reprend, sous forme de tableaux, les données techniques relatives à chacun de ces composants, et donne des indications quant à leur mise en œuvre). Ci-dessous, les différents matériaux d'étanchéité sont évalués sur la base de leurs propriétés, décrites en détail dans l'annexe A, en relation avec les critères décisionnels exposés ci-avant.

Les composants décrits dans l'annexe A sont les suivants:

Éléments constitutifs du système de confinement	Annexe A , Chiffre
Végétation	
- Le fait de végétaliser la surface d'une décharge à assainir permet d'étanchéifier les couches supérieures, de protéger les couches sous-jacentes, ainsi que de donner un aspect plus naturel aux surfaces des anciennes décharges. - La végétalisation joue un rôle important dans la gestion de l'équilibre hydrique au sein de la couche supérieure.	1.1.1
Sol de remise en culture	
Avec la végétation, le sol de remise en culture constitue l'un des deux éléments les plus importants de la couche destinée à régler l'équilibre hydrique: il permet d'une part l'enracinement des plantes et protège la couche d'étanchéité sous-jacente.	1.1.2
Couche de drainage des eaux	
- La fonction principale de cette couche est d'évacuer les eaux s'étant infiltrées par les couches supérieures (couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique ou autres couches superficielles). - Outre les matériaux minéraux traditionnels, il est également possible d'utiliser des matériaux drainants artificiels.	1.2
Couche d'étanchéité	
Pour constituer une couche d'étanchéité dans un système de confinement superficiel, plusieurs matériaux différents peuvent être employés. Le tableau 6 offre une vue d'ensemble de ces derniers ainsi que de leurs propriétés.	1.3
Système de détection des fuites	
- Les systèmes de détection des fuites servent à effectuer les contrôles requis. Outre le contrôle du dispositif de confinement lors de sa mise en place et de l'ensemble de la décharge une fois celle-ci confinée (cf. ch. 11 «Surveillance et suivi»), il peut s'avérer nécessaire d'effectuer une surveillance directe du dispositif de confinement, en particulier dans le cas d'anciennes décharges devant être assainies hautement problématiques. - Contrairement aux étanchéités de fond, les réparations d'éléments de confinement superficiels sont techniquement réalisables et financièrement supportables. Ainsi, un système de détection des fuites donne la possibilité, dans certains cas, de renoncer à une étanchéité composée (qui prévoit deux éléments d'étanchéité pour le cas où l'un des deux ne fonctionne plus), permettant de réaliser des économies.	1.4
Couche de drainage des gaz	
- Une telle couche est requise dans le cas des décharges caractérisées par une production active de gaz (pour plus de détails, cf. ch. 8) ou s'il est nécessaire de capter les gaz toxiques. - Sise en-dessous de la couche d'étanchéité, elle permet de collecter les gaz sur toute la surface et de les conduire jusqu'aux systèmes de captage (cf. ch. 8).	1.5
Couche d'égalsation	
- Dernière couche dans le système de confinement de surface, la couche d'égalsation constitue un élément d'interface entre le corps des déchets et les autres composants du dispositif de confinement. - Couche de support pour le dispositif de confinement et d'évacuation des eaux, elle doit présenter la capacité portante et le niveau de nivellement requis. Cette dernière peut faire partie du corps des déchets (c.-à-d. qu'elle peut être constituée de matériaux contaminés) ou être mise en place en-dessus (avec d'autres matériaux), servant à la fois de couche d'égalsation et de drainage des gaz.	1.6

5.4.2

Évaluation des matériaux d'étanchéité

Le tableau ci-dessous évalue synthétiquement les différents matériaux utilisables pour réaliser la couche d'étanchéité à proprement parler.

Tab. 6 > Aide pour évaluer les matériaux d'étanchéité courants

Matériau d'étanchéité		Lés synthétiques	Étanchéités bitumineuses	Étanchéités minérales	Nattes de bentonite	Mat. minéraux enrichis de polymères	Barrières capillaires
Critères d'évaluation							
Étanchéité	Eau	++	++	+	+	+/++	+
	Gaz	++	++	+	-	+/++	-- ¹⁾
Résistance mécanique	Stabilité	+	++	++	+	++	++
	Risque de déformations	moyen	moyen	haut	faible	faible	faible
	Résist. aux contraintes mécaniques	-	++	+	++	++	+
Durabilité (Résistance)	Dessèchement	++	++	--	--	++	++
	Impacts biologiques	++	+	--	-	+	+
	Impacts chimiques	++	++	++	+	++	+
	Vieillessement	++	++	+	-	+	++
	Intempéries	+/++	++	-	-	+	++
Facilité de fabrication	Difficulté technique	faible	haut	moyen	faible	moyen	moyen
	Dépendance aux cond. météo.	haut	faible	haut	haut	moyen	faible
	Exigences liées à l'autorisation	moyen	moyen	haut	haut	haut	moyen
	Assurance-qualité	moyen	moyen	haut	moyen	moyen	haut
	Disponibilité des matériaux	++	++	-	++	++	+
	Espace requis	moyen	faible	haut	faible	faible	haut
Sécurité du système	Facilité de suivi	-/++ ²⁾	-/++ ³⁾	-	-	-	-
	Facilité de réparation	++	+	++	+	+	+
	Points faibles	moyen	faible	moyen	moyen	moyen	moyen
Possibilités d'utilisation	Mise en œuvre	++	++	++	+	++	++
	Utilisation ultérieure	-	+	-	-	-	-
Coûts		moyen	haut	faible	faible	faible	moyen

Légende:

++ critère satisfait sans restriction
 + critère satisfait sous certaines conditions
 - critère satisfait de manière limitée
 -- critère non satisfait

1) Seulement étanche aux gaz si un lé d'étanchéité synthétique est placé sous la barrière capillaire.

2) Peut être contrôlé sans limitations si associé avec un système de détection des fuites ou une barrière capillaire sous-jacente.

3) Contrôle optique possible si la surface est utilisée ultérieurement

5.4.3 Utilisation de matériaux alternatifs

Lorsque les matériaux décrits ci-dessus ne sont pas disponibles en quantités suffisantes ou à proximité du site en question, il est possible de les remplacer par des matériaux naturels équivalents, éventuellement «améliorés» par l'adjonction d'adjuvants adéquats, afin qu'ils acquièrent les propriétés des matériaux spécifiés ci-dessus. On peut envisager d'utiliser les matériaux suivants:

- > matériaux trouvés sur place, tels que matériaux terreux à granulométrie mixte, pierres concassées (à utiliser pour le drainage des gaz ou des eaux) en lieu et place de gravier,
- > matériaux trouvés sur place et conditionnés, par exemple par l'adjonction de bentonite (cf. annexe A; ch. 1.3.7).

La priorité sera donnée à des matériaux d'excavation ou des déblais qui peuvent ainsi être valorisés pour confiner des anciennes décharges devant être assainies. Ce faisant, on veillera à respecter les exigences de la directive sur les matériaux d'excavation.

Il faudrait aussi examiner la possibilité d'utiliser des matériaux recyclés, en suivant les dispositions de la directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux, et ce en vue de préserver les ressources naturelles, en particulier les matériaux de construction minéraux de haute qualité.

5.5 Conception du système de confinement de surface

Les informations fournies ci-dessus permettent de procéder au choix des composants nécessaires adéquats pour réaliser un confinement de surface de la décharge adapté au site.

Le tableau 7 ci-dessous permet de concevoir et mettre sur pied un dispositif complet de confinement de surface. Il indique les exigences que pose chacun des composants aux autres éléments ou couches du dispositif. Suivent des exemples qui expliquent comment utiliser ce tableau.

Tab. 7 > Exigences que posent les composants du confinement les uns par rapport aux autres

...pose les exigences suivantes à cet autre composant Le composant ci-dessous ...		Couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique		Couche de drainage des eaux		Couche d'étanchéité						Couche de drainage des gaz et d'égalisation	
		Végétation	Sol de remise en culture	Couche de drainage minérale	Natte de drainage	Lé d'étanchéité synthétique	Étanchéité minérale	Natte de bentonite	Étanchéité bitumineuse	Barrière capillaire	Matériaux enrichis de polymères	Couche de drainage des gaz	Couche d'égalisation
Couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique	Végétation		+ 1	+ 2	+ 2	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sol de remise en culture	+ 3		+ 2	+ 2	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche de drainage des eaux	Couche de drainage minérale	4	5			+ 6	-	-	-	-	-	-	-
	Natte de drainage	4	5			+	-	-	-	-	-	-	-
Couche d'étanchéité	Lé d'étanchéité synthétique	-	+	+ 7	+		EC	EC		EC	EC	+ 7	+ 9
	Étanchéité minérale	+ 8	+ 8	+ 7	+	EC			EC			+	+ 9
	Natte de bentonite	+ 8	+ 8	+	+	EC	EC					+	+ 9
	Étanchéité bitumineuse	-	+ 11	+ 11	+ 11		EC					+	+ 9
	Barrière capillaire	+	+ 5	- 12	- 12	EC						- 10	+ 9
	Matériaux enrichis de polymères	+ 8	+ 8	+ 7	+	EC						+ 7	+ 9
Couche de drainage des gaz et d'égalisation	Couche de drainage des gaz	-	-	-	-	+	+ 5	+	+	- 13	+		+
	Couche d'égalisation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Légende:

+ est nécessaire

- pas d'exigences

EC possible dans une étanchéité composée

1 substrat à adapter aux plantes prévues; épaisseur suffisante pour leur enracinement

2 nécessaire pour éviter la formation de poches d'eaux stagnantes dans le sol cultivé (en présence d'une couche d'étanchéité)

3 nécessaire pour freiner l'érosion

4 pose d'une barrière contre la pénétration des racines envisageable

5 structure filtrante stable nécessaire

6 suivant le cas, surface anti-dérapante nécessaire

7 couche de protection contre les atteintes mécaniques (couche de sable, géotextile) nécessaire

8 nécessaire pour empêcher le dessèchement de la couche

9 pente minimale nécessaire, même après tassements éventuels

10 nécessaire si l'on a posé des lés d'étanchéité synthétiques sous la barrière capillaire

11 pas nécessaire si la surface a été totalement étanchéifiée (cf. ch. 5.3.1)

12 nécessaire si des lés d'étanchéité synthétiques ont été posés en-dessus de la barrière capillaire

13 combinaison non judicieuse, puisqu'une barrière capillaire n'est pas étanche aux gaz

Les exigences posées par l'élément «végétation» aux autres composants du système de confinement sont les suivantes:

- > Il est nécessaire de mettre en place une couche de sol cultivable adaptée à la végétation et de donner à ce substrat une profondeur suffisante pour permettre l'enracinement des plantes.
- > Il faut prévoir une couche de drainage (p. ex. une natte) pour empêcher la formation de poches d'eaux stagnantes dans le sol remis en culture.
- > Aucune exigence n'est posée en rapport avec les autres composants du confinement.

Exemple 1
d'utilisation du tableau 7

Les exigences posées par l'élément «sol de remise en culture» aux autres composants du système de confinement sont les suivantes:

- > Une couverture végétale est nécessaire pour prévenir l'érosion de la surface.
- > Il faut prévoir une couche de drainage (p. ex. une natte) pour empêcher la formation de poches d'eaux stagnantes dans le sol remis en culture.
- > Aucune exigence n'est posée en rapport avec les autres composants du confinement.

Exemple 2
d'utilisation du tableau 7

5.6 Calculs et vérifications

5.6.1 Contrôles en matière de mécanique des sols

Les vérifications suivantes peuvent s'avérer nécessaires:

- > stabilité des pentes,
- > stabilité du terrain et capacité portante,
- > déformations,
- > ancrage des lés d'étanchéité en matière synthétique et des géotextiles (géogrilles, etc.),
- > effet de voûte entraînant des contraintes sur le corps de la décharge ou sur le système d'étanchéité,
- > frottements de l'enveloppe entraînant des contraintes sur le corps de la décharge ou sur le système d'étanchéité,
- > tassements.

Les contrôles les plus importants pour déterminer si le système de confinement est adapté sont ceux qui portent sur les tassements pouvant affecter les couches inférieures du dispositif d'étanchéité – en particulier les tassements du corps des déchets lui-même. Deux types de tassements doivent être pris en compte:

- > les tassements entraînés par une charge exercée à la surface (p. ex. le poids des couches mises en place pour confiner la décharge, ou les contraintes induites par les activités éventuelles exercées sur le couvercle de la décharge);
- > les tassements lents observables sur la durée (dus surtout à la dégradation des matières organiques dans le corps de la décharge).

En règle générale, ces tassements pourront être anticipés en surélevant le terrain (pente suffisamment importante pour compenser les tassements à venir et permettant de maintenir ultérieurement une pente minimale). Dans les calculs, il faut tenir compte non seulement des tassements absolus, mais également des tassements différentiels. En effet, ces derniers peuvent entraîner des elongations locales (p. ex. des lés d'étanchéité en matière synthétique) qui, si les tensions exercées dépassent les tolérances admissibles, peuvent conduire à une défaillance (rupture) du système de confinement.

5.6.2 Calculs statiques

Des calculs statiques devront être faits pour tous les ouvrages ou éléments de construction en béton, en céramique, en plastique ou en métal. Dans le cas d'une décharge, il s'agit principalement des canalisations d'évacuation des eaux ou des gaz, des chambres de contrôle ainsi que, le cas échéant, des constructions posées sur la surface de la décharge en vue de son utilisation.

5.6.3 Calculs hydrauliques et pneumatiques

Pour garantir la qualité des systèmes d'étanchéité superficiels, il est particulièrement important de vérifier les propriétés de la décharge sur les plans hydraulique et pneumatique, éventuellement de modéliser numériquement la décharge. Ce faisant, il convient de distinguer les calculs hydrauliques concernant les divers éléments de construction (couches de drainage, canalisations de drainage ou d'évacuation des eaux, fossé d'évacuation des eaux, etc.) de ceux concernant le régime des eaux de l'ensemble du système d'étanchéité ou de couverture.

Les calculs hydrauliques permettront de simuler des processus tels que les précipitations, l'écoulement des eaux météoriques à la surface de la décharge, l'infiltration, l'évapotranspiration, la capacité de rétention des sols, la percolation ainsi que les écoulements latéraux dans les couches de drainage. Les calculs hydrauliques concernant le système de confinement de la surface sont particulièrement importants pour prouver que différents systèmes d'étanchéité sont équivalents. Il est en effet crucial que cette équivalence soit avérée au niveau de leurs propriétés hydrauliques.

Les calculs pneumatiques seront effectués pour les installations ou ouvrages destinés au captage et à l'élimination des gaz produits par la décharge. Il s'agit de démontrer que ces réalisations sont efficaces et qu'elles ont la capacité nécessaire.

5.7

Plan d'assurance-qualité

Le confinement devant satisfaire à exigences élevées, en particulier sur le plan de sa durabilité à long terme, il est nécessaire de construire des ouvrages de très grande qualité, tant au niveau des matériaux utilisés qu'au niveau du processus de fabrication ou de mise en place.

Il s'agit donc d'établir un plan exhaustif d'assurance-qualité qui concerne tous les organismes impliqués dans l'opération. Ce plan définira les responsabilités, les modes d'exécution des travaux, le déroulement des contrôles de qualité, ainsi que la périodicité de ces derniers. La norme SIA 203, Décharges contrôlées, donne de plus amples informations sur la manière de concevoir un plan d'assurance-qualité.

Cette norme contient notamment des recommandations détaillées quant à la surveillance des travaux d'exécution, en particulier concernant les éléments suivants:

- > étanchéités minérales,
- > étanchéités bitumineuses,
- > lés d'étanchéité en matière synthétique.

Le gouvernement allemand a aussi édicté un ensemble de règlements complet concernant l'assurance-qualité de confinements de décharges. Il s'agit notamment des documents suivants: Deponieverordnung (DepV, «Ordonnance concernant les décharges»), Technische Anleitung Abfall (TA Abfall, «Instructions techniques concernant les déchets»), Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASI, «Instructions techniques concernant les déchets urbains»), mais surtout des recommandations «Geotechnik der Deponien und Altlasten» (GDA, «Géotechnique des décharges et des sites contaminés»), possédant de nombreux conseils pour la conception de l'assurance-qualité.

Un plan d'assurance-qualité règle de manière précise les compétences des différents intervenants sur le chantier. Il définit aussi la manière de mettre en place les structures destinées explicitement à la seule gestion de la qualité. Deux sortes de surveillance doivent être organisées: l'autosurveillance de l'entrepreneur chargé de l'exécution, et la surveillance par des tiers, mandatés par le maître de l'ouvrage; cette dernière joue un rôle particulièrement important dans le processus de contrôle.

5.8

Utilisation ultérieure de la surface de la décharge

Dans les régions soumises à un fort développement urbain, exposées à la pénurie de terrains à bâtir, les autorités prévoient de plus en plus souvent la réaffectation des anciennes décharges. La palette des affectations possibles est très large, allant d'utilisations extensives comme des parcs ou des surfaces de verdure jusqu'à la construction d'immeubles, en passant par des routes, places de stationnement ou aires d'entreposage, et des surfaces rendues à l'agriculture ou à l'horticulture. S'agissant de la construction de bâtiments, on verra fréquemment la construction d'immeubles destinés à l'artisanat ou à l'industrie. En effet, les exigences en matière de protection des utilisateurs auxquelles ils doivent satisfaire sont moins élevées que pour des habitations; ils sont en outre moins compliqués à réaliser sur le plan technique (p. ex. halles de construction légère, sans sous-sols). Reconvertir des anciennes décharges devant être assainies en sites de production d'énergie (parcs d'éoliennes, centrales photovoltaïques ou installations de valorisation du gaz émis par la décharge) est une solution judicieuse, car elle ne soumet pas le système de confinement à des contraintes trop élevées.

S'il est malgré tout prévu de construire des immeubles à plusieurs étages sur une ancienne décharge, il faudra porter une attention toute particulière aux propriétés défavorables du terrain. Les contraintes spécifiques à prendre en considérations sont exposées ci-dessous.

Exigences plus sévères en matière de réduction des émissions des gaz: on entend ici la réduction des émissions de méthane issu de la décharge, pour réduire les risques d'incendie et d'explosion, ou celle des émissions de gaz toxiques, pour réduire les menaces pour la santé. À cet effet, les mesures techniques envisageables sont les suivantes:

- > radiers des immeubles étanches aux gaz (béton dépourvu de fissures, feuilles d'étanchéité, étanchéification soignée des perforations par des tuyaux ou autres conduites),
- > systèmes de drainage passif des gaz (fossés drainants, couches drainantes, surélévation des rez des immeubles, avec aération naturelle du vide ainsi créé),
- > systèmes de dégazage actif (installations d'aspiration dans des systèmes de drainage posés autour des immeubles, installations d'aération des bâtiments, etc.),
- > installations de mesure des teneurs en polluants pour surveiller les secteurs critiques dans les bâtiments.

Exigences plus sévères en matière de portance du sous-sol: pour supporter les charges plus élevées liées aux bâtiments et pour répondre aux exigences élevées de minimisation ou de répartition uniforme des tassements dus aux ouvrages, il faut préparer le corps de la décharge en prenant, par exemple, les mesures suivantes:

- > amélioration ciblée du terrain de fondation en procédant à un compactage préventif (compactage intensif dynamique),
- > construction de structures portantes suffisantes (vibrocompactage, fondations sur pieux, etc.),

- > mise en œuvre de géotextiles permettant de répartir les charges et d'uniformiser les tassements,
- > mise en place de couches de fondation plus épaisses pour répartir les tassements.

En règle générale, les dispositifs d'étanchéité sont tous mis en place de manière identique, que la surface de la décharge soit réutilisée ou non. On peut toutefois envisager des synergies avec les constructions prévues pour une utilisation ultérieure de la décharge, par exemple:

- > mise en place d'une couche d'étanchéité bitumineuse et réutilisation de ladite couche comme surface de circulation,
- > combinaison de couches portantes sous des fondations de bâtiments ou sous des surfaces de circulation avec une évacuation des eaux de surface au-dessus de la couche d'étanchéité.

Les synergies techniques entre confinement et construction en vue de l'utilisation ultérieure de la surface entraînent aussi des synergies financières entre les coûts de confinement et les coûts de préparation du terrain en vue de sa réutilisation.

Lorsqu'on envisage de construire des bâtiments sur la surface d'une décharge, avec les excavations que ces travaux nécessitent dans le corps même de la décharge, il faut nécessairement procéder à une analyse spécifique des avantages et des risques de l'opération, en tenant compte, en particulier, des points suivants:

- > Les travaux ne doivent pas provoquer des effets indésirables sur la circulation des eaux de percolation dans les couches de l'ancienne décharge, par exemple
 - par une imperméabilisation trop élevée de la surface liée à utilisation importante de celle-ci pour des constructions, ou
 - par la pénétration ponctuelle d'eaux météoriques dans le corps de la décharge.
- > Il faut éviter d'augmenter les risques de dissémination des polluants dans les eaux souterraines, par exemple
 - par la destruction des couches d'étanchéité, p. ex. lors du battage de pieux de fondation, ou
 - par la remobilisation de polluants, qui pourrait avoir lieu lors d'opérations de compactage supplémentaires de grande envergure.
- > Il faut éviter de provoquer un dégazage intempestif, notamment
 - par la formation de nouvelles voies de dégazage verticales, par exemple le long des flancs souterrains des immeubles.

Il n'est pas possible d'énoncer des règles générales sur les possibilités de réutiliser les surfaces de décharges pour la construction, ni sur les moyens techniques à mettre en œuvre lors d'une telle opération. Chaque cas est un cas particulier, qui nécessite une analyse spécifique des avantages et inconvénients d'un tel projet. Il faudra commander à un bureau d'ingénieurs spécialisés une analyse intégrale du site, comprenant à la fois les aspects relatifs à la construction des bâtiments proprement dite et les aspects relatifs à la gestion de l'ancienne décharge.

6 > Confinement vertical

6.1 Généralités

Les buts du confinement vertical d'une décharge à assainir sont les suivants:

- > éviter que des eaux ne s'écoulent à travers le corps de la décharge, dans des secteurs où celui-ci est immergé dans la nappe phréatique;
- > prévenir les écoulements d'eaux souterraines déjà contaminées (hors de la décharge).

Les solutions techniques permettant de confiner verticalement une décharge se classent de la manière suivante:

Tab. 8 > Types de systèmes de confinement vertical

Objectif	Construction
Parois étanches	
Stopper l'écoulement des eaux souterraines à travers le corps de la décharge	Construction d'une paroi étanche verticale jusqu'au fond de l'aquifère (en aval de la décharge, suivant le cas en amont)
Systèmes actifs de captage et de traitement des eaux	
Capter les eaux contaminées en aval de la décharge	Mise en place de drains ou de puits pour capter les eaux contaminées et les diriger vers une station d'épuration
Systèmes passifs de captage et de traitement des eaux	
Traiter sur place les eaux souterraines contaminées qui s'écoulent de la décharge	Construction d'une paroi réactive perméable pour filtrer les eaux qui s'écoulent de la décharge

6.2 Choix du système de confinement vertical

Le choix du meilleur système de confinement vertical doit être réalisé sur la base des critères suivants:

- > Le degré de difficulté dans la réalisation de ces systèmes dépend de facteurs tels que perméabilité du sous-sol, morphologie de l'aquifère (p. ex. profondeur de l'aquiclude), aptitude du terrain à recevoir une paroi étanche et espace à disposition.
- > Construire une paroi étanche peut s'avérer être une opération coûteuse, mais cela permet d'économiser des frais d'exploitation (p. ex. cela réduit considérablement les opérations de captage et de traitement des eaux dans le corps de la décharge).
- > À l'opposé, les systèmes de captage et de traitement des eaux actifs ne nécessitent pas des investissements initiaux très importants, mais entraînent des coûts d'exploitation assez élevés (pompage de l'eau contaminée, exploitation d'une station d'épuration, évacuation de l'eau traitée). Pour comparer les solutions sur le plan économique, il ne faut pas oublier de tenir compte des coûts du capital et du renchérissement.
- > Les systèmes passifs, quant à eux, présentent l'avantage qu'ils ne nécessitent que peu ou pas d'entretien (p. ex. surveillance), réduisant considérablement les coûts d'exploitation.

Faisabilité technique

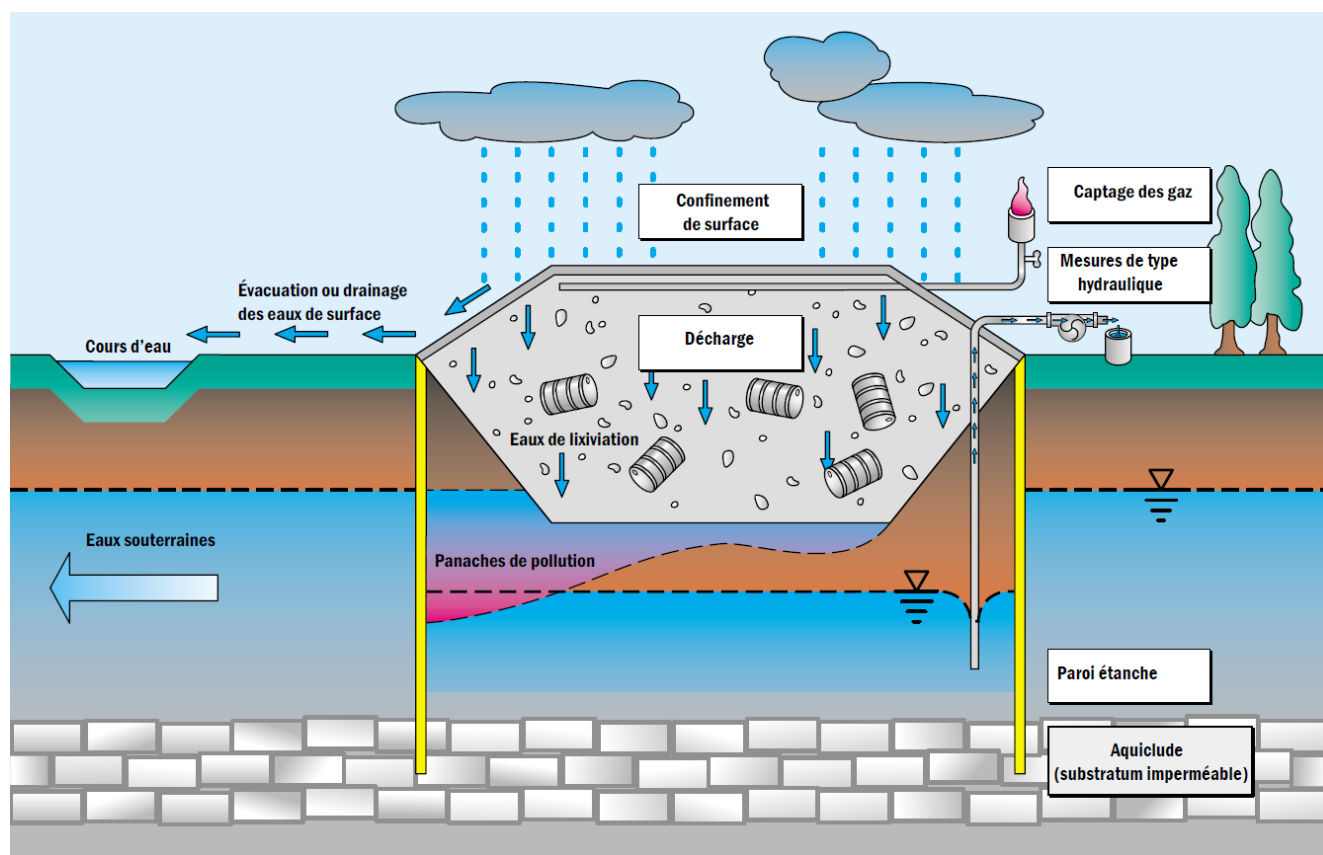
Coûts

6.3 Parois étanches

6.3.1 Exigences générales relatives aux sites confinés avec des parois étanches

Le problème le plus fréquent à résoudre, lors du confinement d'une décharge à assainir, est d'empêcher que de l'eau souterraine polluée ne s'échappe de la décharge. Il ne s'agit pas tant d'empêcher toute lixiviation – un confinement de surface peut réduire considérablement la quantité d'eau infiltrée, voire prévenir toute pénétration – mais plutôt d'empêcher que l'eau de la nappe dans laquelle «baigne» souvent le fond de la décharge ne puisse se mélanger avec le reste de l'aquifère. En effet, sans une structure de confinement verticale additionnelle, les polluants sont lessivés par contact direct entre les déchets et les eaux souterraines, risquant de se disséminer.

Fig. 14 > Principe de fonctionnement du confinement par parois étanches



Pour pouvoir bloquer les écoulements des eaux souterraines à l'aval de la décharge par des éléments de confinement verticaux (parois étanches), le site doit posséder les caractéristiques suivantes:

- > La décharge n'est pas équipée d'une étanchéité de fond en bon état qui la délimite au fond et sur les côtés.
- > Sous la décharge se trouve un aquiclude suffisamment étanche, dans lequel les extrémités inférieures des parois étanches pourront être insérées.
- > Le sous-sol de la décharge présente des caractéristiques favorables à la mise en place de parois étanches souterraines (le sol peut être battu, creusé, injecté, etc., cf. ch. 6.3.4).

6.3.2 Exigences générales relatives aux parois étanches

À leur tour, les parois étanches doivent être adaptées aux caractéristiques du site et correspondre aux objectifs de protection choisis. Elles doivent ainsi répondre aux conditions suivantes:

- > Les parois doivent pouvoir être réalisées en fonction des particularités du site (exigences liées à la technique de construction et au choix des matériaux),
- > Afin de s'assurer que la paroi présentera effectivement le degré d'étanchéité défini initialement, ses dimensions doivent être suffisamment importantes (p. ex. extension, épaisseur) et leur dimensionnement justifié.
- > Les matériaux utilisés pour la construction de la paroi souterraine doivent pouvoir résister aux agressions du milieu environnant, à celles du contexte géologique, mais surtout à celles provoquées par les polluants présents dans le sol et les eaux souterraines. À cette seule condition, la paroi pourra remplir son rôle d'étanchéité à long terme. Il est impératif de déterminer dans chaque cas particulier les sortes de matériaux à mettre en œuvre pour la construction de la paroi, en fonction des conditions rencontrées sur place. Les critères à observer sont les suivants: propriétés du terrain, caractéristiques de la nappe phréatique, nature des polluants constatés ou présumés. À cet effet, il est possible de se baser sur la recommandation GDA E 3-2 (en allemand seulement). Celle-ci définit les tests à effectuer (nature, nombre et fréquence) en vue de déterminer quels matériaux minéraux sont adaptés pour la construction de la paroi.
- > Suivant les cas, le dispositif de confinement vertical doit pouvoir être contrôlé et réparé.

6.3.3 Structure générale des étanchéités verticales

Les parois étanches devront être mises en place en prenant les mesures additionnelles suivantes:

- > le **pied de la paroi** doit être enfoncé assez profondément dans la couche de l'aquiclude (généralement >1 m) et sur une largeur suffisante pour éviter les phénomènes de refoulement. Ce faisant, il faut trouver le compromis acceptable entre l'ampleur des travaux et l'effet d'étanchéité souhaité pour l'ensemble du système.
- > L'**extrémité supérieure de la paroi étanche** doit être raccordée soigneusement avec la couverture de la décharge ou le dispositif de confinement de surface; dans ce dernier cas de figure, la jointure doit être suffisamment imperméable pour éviter la pénétration d'eaux météoriques qui s'écoulent de la surface, mais aussi assez étanche pour retenir les gaz émanant de la décharge.
- > Il s'agira de mettre en place un système d'**inversion de la circulation des flux (mesure de type hydraulique)**. En effet, une paroi latérale n'est jamais totalement imperméable, en raison de contraintes techniques. De même, la perméabilité résiduelle du confinement de surface laisse souvent présager l'accumulation d'une petite quantité d'eau souterraine. Il faut donc parfois compléter le confinement physique par un système actif de pompage des eaux, qui permet d'abaisser légèrement le niveau de la nappe à l'intérieur du volume étanchéifié (cf. ch. 6.4). Si cela se justifie,

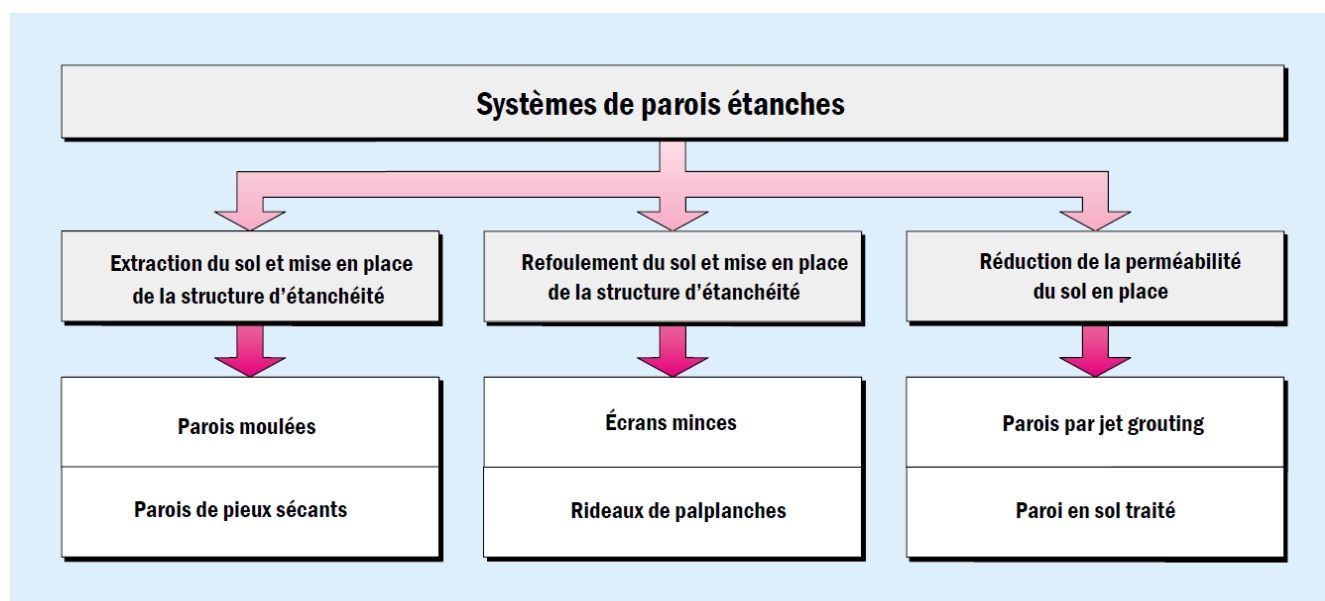
on fera descendre ce niveau jusqu'en dessous du fond de la décharge. Le gradient hydraulique ainsi créé entre l'extérieur du périmètre étanchéifié et l'intérieur permet de garantir que le flux d'eau souterraine s'écoulera toujours de l'extérieur vers l'intérieur du site contaminé (inversion du sens d'écoulement). Ce procédé empêche donc toute dispersion de polluants dans l'environnement par les eaux souterraines.

Les quantités d'eau à pomper sont généralement minimales, surtout lorsque l'on a optimisé le confinement de la surface, réduisant d'autant la quantité d'eaux météoriques infiltrées.

6.3.4 Types de parois étanches

De nombreux procédés de construction de parois étanches sont disponibles sur le marché pour confiner une décharge ou un site contaminé. Leur choix dépend notamment des propriétés géotechniques au droit du site. Les procédés les plus utilisés sont les suivants:

Fig. 15 > Types de parois étanches



Paroi moulée

Les parois de ce type prennent place dans des tranchées creusées dans le terrain à l'aide d'une pelle mécanique ou d'une foreuse. L'excavation est réalisée par tranches successives. Les parois de la tranchée sont ensuite étayées par une suspension qui remplit le trou pendant les travaux d'excavation. Une fois que la tranchée a atteint les dimensions voulues, la suspension d'étayage est remplacée par une suspension d'étanchéification qui va se durcir (procédé dit «en deux phases»); il est aussi possible de prévoir une seule suspension qui sert à la fois d'étayage et d'étanchéification (dont la prise s'opère après la mise en place; procédé dit «en une phase»). Parfois, on peut rajouter dans la suspension encore liquide un élément supplémentaire d'étanchéité (p. ex. lés en matière synthétique) qui sera pris dans la paroi (paroi composée).

Paroi de pieux sécants

Les parois de ce type sont réalisées à partir de forages tubés de gros diamètre. Une fois le forage effectué, le trou ainsi formé est rempli d'une suspension et le tubage est retiré avant la prise de la suspension. Des colonnes sont ainsi moulées dans le sol et emboîtées (sécantes) les unes dans les autres en plan.

Écran mince

Les écrans minces sont faits d'une succession de modules verticaux alignés, se recoupant en partie. Ces modules sont fabriqués au moyen d'une poutre métallique spécialement conçue, à profil en double T. Cette poutre est enfoncée verticalement dans le terrain, puis retirée. Dans le vide ainsi créé, une suspension est injectée, qui, en se durcissant, va créer un «voile» moulé, épais seulement de quelques centimètres, qui crée l'étanchéité. Il est aussi possible de mettre en place des doubles voiles, reliés entre eux par des écrans perpendiculaires, créant des sortes de chambres ou compartiments.

Rideau de palplanches

Ce genre de paroi étanche est créé en enfonçant dans le sol des profilés en acier alignés (palplanches), reliés entre eux par un système de joints à emboîtement, constituant une paroi continue enterrée. Les profilés sont introduits dans le terrain par battage, vibrofonçage ou fonçage par vérinage.

Paroi par jet grouting

Ce type de parois est fabriqué en injectant à haute pression un liant dans un trou creusé préalablement. Soit le liant va combler les pores et les fissures du sol en place, soit le sol est lui-même également mis en suspension et mélangé au liant pour constituer la paroi d'étanchéité (procédé dit du «Soilcrete»).

Paroi en sol traité (MIP ou CSM)

Les procédés MIP (soit «mixed-in-place») ou CSM (soit «cutter soil mixing») constituent une technique récente de construction de parois étanches. Celles-ci sont créées à l'aide de tarières spéciales qui creusent des trous verticaux en déstructurant la terre et en la mélangeant sur place à un coulis de liant d'étanchéification. Il en résulte des corps solides cubiques aux dimensions définies.

Une description détaillée des différents procédés de construction de parois étanches figure à l'annexe A, sous le chiffre 2. On y trouve également une liste des possibilités et des limites d'utilisation de chacun des procédés. Les propriétés de chacune des techniques énumérées, les possibilités et les limites d'utilisation sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tab. 9 > Propriétés des systèmes de parois étanches

Type de paroi étanche		Palplanches	Écran mince	Paroi moulée	Paroi de pieux	Paroi par jet grouting	Paroi MIP ou CSM
Propriétés (critères d'évaluation)							
Étanchéité	Eau	o/+ ²⁾	+ / ++ ³⁾	++	++	o ⁴⁾	+
Résistance mécanique	Stabilité	++	-	+	+	o ⁴⁾	+
	Risque de déformations	++	-	o	+	o ⁴⁾	+
	Résist. aux contraintes mécaniques	++	-	o	+	o ⁴⁾	+
Durabilité (Résistance)	Impacts biologiques	++	fonction de la composition de la paroi et non du procédé				
	Impacts chimiques	+ ¹⁾					
	Vieillessement	+					
Facilité de fabrication	Difficulté technique	moyen	haut	haut ⁵⁾	haut	moyen	moyen
	Assurance-qualité	faible	moyen	haut	moyen	haut	moyen
	Disponibilité des matériaux	++	+ / ++ (fonction de composition de la paroi)				
	Espace requis	moyen	moyen	haut	haut	faible	haut
Sécurité du système	Facilité de suivi	o	o / ++ ³⁾	o	o	-	o
	Facilité de réparation	+	o	o	o	o	o
	Points faibles	moyen	haut/moyen ³⁾	faible	faible	haut	moyen
Possibilités d'utilisation	Mise en œuvre	+	+	+	+	o	+
	Ut. ultérieure	+	-	+	+	+	+
Coûts		moyen-haut	faible	haut	moyen	moyen-haut	faible-moyen

Légende:

++ = très bon, critère pleinement satisfait, etc.

+ = bon, satisfait

o = moins bon, limité

- mauvais, pas satisfait

1) suivant le cas, revêtement nécessaire

2) avec joints étanches

3) oui, si double écran et compartimentage

4) fonction des conditions locales, non contrôlable

5) très élevé si fraisage nécessaire

6.3.5 Particularités de mise en œuvre

Pour planifier une paroi étanche, il est nécessaire de faire une reconnaissance préalable du sous-sol, sur les aspects suivants: caractéristiques géologiques et géotechniques locales, contexte hydraulique ainsi que nature et étendue des polluants présents dans le sol et les eaux souterraines. Ces études doivent être représentatives pour toute la surface de la future paroi. Elles sont plus exigeantes que les investigations entreprises habituellement sur les sites contaminés, en particulier quant au genre d'analyses à effectuer (pour déterminer p. ex. des paramètres de mécanique des sols) ou quant à l'ampleur des informations à fournir.

Reconnaissance préalable

Lorsque la pollution est très élevée dans le sol et les eaux souterraines, il faut vérifier par des essais de laboratoire que le matériau d'étanchéité pressenti est adapté (p. ex. que la prise de la suspension est possible en présence de ces polluants); les analyses de laboratoire permettent également de déterminer préalablement la durabilité du matériau en fonction des caractéristiques du site.

Si l'on ne dispose pas, pour le procédé envisagé, du recul suffisant (mise en place dans des sols présentant des caractéristiques analogues ou avec des conditions de fabrication similaires), il peut s'avérer judicieux de fabriquer sur place des parois-tests ou des compartiments-tests.

Il arrive fréquemment qu'il faille construire, avant la paroi proprement dite, une muraille de guidage facilitant ensuite le travail des engins d'excavation.

Installation du chantier

Il faut aussi installer sur le chantier une mélangeuse permettant de fabriquer la suspension minérale qui deviendra le constituant de la paroi. Un silo y sera joint, afin de stocker sur place une réserve de composants, ainsi que, le cas échéant, un bassin permettant de préparer à l'avance la suspension. Deux techniques de préparation sont possibles:

- soit on utilise un mélange sec «prêt à l'emploi» (comprenant tous les ingrédients), qu'il s'agira de diluer dans l'eau pour obtenir la suspension,
- soit le mélange adéquat est fabriqué sur place à partir des composants stockés séparément: bentonite, ciment, poudre de pierre, eau et adjuvants permettant de régler les propriétés rhéologiques. Lorsque la tranchée de la future paroi moulée doit être creusée par fraisage (à l'aide d'une foreuse), la suspension permet aussi d'évacuer par «mise en suspension» les terres disloquées par la fraise. Il est donc nécessaire de disposer, sur le chantier, d'une installation supplémentaire, à savoir un dessableur, pour séparer les terres de la suspension.

Pour assurer la qualité des suspensions au moment de leur fabrication, il faut procéder au préalable à des essais de laboratoire parfois très exigeants. Il peut alors s'avérer judicieux de monter son propre laboratoire sur le chantier.

Au contraire du système de confinement de la surface, dont la qualité peut être vérifiée directement (p. ex. par un contrôle visuel) ou au moyen d'un système de détection des fuites, la vérification de l'étanchéité des parois souterraines ne peut pas être entreprise

Assurance-qualité

par des procédés directs. Les procédés indirects de contrôle d'étanchéité comprennent les contrôles qualité liés au suivi de la construction: morphologie (verticalité) du corps de la paroi, qualité des matériaux mis en œuvre, qualité de la suspension fabriquée sur le chantier. Hormis cela, ils consistent en la mesure et la comparaison du niveau de la nappe de part et d'autre de la paroi. Dans ce dernier cas, si l'on constate une perméabilité résiduelle, il est pratiquement impossible de dire s'il s'agit d'un défaut de la paroi ou d'une perméabilité naturelle de l'aquiclude (ou de la couche de l'aquiclude dans laquelle l'extrémité de la paroi a été enfoncée). Au bout du compte, on ne peut évaluer le système de confinement avec tous ses éléments que globalement. Pour surveiller le comportement de la nappe phréatique, il faut prévoir un système de suivi suffisamment complet.

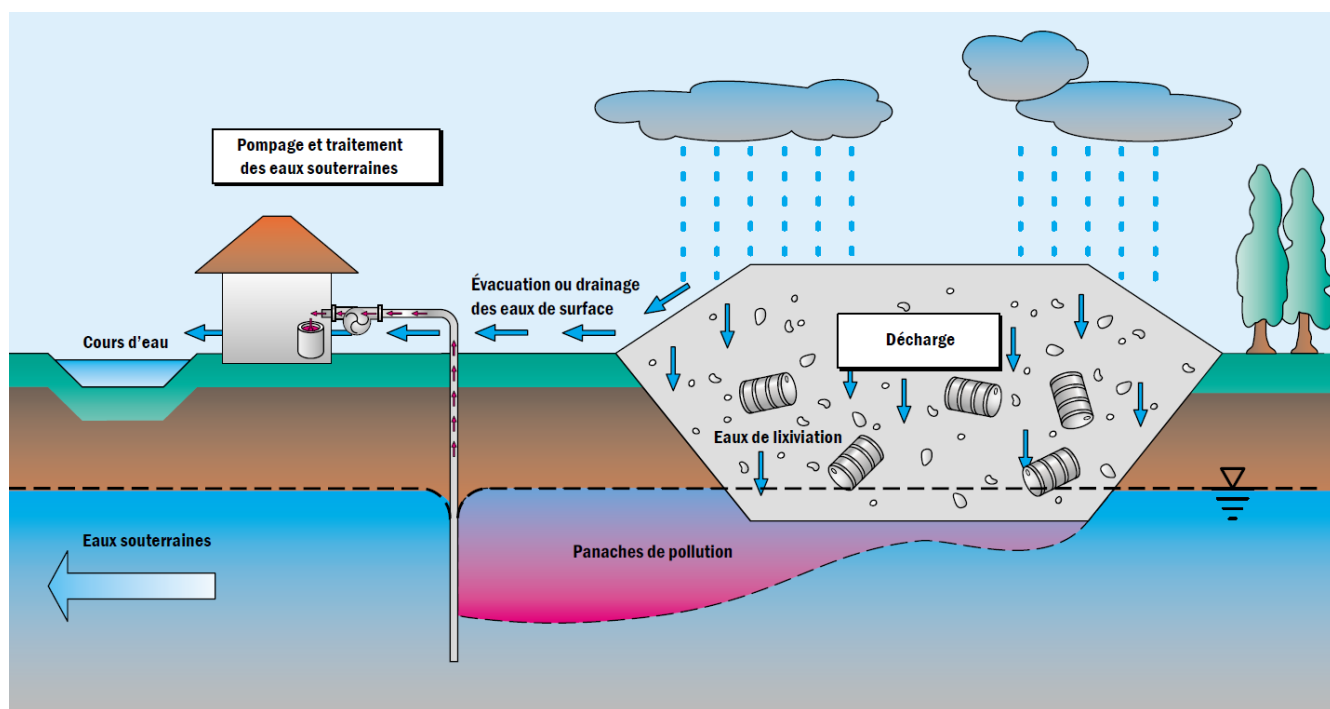
6.4 Procédés hydrauliques actifs

6.4.1 Utilisation

Le confinement d'anciennes décharges devant être assainies au moyen de procédés hydrauliques actifs constitue en général une solution de repli, lorsqu'il n'est pas possible, pour des raisons techniques ou économiques, de construire d'autres formes de confinement vertical. En effet, une telle solution n'est souvent pas supportable économiquement et n'est guère durable à long terme: l'eau polluée de la nappe doit être pompée en permanence, traitée et évacuée pendant une très longue période, entraînant des coûts très élevés.

En revanche, il peut être avantageux de mettre en place des systèmes actifs de traitement et de captage des eaux pour une durée limitée, en particulier s'il faut lutter contre un grave danger de pollution. On utilise également ces systèmes, à titre subsidiaire, pour inverser le sens d'écoulement de la nappe (inversion de la circulation des flux) lorsqu'une décharge a été confinée au moyen de parois étanches (cf. ch. 6.3.3).

Fig. 16 > Principe de fonctionnement des procédés hydrauliques actifs

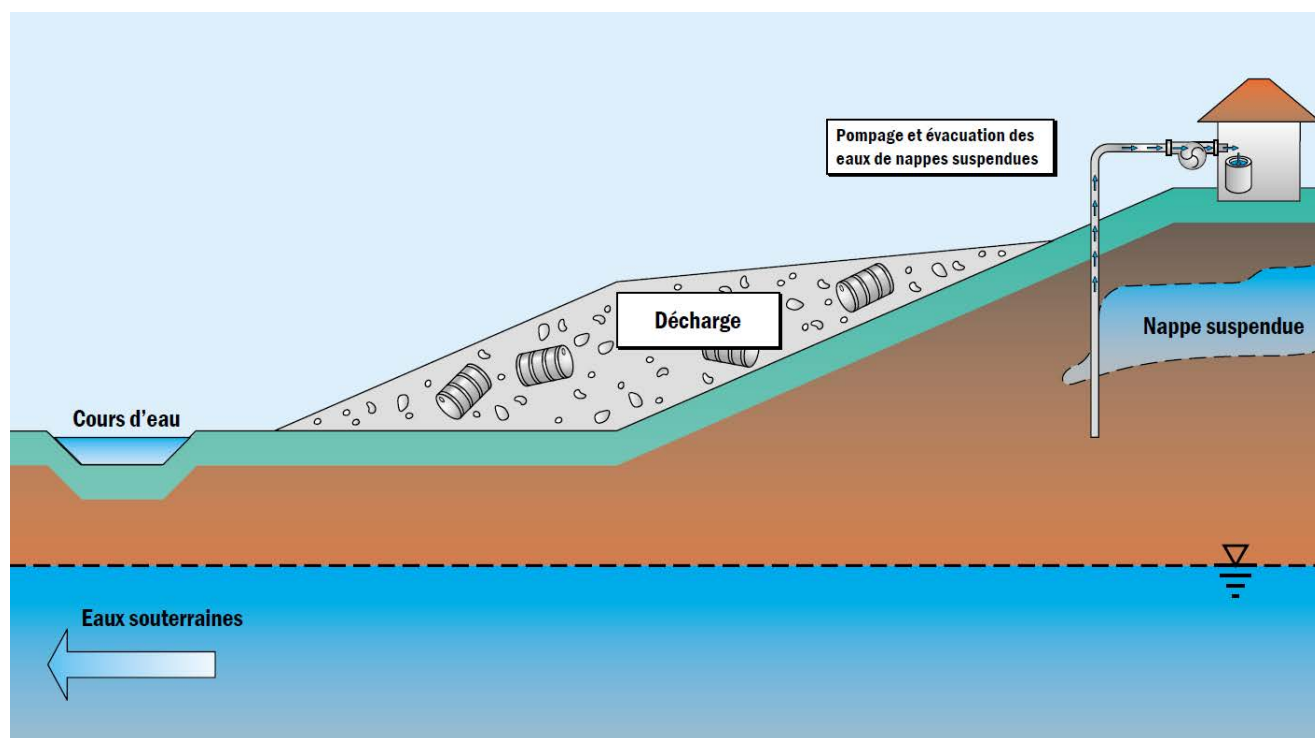


Le confinement hydraulique est réalisé de la manière suivante:

- > pompage des eaux souterraines,
- > traitement des eaux polluées pompées, et
- > élimination (évacuation dans une canalisation ou réinfiltration).

Une forme particulière de confinement actif est le drainage des eaux de nappes suspendues ou perchée. De tels systèmes sont installés à l'amont ou à l'aval d'une décharge pour capter des eaux d'infiltration ou de ruissellement s'écoulant et s'accumulant proche de la surface du terrain dans une nappe perchée (située au-dessus de la nappe phréatique principale). L'eau ainsi pompée est éliminée. Un tel système est fréquemment mis en place pour les anciennes décharges à assainir installées à flanc de coteau d'un vallon (cf. fig. 17).

Fig. 17 > Principe de fonctionnement du drainage d'eaux de nappes suspendues



6.4.2 Équipements dans les systèmes actifs de confinement hydraulique

En règle générale, les systèmes actifs de captage et de traitement des eaux requièrent les équipements suivants:

- > puits de captage ou système de drains,
- > pompes,
- > conduites,
- > station de traitement des eaux,
- > système d'élimination: réinfiltration de l'eau traitée dans le terrain, évacuation dans un exutoire, déversement dans une canalisation,
- > systèmes de mesure et de réglage.

Des informations plus détaillées figurent dans l'annexe A, sous le chiffre 2.2.

6.4.3 Dimensionnement

Il convient, pour concevoir les systèmes actifs de captage et de traitement des eaux, de distinguer les formes de dimensionnement suivantes:

Pour calibrer l'effet des systèmes hydrauliques sur la nappe phréatique, il est nécessaire de disposer de modèles mathématiques simulant son comportement (modélisation numérique), permettant de déterminer les points suivants:

Dimensionnement
hydrogéologique

- > nombre, emplacement et structure des puits de pompage,
- > quantités à pomper dans chacun des puits,
- > rayon d'action de chaque système de captage et de traitement de l'eau (diamètre du cône de rabattement, portée du pompage dans le sens d'écoulement de la nappe, largeur du courant capté à l'aval),
- > le cas échéant, nombre, emplacement et structure des puits de réinfiltration.

Les principaux éléments devant être dimensionnés sont les suivants:

- > pompes (débits, pressions),
- > conduites,
- > procédés de traitement (charge hydraulique admissible, temps de séjour dans les cuves, etc.),
- > conditions de déversement dans un cours d'eau, ou dans une canalisation,

Dimensionnement hydraulique et
technique des installations ou
procédés

6.5

Procédés hydrauliques passifs (barrières réactives perméables)

Les procédés passifs de confinement hydraulique consistent à placer dans le sol, perpendiculairement au courant de la nappe phréatique, une paroi filtrante qui permet de purifier l'eau de la nappe polluée par une décharge, en profitant des mouvements naturels de l'eau souterraine. Basées sur des phénomènes de réactivité ou d'adsorption, ces parois «purifiantes» sont faites de telle sorte qu'elles ne perturbent que de manière minimale les conditions régnant dans le corps de la nappe. Les différents systèmes de parois perméables se distinguent selon les critères suivants:

- > **mode d'action:** régulation du pH et des conditions d'oxydoréduction, précipitation, sorption, libération de nutriments, effets catalytiques,
- > **genre de matériaux réactifs:** charbon actif, fer (fer à valence zéro, limaille ou éponge de fer), zéolithes, etc.,
- > **durée de l'efficacité des matériaux réactifs:** matériaux mis en place de manière permanente (efficacité stable dans la durée) ou temporaire (efficacité limitée dans la durée) avec ou sans remplacement ultérieur par des matériaux analogues,
- > **morphologie de la paroi:** paroi traversée par les eaux souterraines sur toute sa surface, ou alors paroi à flux préférentiels (par parois étanches ou drainages pour diriger les eaux vers une zone réactive restreinte (p.ex. système dit «funnel and gate»)),
- > **technique d'exécution:** par excavation d'une tranchée ouverte, par le procédé des écrans minces, par celui des pieux sécants, par la construction de chambres.

Les parois filtrantes permettent d'adsorber, de transformer ou de dégrader des polluants organiques (BTEX, hydrocarbures chlorés, PCB, HAP) ou inorganiques (métaux lourds, radionucléides, nitrates). Pour choisir de manière appropriée le matériau de remplissage d'une paroi filtrante qui traitera sur place l'eau contaminée, il convient de prendre en compte les propriétés des polluants présents dans la nappe. Les parois réactives sont plutôt déconseillées dans les cas les plus fréquemment rencontrés de décharges contenant un large spectre de polluants.

Les barrières réactives perméables ne peuvent, en général, pas encore être considérées comme des installations répondant à l'état actuel de la technique. Malgré le fait que dans certains pays (surtout les Etats-Unis, mais également l'Autriche et l'Allemagne) elles aient déjà été mises en œuvre à grande échelle, elles doivent encore faire l'objet de recherches et être optimisées, tant sur le plan de l'exécution que sur celui de l'efficacité de traitement.

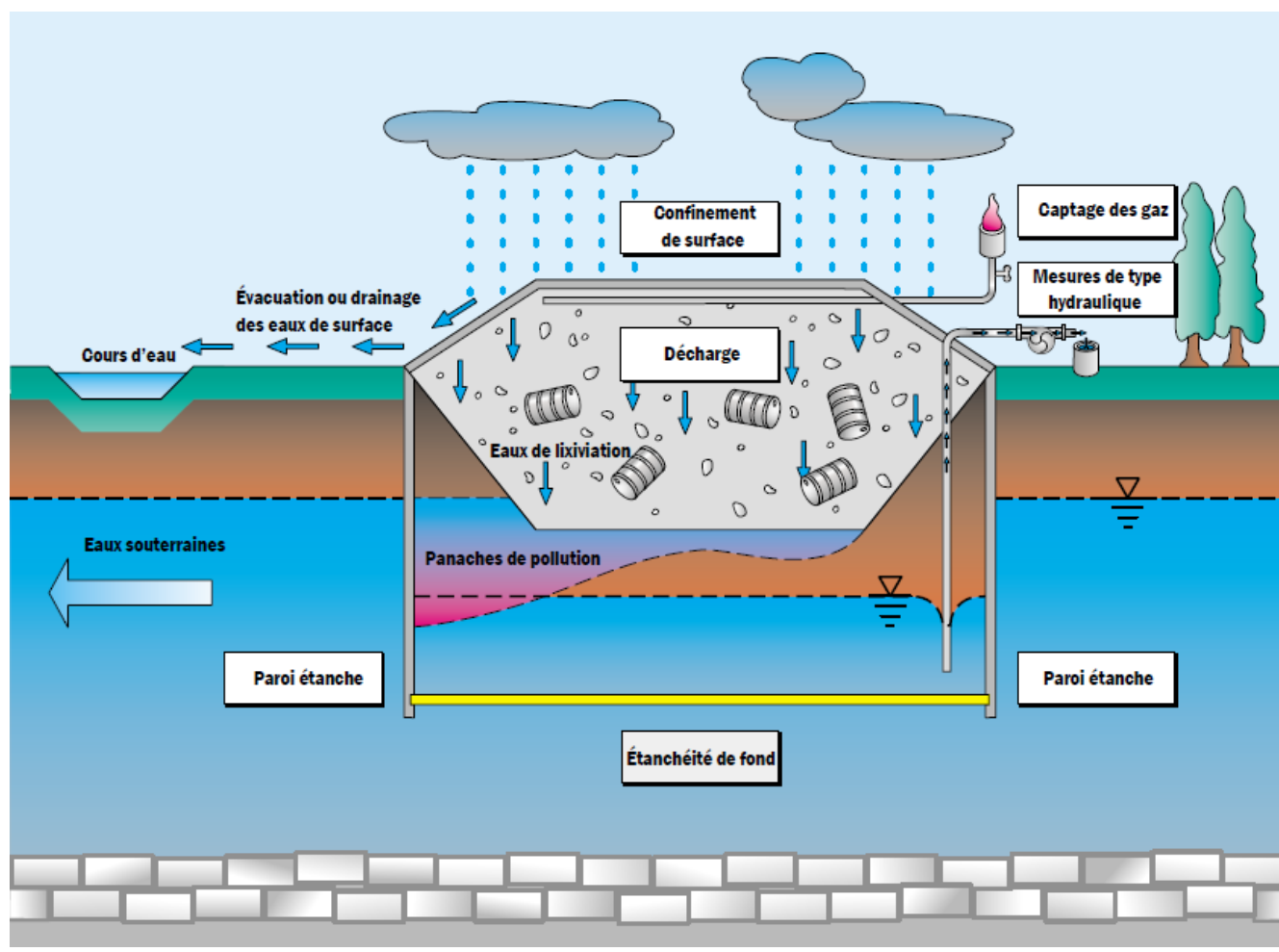
7 > Étanchéité de fond

7.1 Généralités

Contrairement aux décharges contrôlées actuelles, qui sont construites selon l'état actuel de la technique, les anciennes décharges n'ont généralement pas été dotées de fond étanche et ne se situent que rarement dans un environnement géologique suffisamment imperméable.

Diverses solutions permettent de parer à cette absence ou insuffisance de l'étanchéité de fond et au problème de la mobilisation de polluants dans les eaux souterraines. Le plus souvent, on essaie de trouver sous la décharge, à une plus ou moins grande profondeur, une couche géologique étanche qui fasse office d'étanchéité horizontale profonde (cf. ch. 3.2). Le système de confinement adéquat comprend alors une paroi étanche verticale, ceinturant la décharge et venant «se ficher» dans l'horizon géologique étanche, ainsi qu'une étanchéité de surface (cf. ch. 5).

Fig. 18 > Principe de fonctionnement d'une étanchéité de fond créée a posteriori



Si aucun horizon géologique étanche n'est décelable à une profondeur raisonnable, et si les autres stratégies de confinement ou de décontamination ne sont pas réalisables, il reste la possibilité de fabriquer, après coup, un fond étanche artificiel. Les techniques à utiliser à cet effet diffèrent sensiblement de celles appliquées aux nouvelles décharges. Dans la pratique, le procédé utilisé jusqu'à aujourd'hui est celui des semelles injectées (c.-à-d. obtenues par injection).

NB: la construction d'une étanchéité de fond a posteriori doit rester une exception absolue, à n'envisager que dans de très rares cas, où le confinement se révèle particulièrement problématique.

7.2

Types d'étanchéité de fond

En principe, les deux procédés envisageables pour étanchéifier a posteriori le fond d'une décharge sont les suivants:

Procédé par injection

Ce procédé consiste à forer verticalement des trous rapprochés dans le corps de la décharge et à y injecter horizontalement, à la profondeur de confinement prédéterminée, une masse d'étanchéification, sous forme de suspension qui durcira en place. De courtes colonnes sécantes sont ainsi créées, formant au final une surface étanche sous la décharge. Une variante de cette méthode permet, grâce à des forages horizontaux, de constituer le même voile étanche.

Procédé minier

Ce procédé consiste à creuser des galeries sous la décharge et à y placer un matériau d'étanchéité (p. ex. des lés d'étanchéité en matière synthétique). Il s'agit ensuite de relier les lés les uns aux autres de manière à créer une membrane étanche continue. Ce procédé n'a néanmoins pas encore été mis en œuvre à grande échelle, d'où un manque d'expérience par rapport à ce dernier. Une forme particulière d'étanchéification a posteriori passe par des forages inclinés croisés, ou par des parois injectées obliques, se rejoignant en profondeur et constituant une sorte de toit inversé souterrain.

En conclusion, il faut rappeler que des étanchéités de fond a posteriori sont très risquées au niveau de la qualité de l'exécution, sans compter leur prix très élevé. Ces procédés ne sont donc, en général, pas envisageables pour confiner d'anciennes décharges devant être assainies.

8 > Captage et traitement des gaz

8.1 Explications de base sur la formation des gaz

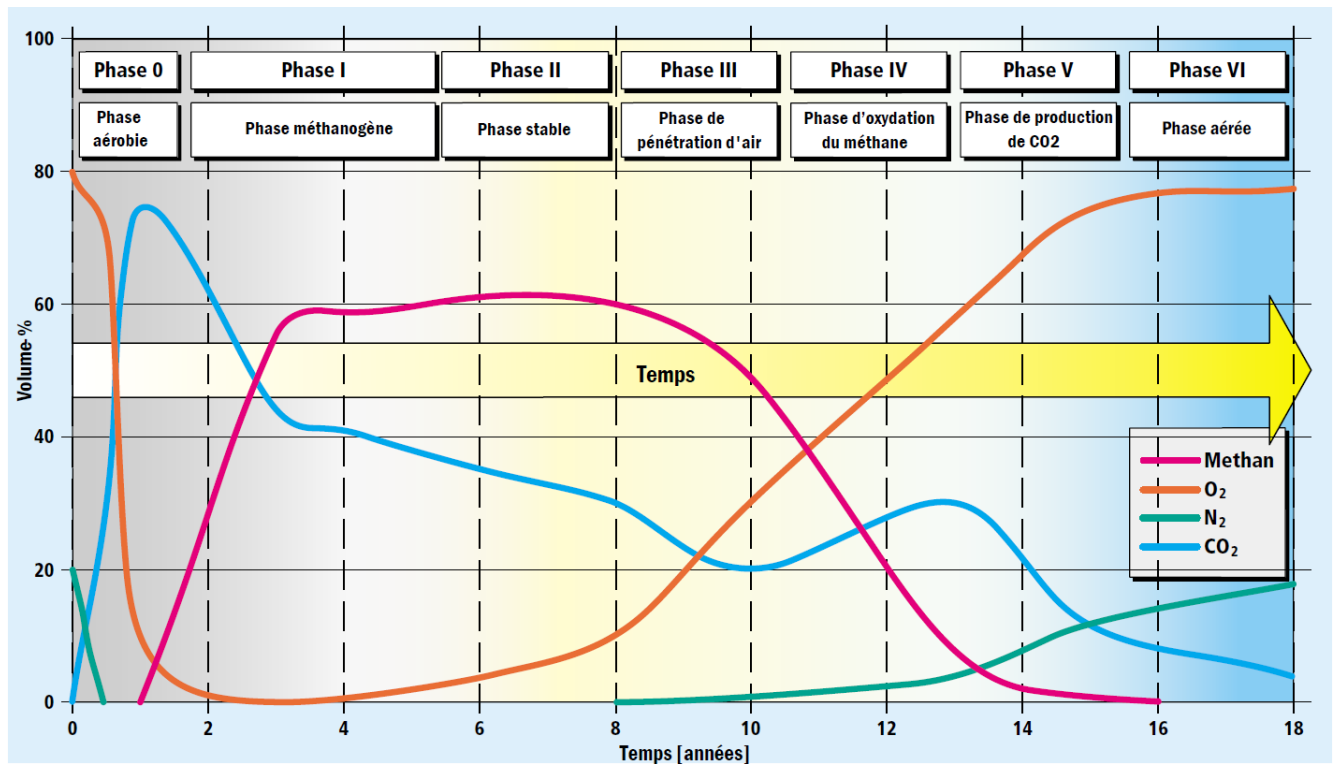
Il faut distinguer trois phénomènes qui peuvent concourir à la formation de gaz de décharge:

- > **dégradation aérobie** des matières organiques (c.-à-d. dégradation en présence d'oxygène, comme dans le processus de compostage),
- > **fermentation anaérobie** (dégradation en l'absence d'oxygène),
- > **dégagements de gaz** dus à des composés volatils issus des déchets.

Les émanations gazeuses dues aux composés volatils ne représentent pas, à elles seules, des émissions significatives. En revanche, la dégradation des matières organiques contenues dans les déchets produit du gaz. La pression positive ainsi générée dans le corps de la décharge conduit à des dégagements de gaz en surface. En plus des déchets organiques contenus dans les ordures ménagères (déchets de cuisine ou de jardin), de nombreuses autres matières organiques (contenant du carbone) produisent du gaz en se décomposant.

Composé principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), le gaz de décharge se forme en fonction des conditions régnant dans le corps de la décharge. On distingue en général les phases suivantes:

Fig. 19 > Évolution de la composition des gaz de décharge au cours des différentes phases



Évolution de la composition des gaz de décharge au cours des différentes phases La durée de chacune des phases pouvant varier fortement de décharge à décharge, les durées figurant sur le graphique ci-dessus sont données à titre d'exemple. Les phases de formation des gaz sont caractérisées par les conditions suivantes:

Tab. 10 > Phases de formation des gaz

Phase	Désignation	Remarques
0	Phase aérobie	Tant qu'il reste de l'oxygène dans le corps de la décharge, il n'y a pas de formation de méthane, parce que les matières organiques se dégradent préférentiellement de manière aérobie.
I	Phase méthanogène stable	Cette phase commence environ 1 à 3 ans à compter de la fin de l'exploitation de la décharge. On observe une forte production de gaz.
II	Phase stable	Elle se caractérise par une grande proportion de méthane dans le gaz émanant de la décharge.
III	Phase de pénétration d'air	Lorsque de l'air pénètre dans le corps de la décharge, la proportion de méthane dans les gaz de décharge chute.
IV	Phase d'oxydation du méthane	Lorsqu'encore plus d'air pénètre dans la décharge, le méthane est oxydé, produisant une teneur plus élevée en CO ₂ .
V	Phase de production de CO ₂	Cette phase se reconnaît à la proportion très élevée de CO ₂ et au taux minime de méthane dans les gaz de décharge.
VI	Phase aérée	La production de gaz est à peu près terminée. Dans l'air interstitiel du corps de la décharge règnent des conditions analogues à celles de l'atmosphère.

Dans les décharges de grand volume, des secteurs différents peuvent se trouver simultanément à des phases différentes. Cette situation se présente lorsque certaines parties supérieures de la décharge passent de la phase II à la phase III parce qu'elles ne sont pas étanches. Les phases III à VI ne concernent que les anciennes décharges qui ne sont pas dotées d'une étanchéité de surface. En effet, si la décharge est pourvue d'une couverture superficielle étanche à l'eau et au gaz, ces phases ne sont jamais atteintes.

8.2 Quantité et composition des gaz produits

Les quantités de gaz que peut effectivement produire une décharge sont liées aux paramètres suivants:

- > **potentiel de gaz théorique** (volume de gaz qu'une quantité donnée de déchets peut, dans des conditions optimales, théoriquement produire en fonction de sa composition),
- > **conditions du milieu** (présence d'oxygène),
- > **température** du corps de la décharge,
- > **taux d'humidité** régnant dans la décharge.

En situation réelle, les ordures ménagères non mélangées à d'autres déchets et entreposées dans une décharge sans avoir été prétraitées peuvent produire environ 100 Nm³ de gaz de décharge par tonne de déchets. Ces gaz peuvent se former pendant toute la période d'activité biologique.

Les quantités de gaz effectivement produites correspondent aux phases décrites dans le tableau 10, sous le chiffre 8.1. La production de gaz intervient essentiellement durant les phases I et II de l'évolution de la décharge; elle chute ensuite de manière exponen-

tielle. Dans la plupart des anciennes décharges connues devant être assainies, ces deux phases sont déjà terminées et les dégagements de gaz restants sont minimes. Cependant, il subsiste une grande part d'incertitude quant à l'évolution future de la production de gaz de ces décharges, et ce même si leur contenu a été bien étudié. Il convient donc de prévoir, lors de la mise en place d'une installation de dégazage, une réserve suffisante de capacité de traitement.

La composition des gaz de décharge évolue dans le temps en fonction des modifications du milieu dans le corps de la décharge. Ils peuvent, par exemple, présenter les caractéristiques indiquées ci-dessous, en fonction de la phase de dégradation dans laquelle se trouve la décharge:

Tab. 11 > Évolution typique de la composition des gaz au cours des différentes phases

Phase	Désignation	Composition des gaz de décharge			
		CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
0	Phase aérobie	0 %	max. 20 %	max. 21 %	max. 78 %
I	Phase méthanogène stable	55 %	44 %	Traces	Traces
II	Phase stable	60 %	40 %	Traces	Traces
III	Phase de pénétration d'air	10–40 %	5–30 %	5–15 %	10–30 %
IV	Phase d'oxydation du méthane	20 %	30 %	5 %	45 %
V	Phase de production de CO ₂	2–5 %	5–20 %	<15 %	>60 %
VI	Phase aérienne	0 %	4 %	18 %	78 %

Environ 1 % en volume des gaz de décharge est composé de sous-produits volatils émanant directement des déchets. On y trouve de l'hydrogène, de l'ammoniaque, de l'acide sulfhydrique, du mercaptan, des hydrocarbures halogénés et de poids moléculaire plus élevé, des CFC, etc. Ces gaz sont parfois toxiques ou possèdent des propriétés cancérogènes.

8.3 Dangers liés aux gaz de décharge

Les dangers que représentent les gaz de décharge peuvent être décrits de la manière suivante:

- > **risque d'explosion** (le méthane est combustible),
- > **risque d'asphyxie** (tout l'oxygène est remplacé par du CO₂, p.ex. dans des chambres ou galeries souterraines),
- > **menaces pour la santé** (gaz traces toxiques ou potentiellement cancérogènes),
- > **risque d'endommager le sol et la végétation de la remise en culture** (élévation de la température du sol, disparition de l'oxygène dans la couche de sol où sont enracinés les végétaux).

Par ailleurs, les gaz de décharge contiennent des traces d'éléments dégageant une odeur nauséabonde, et sont donc source de nuisances incommodantes.

Les gaz ne se dégagent pas seulement à la surface de la décharge; dans des sols très perméables aux gaz, ils peuvent circuler horizontalement (p.ex. par des tranchées drainantes), parfois sur de longues distances et pénétrer dans les immeubles avoisinant la décharge.

8.4 Captage et élimination des gaz

Les systèmes de captage et d'élimination des gaz se répartissent en deux catégories, à savoir les systèmes actifs et les systèmes passifs. On préférera des **systèmes passifs** pour les anciennes décharges dont les dégagements de gaz résiduels sont minimes et dont la surface n'a pas été complètement étanchéifiée (c.-à-d. qu'ils ne bloquent pas intégralement tout mouvement des flux liquides ou gazeux). On choisira en revanche des **systèmes actifs** pour les anciennes décharges encore très actives du point de vue de la production de gaz et possédant une étanchéité de surface presque entièrement imperméable aux gaz.

Dans les **systèmes passifs**, la pression propre du gaz est utilisée pour l'évacuer de la manière suivante: les gaz (méthane et gaz traces) passent par des filtres biologiquement actifs qui les traitent par oxydation, un procédé qui permet surtout de désodoriser les émanations gazeuses. Les systèmes passifs se composent des éléments suivants:

- > système de drainage des gaz horizontal: drainage par «surface», c.-à-d. par couches drainantes (cf. ch. 5.3, couche de drainage des gaz avec collecteurs) ou par «lignes», c.-à-d. par tranchées ou canalisations drainantes; système vertical de drainage des gaz: puits;
- > bouches d'évacuation de gaz (ouvertures dans la couverture de la décharge) dotées de biofiltres.

Lorsque la production de gaz est minime et qu'il manque une couche d'étanchéité, la couche de remise en culture peut remplir les fonctions d'un système passif pour traiter les gaz émanant de la décharge.

Dans les **systèmes actifs** de captage et de traitement des gaz, il est nécessaire de disposer des équipements suivants:

- > système de drainage horizontal (couches drainantes avec collecteurs [cf. ch. 5.3], tranchées ou canalisations drainantes); système vertical de drainage des gaz (puits),
- > conduites; chambres de contrôle,
- > séparateur d'eau,
- > conduites de collecte et tronçons de mesure des débits,
- > installations de pompage ou de soufflerie,

- > installations d'élimination (torchères, installations d'oxydation catalytique) ou de valorisation des gaz (moteurs à gaz pour la production d'énergie).

Un système optimal de captage des gaz est constitué d'une couche de drainage des gaz, dans laquelle sont placées des conduites de collecte (appelés aussi collecteurs). Il est également possible de construire après coup des puits de captage qui se terminent en surface, au-dessus de la couche d'étanchéité, par une cloche à gaz. Il faut toutefois ajouter que le système des puits n'est pas très efficace pour assurer le captage des gaz de manière uniforme sur toute la surface.

Éliminer les gaz de décharge à l'aide de torchères n'est possible qu'au cours des premières phases du processus de dégradation des déchets, lorsque les gaz sont riches en méthane et peuvent s'enflammer tels quels.

Pour les décharges plus anciennes, lorsque la quantité de gaz, et en particulier leur teneur en méthane, est réduite, il est encore possible de procéder à une combustion catalytique, procédé qui reste efficace même à faible teneur en méthane.

Une combustion du méthane est aussi possible dans des moteurs à gaz, qui permettent de produire de la chaleur et de l'électricité.

On trouvera dans l'annexe A, sous le chiffre 3, une description détaillée des systèmes techniques de captage et d'élimination des gaz de décharge.

Par ailleurs, il peut être utile de se référer aux dispositions de la norme SIA 203 Décharges contrôlées, en particulier à ses chapitres 2.44 et 4.5.

Lors de conception d'une installation de captage actif des gaz, les points suivants méritent d'être étudiés attentivement:

- > Dans le corps de la décharge, les gaz sont chauds et saturés d'eau. Lors de leur refroidissement p. ex. le long des conduites de captage et dans les chambres de contrôle, il se forme de l'eau de condensation (condensat). En raison de sa teneur en polluants, ce condensat doit être évacué et éliminé de manière séparée. Attention: ce dernier est extrêmement corrosif.
- > En se mélangeant à l'air, les gaz de décharge peuvent former un mélange explosif. Pour cette raison, toutes les installations de dégazage doivent être construites de manière à être étanches aux gaz (et donc à l'air) et protégées contre les risques d'explosion. Elles nécessitent en outre la mise au point d'un plan de sécurité: tous les travaux exécutés sur de telles installations sont soumis à des mesures strictes de protection des travailleurs.
- > Lors de l'élimination et de la valorisation des gaz de décharge, il faut veiller à ce que les éléments présents dans les gaz sous forme de traces ne forment pas des sous-produits de dégradation toxiques, et que les installations de valorisation ne soient pas endommagées par des composés chimiques acides (p. ex. acide chlorhydrique issu d'éléments chlorés contenus dans les gaz).

8.5

Stabilisation aérobie

La stabilisation aérobie représente une des mesures possibles pour intervenir de manière active sur les gaz de décharge. Ce procédé vise à empêcher la formation de méthane en infiltrant de l'oxygène et en favorisant la dégradation de la matière organique par la voie aérobie. Son principe est de reconstituer artificiellement les conditions de la phase aérobie (cf. ch. 8.1), voire ainsi d'accélérer l'arrivée des phases III et IV (phases de pénétration d'air et d'oxydation du méthane). Ce procédé est utilisé principalement:

- comme mesure préliminaire, en cherchant à éviter la formation de mélanges de gaz explosifs et à minimiser les dégagements d'odeurs nauséabondes lors de l'excavation des déchets, et
- pour accélérer le phénomène de dégradation des déchets et améliorer la qualité des lixiviats.

Dans les procédés de stabilisation aérobie, on cherche à apporter l'oxygène nécessaire par des voies artificielles et d'une manière aussi uniforme que possible dans tout le corps de la décharge.

Dans le procédé appelé BIOPUSTER® – marque protégée par un brevet –, l'oxygène n'est pas seulement apporté sous forme d'air, mais également par adjonction d'oxygène industriel. Des lances d'injection sont enfoncées dans le corps de la décharge, qui infiltrent de l'oxygène sous pression par impulsions. D'autres lances (lances d'aspiration) aspirent le gaz de décharge au même moment. La puissance d'aspiration étant 30 % plus élevée que la puissance d'injection de l'oxygène, il règne dans le corps de la décharge un état de dépression permanente.

9 > Captage et traitement des lixiviats

Comme la plupart des anciennes décharges ne disposent pas d'un fond étanche, les lixiviats ne peuvent, en général, pas spécialement être captés. Pour de telles décharges, les systèmes de captage et de traitement des lixiviats ne sont pas de mise. Les systèmes pouvant être envisagés sont les suivants:

- > systèmes de drainage pour les poches d'eaux stagnantes, ou puits de pompage mis en place après coup dans le corps de la décharge,
- > systèmes de captage des lixiviats, mis en place après coup à l'aval de la décharge.

Les deux variantes nécessitent l'emploi de procédés de construction analogues au confinement hydraulique (cf. ch. 6.4). Le captage des lixiviats (en aval de la décharge ou dans les poches d'eaux stagnantes) se compose des étapes suivantes:

- > captage,
- > traitement,
- > élimination.

Le **pompage dans les poches d'eaux stagnantes** peut s'effectuer à l'aide de puits construits a posteriori dans le corps de la décharge ou par un réseau de drains. Ce dernier n'est en général mis en place, pour des raisons topographiques, que dans les zones marginales de la décharge à assainir. Le choix de l'emplacement des installations de captage nécessite de très bonnes connaissances sur la circulation de l'eau dans la décharge. Il faut rappeler ici que la perméabilité peut varier grandement d'un endroit à l'autre du corps de la décharge, si bien que des zones complètement saturées d'eau peuvent se retrouver à côté de zones presque sèches, et ce à très petite échelle. Les règles habituelles de dimensionnement utilisées dans la gestion hydraulique des eaux souterraines ne s'appliquent donc aux anciennes décharges que dans une faible mesure.

La **collecte des lixiviats à l'aval** d'une décharge correspond, à peu de choses près, aux procédés hydrauliques actifs de confinement examinés au chapitre 6.4.

Soulignons ici que les lixiviats sont souvent très pollués, car ils ont été en contact direct avec les déchets. On y trouve, mis à part des substances toxiques, d'autres substances très agressives, dont il faut tenir compte pour le choix des procédés de traitement ou des techniques de construction. Il peut s'agir de quantités importantes de sels et d'agents durcisseurs, de pH aux valeurs extrêmes, de gaz dissous ou de matières dégageant une odeur nauséabonde, ou encore d'une proportion élevée de matières organiques. Les installations de collecte, de pompage et de traitement de ces eaux doivent être conçues pour résister à ce milieu hostile, c'est-à-dire plus précisément:

-
- > pour prévenir toute incrustation ou détruire les substances incrustées (les puits et les drains doivent pouvoir être contrôlés et nettoyés);
 - > pour éviter les phénomènes de corrosion (en utilisant p. ex. des matériaux résistants comme la céramique ou le PEHD);
 - > pour parer aux dangers dus à des atmosphères explosives ou toxiques (matériaux de protection contre le risque d'explosion, mesures de protection des travailleurs);

À cela s'ajoutent des problèmes de statique qui peuvent affecter les installations de captage des lixiviats construites dans le corps de la décharge, à savoir des charges verticales importantes (écrasement), des tassements différentiels (cisaillement), des frottements négatifs de l'enveloppe, etc.

Le **traitement** des lixiviats et des poches d'eaux stagnantes peut être effectué sur place, mais une telle solution n'est rentable que pour des quantités importantes de lixiviats. Il s'agit de choisir des procédés techniques particuliers, en fonction des propriétés de ces lixiviats et en fonction du système d'évacuation qui suivra.

L'**évacuation** des eaux de lixiviation peut se faire sans prétraitement (p. ex. en les transportant dans une station d'épuration extérieure au site), soit en effectuant un prétraitement. Dans ce dernier cas, les eaux sont ensuite rejetées dans une canalisation d'eaux usées (NB: il s'agit d'observer les conditions de déversement prescrites; la décharge est souvent éloignée par rapport à la canalisation la plus proche).

Par ailleurs, on se réfèrera à la norme SIA 230 Décharges contrôlées (surtout aux chapitres 2.43 et 4.4) pour concevoir, par analogie, les systèmes de captage et de traitement des lixiviats.

10 > Évacuation des eaux

Dans le cas d'anciennes décharges à assainir, on entend par évacuation des eaux les opérations suivantes:

- > évacuation directe des eaux météoriques à la surface de la décharge, au-dessus de la couche de remise en culture,
- > évacuation des eaux dans la couche de drainage, au-dessus de la couche d'étanchéité.

Pour ce faire, les aspects devant être pris en considération sont les suivants:

Le réseau superficiel du système de confinement doit être conçu de manière à permettre l'évacuation de toutes les eaux météoriques qui n'ont pas pu s'infiltrer dans la couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique. D'une part, il s'agit de prévenir l'érosion de cette dernière (par la végétalisation et, si nécessaire, par la construction de rigoles en dur); d'autre part, il s'agit de collecter l'eau qui risque de s'accumuler dans les points bas de la surface étanchéifiée de la décharge, ainsi que de permettre son évacuation (p. ex. par des fossés ouverts ceinturant la décharge). Il faut en particulier éviter que l'eau ne s'accumule en certains endroits ou que les eaux météoriques tombant sur la décharge n'affectent les parcelles voisines.

**Aménagement du réseau
d'évacuation superficiel**

Les eaux qui se sont infiltrées jusqu'à la couverture étanche de la décharge sont évacuées par des couches de drainage (cf. ch. 5.4). Les bords de ces couches doivent être conçus de manière à évacuer toutes les eaux météoriques qui auraient réussi à s'infiltrer jusqu'à la couche étanche. En particulier, il faut éviter que l'eau ne s'accumule dans la couche de drainage ou qu'elle ne reflue sous la couche d'étanchéité. Pour parer à cette éventualité, des tranchées étanches sont généralement creusées dans les bords de la couche d'étanchéité. Ces tranchées peuvent être remplies avec du gravier et être recouvertes d'une couche de remise en culture (si nécessaire, avec pose d'un drain); elles doivent en outre être raccordées à un système qui évacue les eaux hors de la décharge (canalisation d'eaux pluviales ou évacuation directe dans un exutoire).

Aménagement des drains

11 > Contrôle des résultats et suivi

11.1 Contrôle des résultats

Mené à la fin des travaux d'assainissement (confinement ou décontamination), le contrôle des résultats sert à vérifier que les objectifs d'assainissement sont bien atteints. Il est effectué plus précisément au moment de la réception définitive des mesures (constructives) (cf. fig. 1).

Dans le cadre d'un confinement, le contrôle des résultats s'attache à vérifier que les ouvrages réalisés correspondent effectivement à ce qui avait été prévu dans le projet, car l'objectif principal des mesures de confinement est de «couper» toutes les voies possibles de dissémination des polluants. L'efficacité des ouvrages sur les voies de contamination possibles (p. ex. de s'assurer de l'étanchéité des barrières aux gaz et à l'eau) doit en outre être éprouvée.

Dans le cadre d'une décontamination, ce type de contrôle sert à vérifier que les valeurs cibles concernant la teneur en polluants dans le sol et les eaux sont atteintes (s'assurer que les teneurs tolérées en polluants résiduels ne sont pas dépassées).

Ainsi, le contrôle des résultats correspond dans une large mesure au contrôle qualité des mesures d'assainissement, en particulier des mesures de décontamination.

11.2 Suivi

11.2.1 Généralités

Par suivi on entend toutes les vérifications effectuées pendant la période qui suit le contrôle des résultats. S'agissant d'une décontamination, le suivi consistera à prouver que le retrait des polluants a bien conduit à une réduction durable des dangers qui menacent les ressources à protéger. S'agissant du confinement d'une ancienne décharge, le suivi servira à vérifier dans la durée que les ouvrages et les installations fonctionnent, et qu'ils sont efficaces; opération capitale en raison du potentiel de pollution restant. En particulier, il faut surveiller les voies potentielles de contamination de l'environnement. Un suivi est instauré, car, même si tout danger est écarté aujourd'hui, il n'est pas exclu qu'un danger apparaisse à l'avenir.

La personne, ou l'organisme, assujettie à l'assainissement est tenue de présenter un plan de contrôle des résultats et de suivi qui fasse partie intégrante du projet d'assainissement. Ce plan expliquera quelles mesures d'autocontrôle l'assujetti compte prendre, et quels rapports ou justificatifs il ou elle s'engage à fournir aux autorités de surveillance compétentes.

Font partie intégrante du suivi les tâches suivantes:

- > exploitation des ouvrages à long terme,
- > préservation des ouvrages à long terme,
- > contrôle de l'état de fonctionnement des ouvrages ou installations,
- > surveillance des voies de contamination potentielles.

Sur le thème de la surveillance et du suivi des anciennes décharges à assainir ayant fait l'objet d'un confinement, nous vous renvoyons à l'aide à l'exécution intitulée «Elaboration de projets d'assainissement de sites contaminés», et plus spécialement à son chapitre 9, qui contient des informations fondamentales.

11.2.2 Exploitation des ouvrages à long terme

L'exploitation des ouvrages à long terme, dans le cadre du suivi, comprend le pilotage et la maintenance des installations mécaniques qui font partie intégrante des mesures de confinement (barrières hydrauliques, installations de dégazage, installations de captage et de traitement des lixiviats, et stations de pompage); elle inclut également l'entretien des dispositifs tels que les étanchéités de surface, les couches de couverture, les parois d'étanchéité ou les parois filtrantes.

Par entretien, on entend toutes les activités à répéter à intervalles réguliers pour maintenir les ouvrages ou installations en bon état de fonctionnement. Ces activités vont de l'inspection à la remise en état, en passant par la maintenance ou le nettoyage.

11.2.3 Préservation des ouvrages à long terme

Préserver les ouvrages, en assurer le bon fonctionnement et l'efficacité sur le long terme signifie réparer ou renouveler partiellement les ouvrages et les installations qui y sont raccordées. En d'autres termes, cela implique de prendre toutes les mesures nécessaires, en cas d'endommagement ou d'usure, pour rétablir leurs fonctions initiales. Il peut s'agir de remplacer des composants abîmés ou usés, de remplacer des installations de drainage ou de réparer des étanchéités de surface.

11.2.4 Contrôle de l'état de fonctionnement des ouvrages

Ce type de contrôle sert à vérifier que les ouvrages ou installations de confinement fonctionnent de telle manière que les objectifs d'assainissement fixés puissent être atteints.

Le contrôle de l'état de fonctionnement consiste notamment à:

- > recenser les écoulements liquides et les flux de matières sur ou au travers du système de confinement, mesurer la diffusion des gaz de décharge et leur dissémination et établir des bilans de matières;
- > vérifier les rendements de traitement des installations et en tirer des conséquences pour leur pilotage;
- > échantillonner directement les ouvrages ou parties d'ouvrages pour en mesurer les performances.

11.2.5 Surveillance des voies de contamination

Une fois les mesures d'assainissement terminées, il faut surveiller pendant longtemps leur efficacité. Il convient, à cet effet, d'observer les principales voies de contamination et les milieux à protéger, et de détecter toute anomalie ou fuite. Il faut aussi être attentif aux nouveaux dangers qui peuvent apparaître suite à l'évolution des polluants présents dans la décharge.

Mis à part les contrôles de routine ou les contrôles en continu, la surveillance peut comprendre d'autres opérations visant à garantir que les objectifs initiaux d'assainissement sont respectés. Celles-ci consistent à:

- > déterminer l'évolution du potentiel de pollution des déchets restant dans la décharge confinée;
- > décrire et évaluer l'évolution des émissions, et établir des prévisions sur leur évolution future et sur les menaces qu'elles font peser sur les milieux à protéger;
- > recenser et vérifier les paramètres du site, tels que les caractéristiques hydrogéologiques, géochimiques ou hydrochimiques, le degré d'étanchéité, la morphologie du terrain, la croissance de la végétation, les influences climatiques ou autres, et étudier l'effet des modifications observées sur les principales voies de contamination;
- > recenser et contrôler si le type d'utilisation actuelle et planifiée du sol au droit du site ou à ses abords est autorisé en fonction des modifications des conditions d'exposition (pour des sites réaffectés).

> Annexes

Annexe A: description des systèmes techniques

Annexe B: Définition des termes et des abréviations, bibliographie

Voir pdf à part: www.bafu.admin.ch/uv-0720-f