

Annexe A: description des systèmes techniques

1. Confinement de surface	2
1.1 Couches de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique	2
1.1.1 Végétalisation	2
1.1.2 Couches de remise en culture	4
1.2 Couches de drainage des eaux	7
1.2.1 Couches de drainage minérales	7
1.2.2 Matériaux de drainage artificiels	8
1.3 Couches d'étanchéité	10
1.3.1 Étanchéités minérales	10
1.3.2 Lés d'étanchéité en matière synthétique	12
1.3.3 Nattes de bentonite	14
1.3.4 Matériaux d'étanchéité enrichis de polymères	15
1.3.5 Barrières capillaires	17
1.3.6 Couches d'étanchéités bitumineuses	20
1.3.7 Mélanges minéraux enrichis de bentonite	21
1.4 Systèmes de détection des fuites	23
1.5 Couches de drainage des gaz	25
1.6 Couches d'égalisation	27
2. Confinement vertical	28
2.1 Parois étanches	28
2.1.1 Parois moulées	28
2.1.2 Parois de pieux sécants	30
2.1.3 Écrans minces	31
2.1.4 Rideaux de palplanches	33
2.1.5 Parois par jet grouting	34
2.1.6 Parois en sol traité (MIP ou CSM)	36
2.2 Captage et traitement des eaux (mesures de type hydraulique)	37
3. Captage et élimination des gaz	39
3.1 Captage et collecte des gaz de décharge	39
3.2 Traitement des gaz (élimination ou valorisation)	40

Remarque:

Les prix mentionnés pour les systèmes d'étanchéité de surface et les parois étanches ont été déterminés sur la base des données suivantes:

Étanchéité de surface:	surface:	10 000 m ²
<u>Paroi étanche:</u>	profondeur:	20 m
	longueur:	500 m
	surface:	10 000 m ²

Les prix totaux incluent toujours les services finis y compris l'assurance qualité et un montant forfaitaire pour les installations de chantier. L'enquête sur les prix datant de 2003, ils peuvent varier fortement en fonction du lieu ou de la conjoncture.

1. Confinement de surface

1.1 Couches de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique

1.1.1 Végétalisation

Fonctions	
Gestion de l'équilibre hydrique dans l'étanchéité de surface ou la couverture simple:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ faire en sorte que l'infiltration reste minimale et uniforme; ▪ permettre l'absorption des eaux d'infiltration par les racines ainsi que leur évaporation par les parties aériennes (feuilles et tiges) des plantes; ▪ permettre la rétention des eaux météoriques et leur évaporation par la végétation ('interception).
Protection contre l'érosion de la couche de remise en culture:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ permettre le développement rapide de la couverture végétale dense nécessaire; ▪ semer une culture de plantes herbacées comme couverture végétale temporaire culture qui sera remplacée avec le temps par des végétaux à croissance lente, soit spontanément, soit par plantation (p. ex. arbustes); ▪ permettre un enracinement complet de la couche de remise en culture pour offrir une protection naturelle.
Intégration dans le paysage:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ permettre la croissance d'une végétation naturelle adaptée au lieu et au paysage.
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La végétation entretenue sur la couche doit être choisie pour ses fonctions de protection technique et d'intégration visuelle de la décharge dans le site, en se fondant sur les critères suivants: <ul style="list-style-type: none"> – type et épaisseur des sols remis en culture, – résistance à l'enracinement du système d'étanchéité, – pouvoir d'évaporation des plantes (les arbres sont ceux qui contribuent le plus à réduire l'infiltration des eaux météoriques), – végétation naturelle du milieu considéré. ▪ Le sol doit être végétalisé le plus rapidement possible après sa mise en place, pour réduire le risque d'érosion et améliorer l'équilibre hydrique (il est recommandé de commencer par semer de l'herbe et de la remplacer ultérieurement par des variétés de plantes de la région adaptées au milieu considéré). 	

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pour ne pas endommager la couche d'étanchéité, la végétation à mettre en place doit généralement comporter des plantes dont les racines ne descendent pas à plus de 80 cm, et des arbres avec un enracinement superficiel à moyen. ▪ La végétation doit être adaptée aux conditions locales. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Végétalisation nécessaire pour chaque étanchéité de surface (sauf en cas d'affectation ultérieure du site rendant inutile une végétalisation ou si la couche de remise en culture est remplacée par un revêtement bitumineux ou un pavage) c.-à-d. sans succession végétale primaire. ▪ Remise en culture avec des surfaces herbeuses <ul style="list-style-type: none"> – pour assurer les travaux de réparation nécessaires dans la phase de suivi après-assainissement d'une ancienne décharge, – pour intégrer ces surfaces dans le paysage lorsque la couverture n'est que temporaire, – pour permettre un accès à la surface de la décharge, si un tel accès est requis à long terme.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En particulier en milieu urbain, la végétalisation est souvent conçue dans la perspective de créer un espace de détente ou de loisirs.
Évaluation	
<p>La végétalisation fait nécessairement partie intégrante de la remise en culture; elle vise à réduire l'infiltration de l'eau de pluie, à protéger la surface contre l'érosion et à intégrer le site de la décharge dans le paysage. Un choix avisé des plantes permet d'améliorer les effets de la transpiration et de la perte d'interception de ces dernières, contribuant à réduire l'infiltration des eaux météoriques. Il est vrai que la végétation, même optimisée, ne permet pas de retenir l'eau tout au long de l'année et de l'empêcher complètement de s'infiltrer dans la couche de terre revégétalisée. Si l'on a analysé correctement les conditions climatiques, la végétalisation permet cependant de réduire considérablement cette infiltration en moyenne annuelle. Il convient également de préciser que l'enracinement dans les couches du sol peut se révéler néfaste, si les racines pénètrent dans la couche d'étanchéité ou que de grandes quantités de canaux d'infiltration préférentiels se forment à cause des racines mortes.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 10 centimes / m² ▪ Matériaux: 50 centimes / m² ▪ Mise en place: 1 fr. 90 / m² ▪ Total: 2 fr. 50 / m² <p>Les prestations incluent le travail du sol, l'ensemencement et la fertilisation.</p>

1.1.2 Couches de remise en culture

Fonctions
<ul style="list-style-type: none">▪ Les fonctions principales du sol remis en culture sont les suivantes:<ul style="list-style-type: none">– réduire l'apport d'eaux météoriques (percolation profonde);– minimiser, voire empêcher, l'assèchement de la couche d'étanchéité;– minimiser, voire empêcher, la pénétration des racines dans la couche d'étanchéité;– protéger la couche d'étanchéité contre l'érosion et le gel.
Caractéristiques techniques
<ul style="list-style-type: none">▪ Le sol remis en culture doit atteindre souvent au moins 1 m d'épaisseur et il doit être cultivable; son épaisseur peut même atteindre 1 m 50 à 3 m selon les critères suivants:<ul style="list-style-type: none">– caractéristiques du site,– caractéristiques d'enracinement de la végétation susceptible de se développer,– affectation ultérieure prévue pour le site,– type de sol disponible (capacité de rétention en eau) ou– profondeur de gel maximale (min. 0,7 m).▪ La couche de remise en culture est structurée généralement comme suit, de haut en bas (utilisation obligatoire de matériaux non pollués et profil des sols en fonction de la végétation susceptible de croître sur le site considéré) (cf. manuel de l'OFEV « Sols et constructions »): Couche supérieure de sol (Horizon A):<ul style="list-style-type: none">– sol contenant de l'humus pour garantir un apport suffisant en nutriments et en eau,– épaisseur ≤ 30 cm (car, dans des couches épaisses, les parties riches en humus se dégradent souvent de façon anaérobique, pouvant nuire à la croissance des plantes),– réserve utile en eau (RU) ≥ 200 mm,– compacité entre 1,2 et 1,4 g / cm³ (NB: veiller à la stabilité),– bonne capacité d'infiltration permettant une absorption rapide de l'eau, afin de prévenir tout dégât lié à l'érosion.Couche sous-jacente de sol (Horizon B):<ul style="list-style-type: none">– en fonction du sol disponible, sol cultivable, adapté au site et présentant une faible teneur en humus,

- épaisseur ≥ 40 cm,
- compacité entre 1,4 et 1,6 g / cm³ (NB: veiller à la stabilité),
- perméabilité un peu plus restreinte pour prévenir toute percolation profonde rapide (mise en place compactée),
- sol adapté (c.-à-d. bonne capacité de rétention en eau permettant un enracinement optimal et un risque de retrait des argiles minime), dans l'ordre décroissant suivant: silts, sables silteux, sables limoneux, limon silteux, limon sableux.

Partie inférieure de l'horizon B (destinée à réduire l'infiltration de l'eau):

- couche plus compactée d'env. 0,2 à 0,3 m,
- matériaux cohésifs fortement pierreux ou sableux,
- compacité $> 1,8$ g / cm³,
- si l'épaisseur est < 100 cm, cette couche sert de protection contre les racines (également possibilité de mettre en place une couche présentant un saut granulométrique ou des géotextiles).

Utilisation

Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pour presque tous les systèmes d'étanchéité de surface, comme partie intégrante de la couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique, ▪ pour des couches d'épaisseurs inférieures à 2 m et pour des éléments d'étanchéité uniquement minéraux, possible seulement lorsque des mesures sont prises pour limiter la pénétration des racines en profondeur, à savoir <ul style="list-style-type: none"> – optimiser l'apport en nutriments et en eau, surtout dans la partie supérieure de la couche de remise en culture, – renforcer l'effet de barrière de la couche inférieure présentant un saut granulométrique, en évitant que la partie supérieure de la couche de drainage n'exerce un effet attractif sur les racines par la présence d'eau, – mettre en place une membrane de protection contre les racines ou un substrat freinant la croissance des racines, mais offrant une perméabilité suffisante, afin d'empêcher la formation de poches d'eaux stagnantes (p. ex. substrat très pierreux ou couche de sable fortement compactée).
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ épaisseur de la couche à déterminer en fonction de l'affectation ultérieure du site (p. ex. au min. 1,5 à 3 m pour l'horticulture, l'agriculture ou la sylviculture)

Évaluation

La couche de remise en culture revêt une importance considérable; celle-ci est d'autant plus grande dans une vision à long terme du site, notamment si l'on considère des facteurs tels que l'éventuelle diminution de l'efficacité des éléments d'étanchéité. En effet, plus les capacités de rétention et d'évaporation de la végétation et du sol sont fortes, moins l'eau pénètre jusqu'à la couche de drainage et celle d'étanchéité. À long terme, la fonction protectrice de cette couche n'est cependant efficace que si le régime des eaux est équilibré et la végétation adaptée au site considéré.

Une couverture d'un mètre d'épaisseur ne constitue souvent pas une protection suffisante pour la couche d'étanchéité. Même si une barrière capillaire est mise en place, l'épaisseur du sol de remise en culture devrait atteindre au moins 1 m 20, car si sa capacité de rétention en eau est faible (eau directement infiltrée dans le sol), il pourrait occasionner une surcharge pour la barrière capillaire et créer des fuites de celles-ci. Il se peut également que la couche de remise en culture bien conçue et soumise à un contrôle qualité permette d'abaisser le niveau des exigences posées pour les couches d'étanchéité (p. ex. concernant la durée de vie de systèmes d'étanchéité alternatifs), voire même, suivant le cas, renoncer à certains éléments d'étanchéité.

Au vu de ce qui précède, le concept de confinement devra optimiser les paramètres suivants en fonction des conditions locales: système d'étanchéité de surface prévu, spécificités du site (climat, sol, topographie, etc.), l'affectation prévue pour le site contaminé par la décharge, ainsi que structure du sol à mettre en place en fonction de cette utilisation.

Coûts

Coûts

- Les coûts dépendent des matériaux disponibles sur place.
- Installation de chantier: 1 franc / m²
- Matériaux: 18 francs / m²
- Mise en place: 22 francs / m²
- Total: 41 francs / m²

Les prestations incluent la pose de l'horizon B (0,8 m), son épierrage, le défonçage profond, l'ameublissement, la végétalisation intermédiaire, la pose de l'horizon A (0,2 m), son épierrage,, l'ameublissement superficiel, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux livrés franco chantier en mètres cubes en vrac (horizon B: 5 francs / m³; horizon A: 50 francs / m³).

1.2 Couches de drainage des eaux

1.2.1 Couches de drainage minérales

Fonctions	
<p>Les fonctions principales de la couche de drainage des eaux sont les suivantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> – évacuer assez rapidement les eaux météoriques ayant pénétré dans la couche de remise en culture et de maintien de l'équilibre hydrique, en maintenant une hauteur d'écoulement d'eau minime au-dessus des éléments d'étanchéité; – prévenir la formation de poches d'eaux stagnantes; en effet, la quantité d'eau s'infiltrant à travers une couche d'étanchéité minérale est fonction de la hauteur d'eau et de la durée de la surcharge; – assurer la stabilité de la couche de remise en culture et de maintien du régime hydrique, qui entraînerait une charge trop élevée pour cette même couche de drainage, si la capacité d'évacuation de l'eau était insuffisante; – élever le niveau de la couverture, ce qui a pour effet de mieux protéger la couche d'étanchéité (placée sous la couche de drainage) contre les intempéries et la pénétration des racines (ceci ne s'applique que pour des éléments de drainage minéraux); le saut granulométrique (par rapport à la couche de remise en culture) ainsi constitué permet de prévenir la pénétration des racines dans les éléments d'étanchéité minéraux. 	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taille des particules: 16 / 32 mm ou avec des pores de taille comparable (p. ex. 8 / 16 mm; autant que possible sans particule de granulométries inférieures ou supérieures). ▪ Types de particules: arrondies (de manière à ne pas risquer de déchirer une membrane d'étanchéité; leur surface lisse empêche le colmatage), particules anguleuses ou fines, graviers ou sables grossiers, graviers lavés, moyens ou grossiers. ▪ Pour des talus en pente plus forte: si nécessaire, prévoir du ballast pour améliorer la stabilité (grâce à la forme anguleuse des éléments). ▪ Si les conditions s'y prêtent: matériaux de recyclage dont les caractéristiques ne nuisent pas à l'environnement (test de lixiviation). ▪ Coefficient de perméabilité à long terme: $k \geq 10^{-3} \text{ m / s}$. ▪ Épaisseur de la couche $\geq 0,3 \text{ m}$; ou plus importante si cela est requis. ▪ Teneur en carbonate de calcium $< 20 \%$ du poids. 	
Utilisation	
<p>Mise en œuvre</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pour tous les systèmes d'étanchéité (sauf pour les barrières capillaires et les couches d'étanchéité bitumineuses en vue d'une réutilisation directe de la surface de la dé-

	charge)
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ possible moyennant mise en place d'une structure de sol qui convienne.
Évaluation	
<p>Les matériaux de drainage minéraux sont plus sûrs que les membranes de drainage artificielles en ce qui concerne l'évacuation de l'eau, car le volume total des pores est plus élevé. En outre, si l'on constitue un saut granulométrique par rapport à la couche de remise en culture, ils peuvent en même temps servir de barrière contre l'enracinement. La disponibilité des matériaux dépendant cependant du lieu considéré, leur utilisation n'est pas toujours économiquement supportable, en particulier si elle implique de longs transports pour parvenir à la quantité requise.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les prix varient en fonction des matériaux utilisés et de leur disponibilité. ▪ Installation de chantier: 0 francs / m² ▪ Matériaux: 19 francs / m² ▪ Mise en place: 7 francs / m² ▪ Total: 26 francs / m² <p>Les prestations incluent la pose du géotextile de séparation en-dessus, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux livrés franco chantier: 50 francs / m³ en vrac.</p>

1.2.2 Matériaux de drainage artificiels

Fonctions
Cf. chiffre 1.2.1 (matériaux de drainage minéraux)
Caractéristiques techniques
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Il s'agit de membranes de drainage géotextiles (nattes ou rouleaux), dont l'épaisseur se situe entre 1 et 4 cm. ▪ La structure de ces matériaux, qui comporte plusieurs couches résistant aux forces de cisaillement, se présente comme suit (du haut vers le bas): <ul style="list-style-type: none"> – non-tissé filtrant pour garantir le maintien de la fonction de filtration à l'interface avec le sol de remise en culture, ou pour créer le volume de vide nécessaire au drainage, – couche permettant d'évacuer les eaux météoriques s'étant infiltrées (p. ex. nattes maillées ou treillis, particules à structure grossière, toiles en monofilament, membranes à picots, flocons de mousse en PE),

<ul style="list-style-type: none"> – non-tissé filtrant pour protéger les couches sous-jacentes (p. ex. protéger les lés d'étanchéité en matière synthétique contre les atteintes mécaniques) ou pour créer une zone anti-dérapante entre les couches (stabilité au glissement). ▪ Les matériaux les plus souvent employés sont le polyéthylène, le polypropène, et parfois également le polyester. ▪ Les matériaux de recyclage ne doivent pas être utilisés. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pour des couvertures temporaires, mais en veillant à la durée d'utilisation prévue (judicieux en raison de la faible épaisseur de la structure, de l'économie de matériaux réalisée et du fort pouvoir de drainage), ▪ pour tous les systèmes d'étanchéité de surface, le cas échéant, avec une couche de drainage minérale réduite (sauf pour les barrières capillaires et les couches d'étanchéité bitumineuses prévues pour une réutilisation directe de la surface.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ possible avec la mise en place de la structure de couches qui convient.
Évaluation	
<p>Les nattes de drainage présentent plusieurs avantages par rapport aux systèmes minéraux:</p> <ul style="list-style-type: none"> – les membranes géosynthétiques ayant été fabriquées industriellement, la surveillance de la qualité est plus aisée; – la quantité volume de matériaux par unité de surface étant faible, les nattes peuvent être posées facilement et rapidement et elles présentent moins de tassements, à la longue, que les étanchéités minérales; – elles permettent d'économiser les ressources minérales naturelles; – leur poids est nettement inférieur à celui des couches de drainage minérales, elles limitent donc les transports nécessaires, réduisant l'impact environnemental; – malgré leur faible épaisseur, leur pouvoir drainant est élevé; – leur prix reste raisonnable. <p>Cependant, l'efficacité et la durabilité de certains de ces produits sont contestées. Ainsi pour les utiliser, il faut pouvoir prouver</p> <ul style="list-style-type: none"> – que la capacité de drainage est suffisante; – que l'effet filtrant de ces nattes, à la limite entre les couches, se maintiendra dans la durée; – que ces produits continueront à fonctionner de manière suffisamment efficace en cas de pénétration des racines; 	

- que les matériaux géosynthétiques auront une durabilité suffisante dans les conditions physico-chimiques du milieu rencontré au niveau de l'étanchéité de surface;
- que la résistance a été contrôlée.

Il est impératif de demander aux autorités les conditions devant être remplies pour que l'utilisation de ces matériaux soit approuvée.

Coûts

Coûts

▪ Installation de chantier:	0 franc / m ²
▪ Matériaux:	7 francs / m ²
▪ Mise en place:	1 fr. 50 / m ²
▪ Total:	8 fr. 50 / m ²

1.3 Couches d'étanchéité

1.3.1 Étanchéités minérales

Fonctions

Les fonctions principales des systèmes d'étanchéité sont les suivantes:

- empêcher l'infiltration d'eaux météoriques dans le corps de la décharge et prévenir ainsi la contamination de ces eaux;
- empêcher les gaz de décharge de s'échapper.

Les étanchéités minérales étant le support des couches de drainage et de remise en culture, elles doivent présenter l'inclinaison et la capacité portante qui conviennent.

Caractéristiques techniques

- En règle générale, une étanchéité minérale comporte deux couches et présente une épaisseur de 0,5 m ainsi qu'un coefficient de perméabilité $k \leq 5 \times 10^{-9}$ m / s avec un gradient hydraulique $i = 30$ (selon analyse de laboratoire); la perméabilité est plus élevée lorsque des fissures se forment.
- Elle se compose de granulats à granulométrie fine à mixte et d'une part d'argile > 10 % du poids.
- Jusqu'à 1:2,5 de pente, une étanchéité minérale peut être mise en place sans prendre de mesures supplémentaires.
- Constituées de matériaux minéraux uniquement, ces étanchéités présentent une très bonne durabilité à long terme; en cas d'assèchement, des fissures risquent cependant de se former.

Utilisation

Mise en œuvre

- dans une étanchéité de surface comportant un sol de remise en culture, une couche de drainage et, au-dessous

	<p>de la couche d'étanchéité minérale, une couche d'égalisation (comportant elle-même une couche de drainage des gaz si nécessaire),</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ dans une étanchéité de surface composée de plusieurs éléments, ▪ en tant que couverture temporaire, mise en place jusqu'à la fin des tassements les plus importants (possibilité d'intégration ultérieure dans le système d'étanchéité), ▪ sous forme de couverture qualifiée, dans un système de confinement de surface définitif, p. ex. avec une couche de remise en culture et de drainage des eaux.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ limitée, ▪ seulement lorsque les charges à la surface et les surcharges sont faibles, ▪ dans le domaine de la construction, seulement lorsque les tassements se sont atténués, ▪ seulement si l'on peut garantir qu'aucune conduite d'alimentation des bâtiments ne traversera la couche d'étanchéité.
Évaluation	
<p>Les couches d'étanchéité minérales doivent être protégées de l'assèchement. À cet effet, il convient de les associer à des lés d'étanchéité en matière synthétique ou des étanchéités en béton bitumineux, qui bloquent les mouvements gravitationnels de l'eau. Les entreprises de construction jouissant d'une grande expérience dans la composition de couches d'étanchéité minérales, celles-ci sont généralement de qualité. Des doutes ont cependant été émis concernant le comportement des composants à long terme (formation de fissures due au retrait des argiles en cas d'assèchement). À cet égard, il est donc d'autant plus important d'assurer la qualité des couches sises en-dessus de l'étanchéité minérale (en particulier la couche de remise en culture), facteur essentiel pour garantir le fonctionnement durable d'un système d'étanchéité de surface comportant une étanchéité minérale.</p> <p>Pour planifier la structure de l'étanchéité, on étudiera tant les moyens à disposition pour améliorer l'efficacité des étanchéités minérales (sol optimisé, couverture > 1 m 50, etc.) que d'autres systèmes d'étanchéités alternatifs (lés d'étanchéité en matière synthétique, nattes de bentonite, etc.), en particulier en tenant compte de critères comme les coûts et la disponibilité.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les prix varient en fonction des matériaux utilisés et de leur disponibilité (manque éventuel de matériaux adaptés et suffisamment homogènes). ▪ Installation de chantier: 3 francs / m² ▪ Matériaux: 17 francs / m² ▪ Mise en place: 21 francs / m²

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Total: 41 francs / m² <p>Les prestations incluent les mesures de protection contre les intempéries, l'assurance qualité, la pose du géotextile de protection en-dessus, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux livrés franco chantier: 25 francs / m³ en vrac.</p>
--	---

1.3.2 Lés d'étanchéité en matière synthétique

Fonctions	
Cf. chiffre 1.3.1 (étanchéités minérales)	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les lés admis pour les étanchéités (définitives) font $\geq 2,5$ mm d'épaisseur et se composent de PEHD (polyéthylène haute densité). ▪ Pour des couvertures temporaires, les lés non admis pour des couvertures définitives (épaisseur de 1,5 ou 2,0 mm) peuvent être utilisés. ▪ Ils présentent une surface lisse et comportent des picots sur un seul ou les deux côtés (pour prévenir tout glissement dans les talus). ▪ Ils peuvent être utilisés pour des pentes allant jusqu'à 1:3 au maximum; pour des pentes plus fortes, des mesures supplémentaires doivent être prises. ▪ Fabriqués prêts à l'emploi à l'usine, ils sont livrés sur le chantier. ▪ Leur perméabilité est pratiquement nulle: ils ne sont perméables que s'ils ont été endommagés ou n'ont pas été entièrement soudés. ▪ La durée de vie des lés testés est > 90 ans. ▪ Les lés d'étanchéité synthétiques empêchent la percolation d'eau (ils bloquent les mouvements gravitationnels de l'eau); ils préviennent donc toute dégradation biologique dans le corps de la décharge. Si l'on souhaite accélérer la production de gaz de décharge en vue de le valoriser, il est possible d'effectuer des infiltrations d'eau ciblées sous la couche d'étanchéité. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ avec une couche d'étanchéité minérale, dans une étanchéité composée, p. ex. <ul style="list-style-type: none"> – lé d'étanchéité synthétique sur une couche d'étanchéité minérale enrichie de polymères; structure de confinement: sol de remise en culture, couche de protection,

	<p>couche de drainage de l'eau, lé d'étanchéité synthétique, couche enrichie de polymères ou</p> <ul style="list-style-type: none"> - lé d'étanchéité synthétique avec barrière capillaire; structure de confinement: sol de remise en culture, couche de protection, couche de drainage des eaux, lé d'étanchéité synthétique, barrière capillaire ou après la couche de protection, barrière capillaire avec lé d'étanchéité sous la barrière; ▪ comme élément d'étanchéité unique (il convient alors de prendre les mesures qui s'imposent pour assurer durablement son efficacité), selon la structure suivante: <ul style="list-style-type: none"> - couche de remise en culture, couche de protection, couche de drainage, lé d'étanchéité synthétique ou - couche de remise en culture optimisée et lé d'étanchéité synthétique (végétation choisie de manière ciblée et sol cultivé avec capacité de rétention élevée); ▪ comme couverture temporaire (NB: ne pas utiliser un lé d'étanchéité non admis dans un système d'étanchéité définitif).
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ réutilisation de la surface possible si la structure du sol est conçue en conséquence, ▪ n'est admissible qu'en l'absence de charges ponctuelles et avec garantie qu'aucune perforation de l'étanchéité n'est possible.
Évaluation	
<p>Les lés d'étanchéité en matière synthétique ont déjà été mis en œuvre dans de nombreux systèmes d'étanchéité de surface, systèmes dans lesquels ils jouent un rôle positif. Les entreprises spécialisées jouissant d'une grande expérience dans la fabrication de ces lés d'étanchéité, le niveau de qualité de ces produits est élevé. Il s'agit par ailleurs des éléments d'étanchéité qui ont fait l'objet du plus grand nombre de recherches.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 3 francs / m² ▪ Matériaux: 17 francs / m² ▪ Mise en place: 22 francs / m² ▪ Total: 42 francs / m² <p>Les prestations incluent la pose de géotextile de protection en-dessus et en-dessous.</p>

1.3.3 Nattes de bentonite

Fonctions	
Cf. chiffre 1.3.1 (étanchéités minérales)	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les nattes de bentonite sont des membranes d'étanchéité géosynthétiques argileuses. ▪ Produits composites maillés résistant aux forces de cisaillement, elles se composent d'une couche de géotextile à laquelle on incorpore de la bentonite au sodium (env. 4,5 kg / m²) ▪ Livrées en rouleaux, les nattes ont une épaisseur de 1 à 4 cm. ▪ Elles peuvent être mise en place sous forme de deux couches simples ou de deux couches dont l'une est renforcée (c.-à-d. dont on a augmenté le grammage). ▪ Leur étanchéité à l'eau est: $k \leq 10^{-10}$ m / s. ▪ La durabilité à long terme n'a pas encore été analysée et déterminée de manière définitive. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ comme couverture temporaire, pour des anciennes décharges encore sujettes à des tassements, afin de réduire la percolation des eaux et les émissions de gaz (peut éventuellement être utilisée ultérieurement comme élément du système d'étanchéité); ▪ pour remplacer des couches d'étanchéité minérales dans des systèmes d'étanchéité de surface définitifs dans les secteurs à pente nulle d'anciennes décharges dont le danger d'émissions de polluants est limité; ▪ pour remplacer des couches d'étanchéité minérales dans des systèmes d'étanchéité de surface avec les deux conditions suivantes: <ul style="list-style-type: none"> – pose obligatoire de deux couches pour prévenir l'assèchement de la couche inférieure de bentonite, – pente max. admise = 1:3; lorsque la pente est plus forte les mesures qui s'imposent doivent être prise pour assurer la stabilité de la structure (p. ex. avec une géogrille); ▪ pour remplacer une étanchéité minérale dans une étanchéité composée; dans ce cas, il faut contrôler que les nattes sont adaptées.

Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ limitée; ▪ seulement si les charges bien réparties sont faibles et si les différences de charges d'un secteur à l'autre sont minimes, ▪ seulement si l'on peut garantir qu'aucune conduite d'alimentation des bâtiments ne traversera la couche d'étanchéité. 								
Évaluation									
<p>Le processus de vieillissement des composants géotextiles, la diminution de la résistance qui en découle ainsi que les mesures à prendre pour prévenir l'assèchement et résister aux contraintes biologiques (pénétration des racines) sont autant de questions qui doivent encore être étudiées. Puisqu'elles sont fines, les nattes de bentonite réduisent cependant les travaux de terrassement (transports). Malgré leur faible épaisseur, elles possèdent en outre un pouvoir d'étanchéité considérable ainsi que la capacité de s'autoréparer.</p>									
Coûts									
Coûts	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="padding-right: 20px;">▪ Installation de chantier:</td> <td style="text-align: right;">0 franc / m²</td> </tr> <tr> <td>▪ Matériaux:</td> <td style="text-align: right;">19 francs / m²</td> </tr> <tr> <td>▪ Mise en place:</td> <td style="text-align: right;">7 francs / m²</td> </tr> <tr> <td>▪ Total</td> <td style="text-align: right;">26 francs / m²</td> </tr> </table> <p>Natte de bentonite monocouche; les prestations incluent les mesures de protection contre les intempéries, l'assurance qualité, la pose du géotextile de séparation en-dessous et celle du géotextile de protection en-dessus.</p>	▪ Installation de chantier:	0 franc / m ²	▪ Matériaux:	19 francs / m ²	▪ Mise en place:	7 francs / m ²	▪ Total	26 francs / m ²
▪ Installation de chantier:	0 franc / m ²								
▪ Matériaux:	19 francs / m ²								
▪ Mise en place:	7 francs / m ²								
▪ Total	26 francs / m ²								

1.3.4 Matériaux d'étanchéité enrichis de polymères

Fonctions
Cf. chiffre 1.3.1 (étanchéités minérales)
Caractéristiques techniques
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protégé par un brevet, ce matériau d'étanchéité minéral est appelé « TRISOPLAST », une marque déposée; il se compose des éléments suivants: <ul style="list-style-type: none"> – sable \leq 89,1 % de la masse (afin d'assurer une certaine stabilité mécanique), – bentonite \geq 10,7 % de la masse, – polymères \geq 0,2 % de la masse (env. 10-15 % du poids rapporté à la part de bentonite), ▪ Le procédé de fabrication est le suivant: du sable et de la bentonite sont mélangés; à ce mélange est ajoutée une quantité minimale d'eau, afin de faire gonfler la bentonite et rem-

plier les pores de la structure granulaire; parallèlement à cette opération, on ajoute également un polymère conçu spécialement pour former un gel stable avec la suspension de bentonite et de calcium.

- L'épaisseur doit être déterminées suivant les performances requises: elle doit être d'au moins 7 à 10 cm (une épaisseur de 7 cm offre en principe une étanchéité suffisante; cependant, par mesure de précaution, il faut viser une couche de 15 cm (au min. 10 cm), car il n'est pas forcément possible de garantir que l'épaisseur de la couche atteindra effectivement l'épaisseur nominale durant sa mise en place).
- Pour une épaisseur de la couche < 10 cm, le système offre une imperméabilité supérieure à des couches d'étanchéité minérales traditionnelles (dont l'épaisseur est de 0,5 m.) En laboratoire, il est possible d'obtenir une perméabilité hydraulique $k < 1 \times 10^{-12}$.
- Les polymères ajoutés offrent une grande résistance par rapport à des contraintes internes ou externes entraînant un vieillissement; cependant, la durabilité de ces substances n'a pas encore été déterminée de manière définitive.

Utilisation

Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ comme couche d'étanchéité minérale dans des systèmes d'étanchéité de surface, avec mesures pour protéger la couche contre la perforation par enracinement.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ vu sa faible épaisseur, ce matériau exige d'être protégé par une couche de remise en culture répondant à des exigences plus élevées que d'ordinaire.

Évaluation

En principe, TRISOPLAST se prête bien à la fabrication d'éléments d'étanchéité minéraux dans des étanchéités de surface. Cependant, les incertitudes liées à l'épaisseur effective de la couche obtenue avec ce matériau font qu'il convient de viser une épaisseur de 10, voire 15 cm. TRISOPLAST est un produit présentant sur beaucoup d'aspects des qualités supérieures à une étanchéité faite à partir de matériaux minéraux d'origine naturelle. Ces principales qualités sont les suivantes:

- préservation des ressources, car il nécessite moins de matériaux, et ainsi moins de transports (épaisseur minimale par rapport à des couches d'étanchéité minérales),
- pose indépendante des conditions atmosphériques (intempéries),
- imperméabilité plus élevée,
- meilleures flexibilité et résistance si les teneurs en eaux sont moindres,
- capacité à s'autoréparer,
- épaisseur de la couche moindre (requiert un haut niveau de qualité lors de la mise en place).

Utiliser ce matériau s'avère particulièrement intéressant du point de vue économique, lorsqu'aucun matériel d'étanchéité naturel n'est disponible à proximité.

Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 5 francs / m² ▪ Matériaux: 20 francs / m² ▪ Mise en place: 14 francs / m² ▪ Total: 39 francs / m² <p>Couche de TRISOPLAST de 7 cm; les prestations incluent le mélange des composants, la mise en place, les mesures de protection contre les intempéries, l'assurance qualité, la pose du géotextile de séparation en-dessous, celle du géotextile de protection en-dessus et les travaux liés à l'entreposage des matériaux.</p>

1.3.5 Barrières capillaires

Fonctions
Cf. chiffre 1.3.1 (étanchéités minérales)
Caractéristiques techniques
<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'effet d'étanchéité des barrières capillaires, qui ne sont pas des systèmes qui bloquent les mouvements de convection de l'eau, provient du fait qu'elles modifient la direction du flux de l'eau de percolation, l'évacuant vers le pied du talus – il ne s'agit donc pas d'une étanchéité au sens propre du terme. ▪ Une barrière capillaire se compose de deux couches de matériaux minéraux bien séparées l'une de l'autre, et de granulométrie différente: <ul style="list-style-type: none"> – Couche capillaire supérieure: épaisseur $\geq 0,4$ m, sable fin à moyen avec $k_f \geq 10^{-4}$ m / s, p. ex. sable finement trié de 0/1 mm ou 0/2 mm, courbe granulométrique la plus forte possible ($U < 2,5$), part de éléments fins moindre (p. ex. 0,1 mm < 8 % du poids), pas d'argile gonflante. – Bloc capillaire inférieur: épaisseur $\geq 0,3$ m, sable grossier à graviers, voire gravier concassé, finement triés, avec un saut de porosité aussi grand que possible par rapport à la couche capillaire, p. ex. 0,6/4 mm ou 2/5 mm, peu altérable, résistant aux contraintes mécaniques, idéalement sans porosité intrinsèque et sans tension interne, pas de modification de la structure granulométrique du matériau mis en œuvre au cours du temps. ▪ Des géomembranes à effet de bloc capillaire ont été récemment développées. Ces membranes se composent de deux couches de géotextiles revêtues de PEHD des deux cotés entre lesquelles on insère des matériaux de bloc capillaire (granulométrie de 2/5 mm, épaisseur = 20 mm). ▪ La couche capillaire est séparée du bloc capillaire par des géotextiles, ce qui permet de stabiliser la pente de la décharge (p. ex. lors d'affaissements). ▪ Les barrières capillaires fonctionnent comme suit: l'eau qui s'infiltré dans la couche ca-

capillaire y est retenue par capillarité. L'eau s'évacue au-dessus de la limite avec le bloc capillaire non saturé à travers l'espace poreux de la couche capillaire non-saturée de façon latérale vers le pied du talus – et non pas par effet de gravité jusque dans le bloc capillaire. L'infiltration verticale à travers le bloc capillaire et donc dans le corps de la décharge est empêchée pour les raisons suivantes:

- une très rapide différence de pression à l'interface entre la couche capillaire de sables fins dont les pores sont remplis d'eau et le bloc capillaire constitué de graviers dont les pores sont essentiellement remplis d'air,
- le très faible débit d'écoulement potentiel du bloc capillaire en conditions non saturées.

- Les exigences devant être satisfaites pour garantir l'effet de « parapluie » d'une barrière capillaire (en conditions non saturées) sont les suivantes:
 - un saut granulométrique important au niveau de la couche de séparation entre la couche capillaire et le bloc capillaire,
 - une pente minimale de 1:10 (env. 5,7°); en règle générale la pente est de 1:7 (env. 8°); une pente optimale est de 1:5 (env. 11°).
- Il est vrai que plus la pente est forte, plus la capacité d'évacuation est élevée (c.-à-d. la quantité d'eau évacuée latéralement augmente); cependant, la pente doit rester limitée en fonction de la stabilité de l'ensemble du système d'étanchéité, de la nature des différents matériaux utilisés et de la technique employée pour la mise en place.
- Aucune couche additionnelle de drainage des gaz n'est requise.
- Composées exclusivement de matériaux minéraux, les barrières capillaires présentent une durabilité à long terme élevée.

Utilisation

Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ comme système d'étanchéité superficiel dans des décharges présentant un danger minime d'émissions des polluants et dont les émissions de gaz sont réduites, ▪ pour remplacer des étanchéités minérales dans des étanchéités composées (en-dessous ou en-dessus de lés d'étanchéité synthétiques = système de barrière capillaire étendu), ▪ pour remplacer une couche de drainage des eaux au-dessus du lé d'étanchéité synthétique, ▪ comme couche de contrôle des éléments d'étanchéité qui se trouvent en-dessus, ▪ en particulier pour des pentes importantes.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ limitée, ▪ la forte déclivité de telles couvertures ne permet pas d'y construire des bâtiments au-dessus.

Évaluation

L'efficacité des barrières capillaires pour limiter l'infiltration des eaux météoriques dans les systèmes d'étanchéité de surface est attestée: jusqu'à 99 % des eaux de percolation sont évacuées latéralement. Pour des raisons propres au système, les exigences élevées à satisfaire quant à la qualité de la mise en place entraînent cependant des frais importants liés au suivi du chantier. Ainsi, pour déterminer si une utilisation est judicieuse ou non, il faut toujours procéder à une évaluation au cas par cas, sur la base d'une analyse hydraulique de la situation.

Coûts

Coûts

- Les prix varient en fonction des matériaux utilisés et de leur disponibilité:

Barrière capillaire / couche capillaire (0,40 m):

- Installation de chantier: 2 francs / m²
- Matériaux: 36 francs / m²
- Mise en place: 15 francs / m²
- Total: 53 francs / m²

Les prestations incluent la pose du géotextile de séparation en dessous, celle du géotextile de protection en dessus, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux (pauvres en carbonate de calcium): 70 francs / m³ en vrac.

Barrière capillaire / bloc capillaire (0,40 m):

- Installation de chantier: 2 francs / m²
- Matériaux: 25 francs / m²
- Mise en place: 9 francs / m²
- Total: 36 francs / m²

Les prestations incluent la pose du géotextile de séparation en dessous, celle du géotextile de protection en dessus, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux (pauvres en carbonate de calcium): 70 francs / m³ en vrac.

1.3.6 Couches d'étanchéités bitumineuses

Fonctions	
Cf. chiffre 1.3.1 (étanchéités minérales)	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les couches d'étanchéité minérales se composent d'un mélange d'additifs minéraux (gravier rond ou concassé de granulométries diverses, sables, filler) et de liant bitumineux, dont la composition peut être modifiée en fonction des performances requises et des spécificités du site considéré. ▪ Une couche d'étanchéité bitumineuse se compose comme suit: <ul style="list-style-type: none"> – couche bitumineuse portante (épaisseur = 8 cm, volume des pores \leq 5,0 % du volume total), – couche bitumineuse d'étanchéité posée sur la couche portante (au moins 8 cm d'épaisseur; volume des pores \leq 3,0 % du volume total); également possible: revêtement bicouche (épaisseur minimale de 2×6 cm). ▪ L'imperméabilité est presque totale si la couche a été fabriquée dans les règles de l'art et qu'elle n'est pas endommagée. ▪ Elle présente également une excellente durabilité à long terme. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ comme élément d'étanchéité unique, en remplacement d'une couche d'étanchéité minérale, ▪ comme élément bloquant les mouvements de convection de l'eau dans une étanchéité composée, en remplacement des lés d'étanchéité synthétiques (il est envisageable, suivant les cas, lorsque les agressions d'ordre chimique sont mineures, de réduire l'épaisseur la couche d'étanchéité minérale, voire d'y renoncer, en raison de la grande durabilité de la couche bitumineuse), ▪ en remplacement partiel (ou total sous certaines conditions) de la couche d'étanchéité minérale, c.-à-d. en combinaison avec une couche minérale à épaisseur réduite.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ limitée, ▪ seulement en l'absence de charges ponctuelles, de différences de charges importantes ou de charges superficielles trop élevées, ▪ au vu de la manière dont la surface sera utilisée ultérieurement, p. ex. comme surface de circulation (exploitation de la décharge, aire de stationnement, aire d'entreposage

	provisoire, etc.): définir les performances techniques requises déjà au stade de la planification (capacité de portance, déformabilité suffisantes, etc.).
Évaluation	
Comme les lés d'étanchéité en matière synthétique, les étanchéités bitumineuses constituent un système à haut degré d'étanchéité (eaux et gaz) et bloquant les mouvements de convection. Leur solidité, la disponibilité des matériaux qui les composent, les connaissances approfondies quant à leur mise en œuvre sont autant de raisons qui en font un matériau de base idéal pour constituer une étanchéité durable. Relevons qu'il existe nombre de possibilités d'utilisation ultérieure pour des anciennes décharges étanchéifiées par une couche bitumineuse.	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 4 francs / m² ▪ Matériaux: 45 francs / m² ▪ Mise en place: 21 francs / m² ▪ Total: 70 francs / m² <p>Les prestations incluent les mesures de protection contre les intempéries et l'assurance qualité. Coûts d'une couche d'étanchéité bitumineuse avec couverture bicouche: 115 francs / m².</p>

1.3.7 Mélanges minéraux enrichis de bentonite

Fonctions
Cf. chiffre 1.3.1 (étanchéités minérales)
Caractéristiques techniques
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Il s'agit d'un mélange de particules de granulométrie mixte (p. ex. graviers sableux) et de bentonite à pouvoir de gonflement élevé (env. 3 % du poids), la part de particules fines (< 0,06 mm) dans le mélange représente au moins 20 % du poids; parmi les produits disponibles on trouve le mélange minéral DYWIDAG (« DYWIDAG-Mineralgemisch ») ou le « Bentokies » (bentogavier). ▪ Le volume des pores est très faible (environ 18 % du volume). ▪ Une perméabilité à l'eau $\leq 5 \times 10^{-9}$ m / s peut être atteinte. ▪ L'épaisseur de la couche est ≥ 30 cm; celle-ci est mise en place en deux fois. ▪ Composés uniquement de matériaux minéraux, ces produits offrent une durabilité à long terme optimale; ils présentent cependant le risque que des fissures se forment en cas d'assèchement.

Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ si aucun matériau fin n'est disponible à proximité, ▪ comme étanchéité minérale bicouche dans des systèmes d'étanchéité de surface (procéder à une évaluation au cas par cas, le cas échéant, utilisation avec une épaisseur réduite) (cf. tab. 3, type II), ▪ comme composant minéral (bicouche) dans des systèmes d'étanchéité de surface avec étanchéité composée.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ comme pour les étanchéités minérales.
Évaluation	
<p>Les mélanges minéraux enrichis de bentonite présentent d'excellentes propriétés techniques, mais les coûts de fabrication sont relativement élevés. Cependant, en utilisant un malaxeur, l'étanchéité obtenue avec le Bentokies a une composition fiable et stable; elle est également facile à contrôler. Les étanchéités faites avec du Bentokies ont fait leur preuve sur beaucoup de plans, notamment en ce qui concerne leur fabrication et leurs performances géotechniques. Une expérience suffisante existe concernant la formule du mélange, la technique de mise en place et l'assurance qualité.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les prix varient fortement en fonction des matériaux utilisés et de leur disponibilité (qui est meilleure que pour les matériaux utilisés pour les étanchéités minérales). ▪ Installation de chantier: 6 francs / m² ▪ Matériaux: 16 francs / m² ▪ Mise en place: 45 francs / m² ▪ Total: 67 francs / m² <p>Les prestations incluent la préparation des matériaux de base, le mélange à base de poussière d'argile, la mise en place, les mesures de protection contre les intempéries, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux: 5 francs / m³ en vrac (on peut se contenter d'une qualité inférieure que pour une étanchéité minérale).</p>

1.4 Systèmes de détection des fuites

Fonctions	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ surveiller à long terme l'étanchéité des systèmes d'étanchéité de surface bloquant les flux d'eau (les systèmes de détection n'ont été jusqu'ici utilisés qu'en association avec des lés d'étanchéité en matière synthétique); ▪ détecter et localiser à temps les fuites; ▪ permettre des réparations ciblées. 	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Principes de fonctionnement: ces systèmes détectent les fuites en mesurant la résistivité électrique, l'humidité et la température et en calculant de la constante diélectrique. ▪ Les expériences faites dans le domaine des décharges concernent essentiellement les systèmes dotés de capteurs pour mesurer la résistivité électrique ou le potentiel électrique. ▪ Principes de mesure: les couches dotées d'électrodes ou de capteurs au-dessus et au-dessous du lé d'étanchéité synthétique possèdent une conductivité intrinsèque. La création d'une tension électrique sur la couche au-dessus de la géomembrane conduit à l'instauration de champs électriques mesurables. En cas de fuite, l'effet isolant du lé s'amenuise, c.-à-d. que du courant passe de la couche supérieure à celle inférieure, créant une anomalie locale dans le potentiel électrique, détectée par les électrodes ou capteurs installés au-dessous du lé. Des unités de détection adéquatement situées permettent de localiser précisément la fuite et d'en déterminer l'ampleur, en fonction des variations de tension relevées (p. ex. GEOLOGGER ou SENSOR). ▪ Pour certaines versions nouvelles du système, il suffit que les électrodes soient placées d'un seul côté; c'est pourquoi le dispositif d'électrodes (électrodes linéaires) doit, suivant les conditions locales, être placé juste sur la couche d'étanchéité, immédiatement sous l'étanchéité, ou encore sur la couche de remblais nivelé grossière (p. ex. GEOLOGGER). ▪ D'autres systèmes destinés à contrôler l'étanchéité des éléments minéraux sont en cours de développement (p. ex. systèmes pour déterminer la distribution de la température ou de l'humidité par fibres optiques). 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pour des déchets particulièrement problématiques (décharges pour déchets spéciaux), car un contrôle partiel de l'étanchéité de surface est requis; ▪ comme système d'étanchéité dont on peut contrôler l'efficacité (lé d'étanchéité synthétique + système de mesure), ▪ pour faire d'une étanchéité provisoire une étanchéité définitive (mettre en place un tel système permet, une fois

	<p>que les tassements ont diminué, de garder définitivement une étanchéité mise en place à titre provisoire – ce pour peu que la preuve de son efficacité ait été faite),</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ comme mesure d' « auto-contrôle » dans des anciennes décharges à assainir, ▪ comme moyen de contrôle et de confinement supplémentaire pour des sites dont les exigences à satisfaire en matière de sécurité sont élevés, ▪ pour surveiller des étanchéités composées, comme système de contrôle des étanchéités bloquant l'écoulement gravitationnel de l'eau.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ aucune restriction.
Évaluation	
<p>En général, contrôler les systèmes d'étanchéité de surface consiste à observer et documenter les quantités de lixiviats, à mesurer les émissions de gaz à la surface, ainsi qu'à surveiller les tassements et déformations de ces systèmes en installant les outils de mesure à cet effet. Les systèmes de capteurs électroniques sont les seuls qui permettent de contrôler directement (détection immédiate et localisation précise) l'efficacité d'un système d'étanchéité.</p> <p>Par rapport aux étanchéités composées, conçues comme redondantes dans un souci de double-sécurité (à savoir qu'en cas de défaillance d'un des éléments d'étanchéité, l'autre continue à assurer une étanchéité suffisante), un système de détection des fuites garantit, durant toute la période de suivi, une surveillance durable des éléments d'étanchéité; il permet ainsi de détecter à temps tout endommagement et d'effectuer des réparations ciblées.</p> <p>La solution consistant à utiliser une géomembrane synthétique munie d'un dispositif de surveillance rencontre un certain succès dans les milieux concernés: relativement bon marché, elle laisse augurer son adoption future pour l'étanchéification définitive de décharges. Aucune expérience durable n'a cependant encore été conduite avec ce type de dispositif, p. ex. pour toute la durée de la phase de suivi. Ainsi, seul un contrôle plus ou moins continu et durable de la toute la surface peut garantir un niveau de sécurité plus élevé permettant p. ex. de renoncer aux éléments minéraux dans une étanchéité composée. Pour cette raison, il n'a pas été admis jusqu'ici qu'un système de détection des fuites puisse remplacer des éléments d'étanchéité en assurant le même niveau de sécurité.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Système mis en place: 15 francs / m²

1.5 Couches de drainage des gaz

Fonctions	
<p>La couche de drainage des gaz a les fonctions suivantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> – capter à la surface les gaz émis dans le corps de la décharge (gaz de décharge, gaz traces toxiques), etc. – les conduire dans les systèmes de captage des gaz ponctuels ou linéaires. 	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les composants de cette couche peuvent être les suivants: graviers concassés, verre pilé, ballast ou graviers, homogènes et compactables. ▪ La couche de drainage des gaz (ou de dégazage) doit être mise en place sous la couche d'étanchéité, lorsque le captage et l'évacuation des gaz ne peut être réalisé par la couche d'égalisation. ▪ Son épaisseur est $\geq 0,3$ m. ▪ La teneur en carbonate de calcium se monte à 10 % en poids au maximum. ▪ Dans le cas des anciennes décharges à assainir, il peut s'avérer judicieux de placer des collecteurs dans cette couche également. ▪ Composée de matériaux minéraux uniquement, la couche de drainage des gaz présente une durabilité à long terme. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ lorsqu'il est nécessaire de capter et évacuer les gaz de décharge, ▪ suivant le cas, pour surveiller d'éventuelles fuites dans le système d'étanchéité.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ aucune restriction.
Évaluation	
<p>La couche de drainage des gaz sert à capter et à évacuer les gaz produits dans le corps de la décharge; elle peut par ailleurs également être utilisée en vue de contrôler l'étanchéité de la surface. Pour faciliter la localisation d'éventuelles fuites, le système de drainage devrait être subdivisé en unités distinctes.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les prix varient en fonction des matériaux utilisés et de leur disponibilité.

	<ul style="list-style-type: none">▪ Installation de chantier: 1 franc / m²▪ Matériaux: 22 francs / m²▪ Mise en place: 9 francs / m²▪ Total: 32 francs / m² <p>Les prestations incluent la pose du géotextile de séparation en dessous, l'égalisation de la surface en dessus, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux (pauvres en carbonate de calcium): 60 francs / m³ en vrac.</p>
--	--

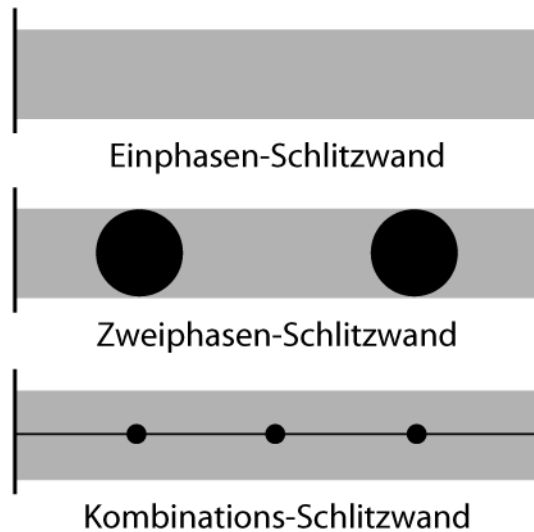
1.6 Couches d'égalisation

Fonctions	
<p>La couche d'égalisation vise à profiler la surface du corps des déchets si elle est inégale; servant aussi de couche de fondation, sa capacité portante doit permettre la mise place du dispositif d'étanchéité technique.</p>	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les composants de cette couche peuvent être les suivants: graviers concassés, ballast ou graviers, homogènes et compactables. ▪ Son épaisseur est de 0,5 m. ▪ En règle générale, cette couche doit être composée de matériaux perméables aux gaz. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ comme partie intégrante et obligatoire du système de confinement de surface, ▪ comme couche d'égalisation et de drainage des gaz simultanément; le cas échéant, il convient de considérer si des conduites d'évacuation supplémentaires et un système de dégazage actif sont requis.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ aucune restriction.
Évaluation	
<p>On ne peut renoncer à une couche d'égalisation que si la surface de la décharge présente une capacité portante suffisante pour supporter le dispositif de confinement prévu. La couche d'égalisation doit être composée de façon à ne pas nuire au fonctionnement des couches placées au-dessus.</p>	
Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les prix varient en fonction des matériaux utilisés et de leur disponibilité. ▪ Installation de chantier: 1 franc / m² ▪ Matériaux: 18 francs / m² ▪ Mise en place: 22 francs / m² ▪ Total: 41 francs / m² <p>Les prestations incluent le réglage de la partie supérieure du remblais nivelé, les travaux liés à l'entreposage des matériaux et les coûts des matériaux: 15 francs / m³ en vrac.</p>

2. Confinement vertical

2.1 Parois étanches

2.1.1 Parois moulées



Fonctions

- étanchéifier latéralement l'ancienne décharge à assainir avec un coulis de béton ou de bentonite.

Caractéristiques techniques

- La mise en place de parois moulées procède par excavation du sol. Pour excaver, un **grappin** ou une **fraise pour parois moulées** peuvent être utilisés. Jusqu'à 13 m de profondeur, on pourra employer une pelle mécanique à godet.
- Si un grappin ou une fraise sont utilisés, il convient d'installer une murette-guide servant à diriger les éléments à mettre en place dans un fossé que l'on aura creusé au préalable.
- Pour assurer la stabilité de la tranchée, on pourra employer un coulis (suspension de bentonite ou de ciment). Dans le **procédé en une phase**, le coulis sert de matériau d'étanchéité définitif; il reste dans la tranchée et durcit lentement. Dans le **procédé en deux phases (méthode par trémie)**, le coulis (suspension de bentonite) est au contraire ultérieurement remplacé par un matériau étanche.
- La mise en place de la paroi se fait par « pianotage », c.-à-d. en alternant et emboîtant les panneaux primaires (à numérotation impaire) et les panneaux secondaires (à numérotation paire).
- Les panneaux doivent se « chevaucher » sur au moins deux tiers de l'épaisseur de la paroi moulée. La grandeur de l'emboîtement dans la couche étanche sous-jacente doit être déterminée de cas en cas, en fonction des caractéristiques du sous-sol; cet emboîtement doit cependant toujours être d'au moins 1 m 50 de profondeur.
- Suivant les outils ou techniques utilisés, on obtiendra différentes épaisseurs et profondeurs pour les parois mises en place. Habituellement, l'épaisseur des parois se situe, pour tous les procédés, entre 400-1000 mm; quant à la profondeur, elle peut atteindre env. 30 m pour les parois moulées selon le procédé en une phase ou les parois composées, ou env. 100 m pour les parois moulées selon le procédé en deux phases.

La mise en place de profilés en acier (palplanches) ou de lés d'étanchéité synthétiques

dans la suspension n'ayant pas encore pris permet d'obtenir des parois étanches particulièrement solides, résistantes à long terme et très peu perméables.

Utilisation

Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ seulement si les charges statiques sont limitées (les parois moulées n'en supportent que peu), ▪ possible pour un large éventail de sols différents (les parois moulées avec une fraise peuvent même être mises en place, sous certaines conditions, dans la roche cohérente).
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ la circulation de véhicules sur leur couronnement doit être évitée, à moins qu'une protection spéciale ne soit mise en place, ▪ si on le prévoit d'avance, une telle paroi peut être intégrée dans un ouvrage construit ultérieurement (p. ex. comme mur de cave).

Évaluation

Dans le domaine des sites contaminés, les parois moulées représentent le type d'étanchéité verticale le plus utilisé. Leur mise en place peut être adaptée aux polluants présents dans le sol et les processus de fabrication peuvent être aisément contrôlés. Grâce à ce double avantage les parois moulées présentent un pouvoir élevé d'étanchéité et d'interruption des flux de polluants.

Coûts

Coûts	<p><u>Murette-guide (béton, des deux côtés):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 1 franc / m² ▪ Matériaux: 12 francs / m² ▪ Mise en place: 12 francs / m² ▪ Total: 25 francs / m²
	<p><u>Paroi réalisée avec grappin (procédé en une phase, 80 cm):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 10 francs / m² ▪ Matériaux: 140 francs / m² ▪ Mise en place: 180 francs / m² ▪ Total: 330 francs / m²
	<p><u>Paroi réalisée avec fraise (procédé en une phase, 80 cm):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 20 francs / m² ▪ Matériaux: 150 francs / m² ▪ Mise en place: 250 francs / m² ▪ Total: 420 francs / m²
	<p><u>Supplément pour le procédé en deux phase:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Total: 120 francs / m²

2.1.2 Parois de pieux sécants



Fonctions	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ étanchéfier latéralement la décharge contaminée avec un coulis de béton ou de bentonite. 	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> • Ce type de parois se compose de pieux de béton coulé sur place et sécants, c'est à dire qui s'emboîtent les uns dans les autres. Les pieux primaires (à numérotation impaire) sont insérés en premier dans le terrain, puis ceux secondaires (à numérotation paire) sont mis en place. Le creusage des pieux secondaires « mord » sur les pieux primaires déjà en place, ce qui permet d'imbriquer tous les pieux les uns dans les autres et d'assurer ainsi l'étanchéité globale de la paroi. • Le type de sol en place détermine quel outil devrait être utilisé pour forer le sol et excaver les matériaux (p. ex. grappins rotatifs, seaux de forage, tarières, grappins sur une pelle à câbles). • Pour étayer la paroi du trou foré, on insère en général des tuyaux (tubage); une alternative consiste à couler une suspension dans le trou en formation. • Lors du processus de perçage (pression et rotation simultanés), les tuyaux (tubage) sont enfoncés « en avance » avant l'excavation des matériaux. • Il est possible d'atteindre une profondeur allant jusqu'à 40 m et un diamètre jusqu'à 2 m pour les trous forés (diamètre des pieux = épaisseur finale de la paroi). • Les outils de forage et l'installation pour la pose des tuyaux ne créent guère de vibrations. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ avec du béton coulé sur place, de grandes charges statiques peuvent être supportées (une exécution avec des armatures est possible), ▪ mise en place possible dans un large éventail de sols différents.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ si on le prévoit d'avance, une telle paroi peut être intégrée dans un ouvrage construit ultérieurement (p. ex. comme mur de cave)
Évaluation	
<p>La mise en place de parois de pieux sécants constitue une technique standard pour des fouilles. Cette technique est moins souvent utilisée dans le cadre d'assainissement de sites contaminés, car un confinement ne requiert en général pas de parois si épaisses.</p>	

Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 8 francs / m² ▪ Matériaux: 120 francs / m² ▪ Mise en place: 152 francs / m² ▪ Total: 280 francs / m² <p>Paroi de pieux sécants de 80 cm d'épaisseur; mise en place avec tubages</p>

2.1.3 Écrans minces



Fonctions
<ul style="list-style-type: none"> ▪ étanchéfier latéralement la décharge contaminée avec une suspension minérale.
Caractéristiques techniques
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La mise en place d'écrans minces se fait par refoulement du sol. Des profilés (profilés en acier en double T) sont enfoncés par battage ou par vibrofonçage. ▪ La hauteur des écrans se situe entre 500 et 1000 mm. ▪ Sur le bout renforcé du profilé se trouvent des buses, par lesquelles on injecte la suspension d'étanchéité pendant que les profilés sont retirés du sol. Le vide créé par le refoulement du sol est ainsi rempli de suspension. ▪ La largeur nominale pour les écrans d'étanchéité se situe généralement entre 80 et 100 mm d'épaisseur (150 mm au maximum). Pour obtenir une paroi étanche continue, il faut que les modules de parois se superposent sur 10 à 50 % de la hauteur du profilé. ▪ La profondeur maximale atteignable est d'env. 30 m; elle dépend cependant fortement du type de sol considéré. ▪ L'épaisseur des écrans minces se situent à peu près entre 8 et 20 cm au maximum. ▪ Mettre en place une paroi fine est possible quasiment sans excaver de matériaux terreux. ▪ Comme masse de remplissage pour ce type de parois on utilise le plus souvent une suspension de bentonite et de ciment à laquelle on ajoute de la poudre de pierre. Les écrans minces ne présentant, par rapport aux autres parois d'étanchéité, qu'une faible épaisseur, la suspension doit offrir les performances suivantes: forte densité, prise rapide et perméabilité minime. ▪ Suivant sa composition, la géométrie des pores et la largeur des canaux, la masse d'étanchéification peut pénétrer dans les matériaux environnants du sous-sol et les

étanchéifier considérablement.

- Les écrans minces se construisent rapidement.
- L'installation de deux écrans minces parallèles comportant des chambres séparées par des parois transversales, permet d'obtenir une structure avec une sécurité double; l'étanchéité de l'écran peut être contrôlée par des essais de pompage dans les chambres.

Utilisation

Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ seulement si les différences de pression hydraulique sont faibles entre les deux côtés de l'écran, ▪ seulement en l'absence de charges statiques (qui ne peuvent pas être supportées), ▪ si le sol destiné à recevoir les parois peut être percé par battage ou vibrofonçage, ▪ en raison de son temps de construction restreint, méthode particulièrement bien adaptée lorsque des mesures urgentes de confinement doivent être prises.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pas de charges statiques: la circulation de véhicules sur leur couronnement doit être évitée, à moins qu'une protection spéciale ne soit mise en place.

Évaluation

Parmi les étanchéités verticales, les écrans minces coûtent relativement peu cher. Aussi ils sont souvent utilisés dans le cadre de l'assainissement de sites contaminés. Même une structure à deux écrans d'étanchéité peut s'avérer moins onéreuse que d'autres parois telles que les parois moulées (cf. 2.1.1); cette structure à double écran présente en outre l'avantage que l'on peut directement contrôler l'étanchéité du système.

Coûts

Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 3 francs / m² ▪ Matériaux: 17 francs / m² ▪ Mise en place: 50 francs / m² ▪ Total: 70 francs / m² <p>Écran mince de 8 cm d'épaisseur</p>
--------------	---

2.1.4 Rideaux de palplanches



Fonctions	
Etanchéifier latéralement l'ancienne décharge à assainir, par des profilés en acier.	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> • Ces parois se composent de palplanches (profilés en acier) alignées et liées les unes aux autres par un système de joints à emboîtement. • Les palplanches sont enfoncées verticalement dans le sol selon divers procédés (battage, fonçage par vérinage, vibrofonçage). • La profondeur pouvant être atteinte est d'env. 30 m. • Les palplanches peuvent être utilisées pour peu que la compacité du sol, le permette. La roche compacte ne peut par exemple pas être battue; la mise en place de telles parois risque également d'être bloquée par certains obstacles (p. ex. des grosses pierres, etc.) et entraîner certaines nuisances (bruit, vibrations). • Pour des sols difficiles à battre, on pourra utiliser des techniques de lançage, de forage ou de minage de manière à faciliter la mise en place des parois. • La pose d'un revêtement sur les éléments d'acier et de joints étanches entre les palplanches permet d'augmenter leur durabilité, en particulier face aux lixiviats de la décharge, et de minimiser leur perméabilité. • Ce type de parois présente le grand avantage qu'elles peuvent être mises en place relativement rapidement. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ exclusivement si le sol peut être battu, ▪ en raison de son temps de construction restreint, méthode particulièrement bien adaptée lorsque des mesures urgentes de confinement doivent être prises. ▪ possible avec des lixiviats agressifs, si des profilés en acier de bonne qualité ou recouverts d'une pellicule protectrice sont utilisés.
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sans restrictions, car la capacité portante face aux charges statiques est élevée.
Évaluation	
Procédé standard, les rideaux de palplanches en acier sont utilisés surtout lorsque les charges statiques sont élevées ou que le dispositif est temporaire (p. ex. soutènement des parois de fouilles lors de la pose de canalisations). Ce type de parois n'est employé dans le cadre d'un confinement de site contaminé que dans des cas exceptionnels, car lorsque les profilés res-	

tent en place (coffrages perdus), l'opération s'avère relativement coûteuse. Les rideaux de palplanches présentent cependant l'avantage qu'aucun matériau contaminé ne doit être excavé (ni ne doit être éliminé).

Coûts

Coûts

- Installation de chantier: 3 francs / m²
 - Matériaux: 205 francs / m²
 - Mise en place: 72 francs / m²
 - Total: 305 francs / m²
 - Supplément pour les joints étanches: 25 francs / m²
- Profilés en acier Larssen 22, non revêtus

2.1.5 Parois par jet grouting



Fonctions

- Étanchéifier latéralement l'ancienne décharge à assainir avec des suspensions minérales.

Caractéristiques techniques

Le jet grouting est un procédé à haute pression, par lequel un matériau d'étanchéité est injecté dans les fissures et les pores du sol, réduisant sa perméabilité.

- Dans ce procédé, aucun matériau n'est excavé.
- Le principal avantage de cette technique est qu'elle permet d'obtenir une structure solide importante dans le sol avec une tige de forage relativement fine (diamètre d'env. 15 cm). Sur le bout de cette tige se trouve une buse d'injection, par laquelle une suspension liante est introduite; dans ce procédé, un « jet tranchant » à haute énergie cinétique déstructure le sol et y incorpore le liant liquide jusqu'à des profondeurs de 100 à 150 m.
- Certains facteurs, tels que la compacité et la nature du sol, limitent la portée du jet, pouvant créer une structure solidifiée à forme irrégulière. Ainsi, il n'est pas possible de garantir que la paroi atteindra effectivement l'épaisseur définie; de même, la morphologie finale de la paroi ne peut être que partiellement vérifiée ultérieurement.
- Une solution alternative consiste à procéder à des injections « classiques » directement dans les pores sans déstructurer le sol (p. ex. obturation des fissures). Une autre possibilité est d'utiliser le procédé dit du « Soilcrete », = « béton de terre », qui consiste à découper le sol grâce à des jets sous haute pression, à le chasser vers la surface, alors que le coulis durcit pour former une colonne.
- Les techniques de jet grouting sont utilisées pour créer des semelles étanches (courts piliers disposés en damier serré à certaines profondeurs données).

- Les coulis injectés à haute pression (400-600 bars) peuvent être des suspensions de ciment, des résines synthétiques ou des mélanges à base de silicate de potassium, dont la composition ne doit pas nuire à la nappe phréatique.
- Par un mouvement de rotation et de va-et-vient simultané de la tige de forage, le jet de découpage pénètre dans le sol à la manière d'une étroite spirale, produisant une cavité cylindrique. Cette cavité se transforme en pilier rempli par le mélange de sol et de coulis, lequel se durcit par l'effet du liant. En alignant des colonnes sécantes (s'emboîtant les unes dans les autres), on obtient une paroi étanche.

Utilisation

Mise en œuvre

- possible pour un large éventail de sols à bâtir différents, à savoir
 - dans les roches meubles, jusqu'aux argiles,
 - dans des sols mixtes et des sols stratifiés,
 - dans des sols organiques,
 - dans une roche cohérente présentant des fissures (en injectant le coulis dans les fissures);
- disposition des colonnes possible également sur ou autour d'obstacles tels que des blocs de pierre.

Affectation ultérieure du site

- Le « cimentage » du sol en place par une suspension durcissante permet de fabriquer des parois possédant une grande portance, capables sans autre de servir de fondations pour des bâtiments.

Évaluation

Le jet grouting est un procédé standard dans le génie civil. La morphologie des parois obtenues avec cette technique étant difficile à contrôler lors de la fabrication et à vérifier une fois les parois mises en place, ce procédé n'est utilisé dans le domaine de l'assainissement des sites contaminés qu'en présence de certaines contraintes bien spécifiques (en présence de roche cohérente, lorsque les parois doivent être très profondes ou que le couronnement de la paroi étanche doit se situer considérablement en-dessous du niveau du terrain).

Coûts

Coûts

- Installation de chantier: 3 francs / m²
- Matériaux: 17 francs / m²
- Mise en place: 50 francs / m²
- Total: 70 francs / m²

Paroi par jet grouting de 80 cm d'épaisseur

2.1.6 Parois en sol traité (MIP ou CSM)



Fonctions	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Étanchéifier latéralement l'ancienne décharge à assainir avec des suspensions minérales. 	
Caractéristiques techniques	
<ul style="list-style-type: none"> • Les parois obtenues selon le procédé MIP (soit « mixed-in-place ») ou CSM (« cutter soil mixing ») représentent une alternative aux parois de pieux sécants, utilisées jusqu'ici. La mise en place de parois en sol traité n'implique qu'une excavation minimale de matériaux. • Dans le cas du procédé MIP, une tarière comprenant trois tiges hélicoïdales est enfoncée dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée. Le sol est malaxé par les mouvements de forage et de retrait (va-et-vient) de la tarière, pendant qu'un coulis liant est injecté à travers son axe creux, remplissant les pores du sol. • Le sens de rotation de chacune des tiges hélicoïdales de la tarière variant, liant et matériaux du sous-sol sont mélangés de manière homogène. La mise en place de parois MIP se fait en suivant par procédé de pianotage (cf. ch. 2.1.1). • Cette technique permet d'atteindre jusqu'à 25 m de profondeur. • L'épaisseur de parois en sol traité atteint entre 40 et 90 cm. • Elles peuvent être mises en œuvre comme écran d'étanchéité avec ou sans palplanches. Cette technique est utilisée pour exécuter des parois verticales de grandes dimensions ou pour stabiliser des sites contaminés in situ. 	
Utilisation	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • pour un large éventail de sols différents, mais sans roches, grosses pierres ou blocs de pierre, • en tenant compte du fait que des sols cohésifs peuvent réduire la stabilité de la structure. <p>NB: la technique MIP n'est proposée pour l'instant que par une seule entreprise sise en Allemagne.</p>
Affectation ultérieure du site	<ul style="list-style-type: none"> ▪ aucune restriction.
Évaluation	
<p>Récente, la technique des parois en sol traité n'est pas encore très répandue, mais elle a déjà fait ses preuves à plusieurs reprises. Elle présente plusieurs avantages certains: comme dans le cas des parois de pieux sécants, elle permet d'obtenir des colonnes dont la morphologie et l'étanchéité sont définies. Comme dans le procédé du jet grouting, aucun matériau ne doit être excavé ; enfin, elle se prête bien pour de la roche meuble ou un sol cohésif, toutefois jusqu'à des profondeurs restreintes.</p>	

Coûts	
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de chantier: 7 francs / m² ▪ Matériaux: 35 francs / m² ▪ Mise en place: 53 francs / m² ▪ Total: 95 francs / m² <p>Parois MIP de 80 cm, suspension de bentonite et de ciment, sans armature</p>

2.2 Captage et traitement des eaux (mesures de type hydraulique)

Installations ou opérations	Fonctions
Systèmes de captage verticaux (puits) ou de drainage horizontaux	<ul style="list-style-type: none"> • Puits en aval de l'ancienne décharge à assainir • Diamètre d'au moins 4 pouces (100 mm); 2 pouces (50 mm): seulement pour la prise d'échantillon • Veiller à la stabilité du dispositif de filtration <p>Comme solution alternative aux puits, il est également possible de créer des fossés drainants ou de forer des drains de captage horizontaux.</p>
Pompes	En général des pompes submersibles (disponibles dès 4 pouces; pour la prise d'échantillons, dès 2 pouces).
Systèmes de collecte horizontaux: conduites	<p>Conduites à mettre en place entre</p> <ul style="list-style-type: none"> • les puits et les installations de traitement: conduites de pression; • les installations de traitement et l'exutoire: en général, canalisation à écoulement libre. <p>NB: veiller à protéger les conduites contre le gel (système de chauffage).</p>
Traitement de l'eau	<p>But du traitement de l'eau:</p> <ul style="list-style-type: none"> • retirer les polluants, • retirer d'autres substances ou matières pouvant nuire aux procédés de traitement (adoucissement, déferrisation ou démanganisation), • corriger les paramètres de l'eau afin de permettre son déversement dans l'exutoire (en particulier régulation du pH). <p>Techniques de traitement de l'eau:</p> <ul style="list-style-type: none"> • oxydation: fer, manganèse • oxydation par UV: polluants organiques • désorption (stripping): dioxyde de carbone, polluants organiques volatiles • précipitation: métaux, métaux lourds • traitement biologique: matières organiques • adsorption (p. ex. charbon actif): matières organiques • échange d'ions

Installations ou opérations Fonctions	
Élimination	<p>Le lixiviat traité peut être éliminé comme suit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • en le réinfiltrant dans le terrain (réinfiltration), • en l'évacuant vers un exutoire, • en le déversant directement dans la canalisation d'eaux pluviales ou d'eaux résiduaires. <p>Pour que les eaux puissent être réinfiltrées dans le terrain ou être évacuées vers un exutoire, il convient de satisfaire à des exigences élevées en matière de qualité des eaux; quant à l'évacuation dans la canalisation d'eaux usées, celle-ci requiert parfois le versement de taxes.</p>
Mesures et réglages	<p>Pilotage des installations:</p> <ul style="list-style-type: none"> • manuel (pour des installations simples; nécessite parfois une maintenance accrue) • automatique (p. ex. système informatique), • télétraitement des données / commande à distance <p>Mesures en continu:</p> <ul style="list-style-type: none"> • débits d'eau (compteur à eau) • flux (p. ex. mesure par induction) • si nécessaire, mesures de certains paramètres sur site (pH, conductivité, etc.) • si nécessaire, analyse en ligne (chromatographe en phase gazeuse industriel) <p>Mesures ponctuelles (par échantillonnage):</p> <ul style="list-style-type: none"> • analyse chimique des polluants • analyse chimique des autres substances présentes dans l'eau

3. Captage et élimination des gaz

3.1 Captage et collecte des gaz de décharge

Installations ou opérations	Fonction
Systèmes verticaux: puits de captage	<ul style="list-style-type: none"> • Puits réalisés lors de l'entreposage des déchets (puits à l'avancement) ou forés ultérieurement (mise en œuvre possible aussi pour des anciennes décharges) • Tuyaux perforés d'un diamètre de 0,8 à 1,2 m • Trou foré (espace vide du puits) rempli de matériaux drainants • Raccord étanche à l'étanchéité de surface obligatoire • Tête de puits munie de piquages (pour mesurer la pression, la concentration de gaz, etc.)
Systèmes horizontaux: drains horizontaux	<ul style="list-style-type: none"> • Drains disposés horizontalement dans le corps des déchets (lors de l'entreposage des déchets ou, dans le cas d'anciennes décharges, drains placés ultérieurement dans la couche de drainage des gaz) • Tuyaux perforés d'un diamètre ≥ 200 mm (une caméra doit pouvoir être introduite à des fins de contrôle) • Etanches aux gaz aux extrémités latérales afin de garder une étanchéité de surface. • Tuyaux disposés dans des tranchées (rigoles) en pente faites de matériaux drainants (pente pour évacuer l'eau de condensation)
Conduites	<ul style="list-style-type: none"> • Tuyaux de plastique; manchons de raccordement soudés (pour assurer l'étanchéité) • Diamètre ≥ 200 mm (une caméra doit pouvoir être introduite à des fins de contrôle et d'entretien) • Mise en place de tranchées drainantes en pente (évacuation de l'eau de condensation)
Chambres (têtes de puits)	<ul style="list-style-type: none"> • Composants en plastique; raccords soudés (étanches) • Comme points d'accès permettant les opérations de révision, situées aux endroits de changement de direction et de réunion des drains (raccordement aux canalisations de collecte) • Équipements anti-étincelants nécessaire • Mesures pour assurer la sécurité au travail lors de l'entrée dans les chambres obligatoires
Séparateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Système de captage et d'évacuation de l'eau de condensation (les gaz de décharge sont chauds et saturés d'eau; lors de baisses de température, de l'eau de condensation contaminée se forme en grande quantité). • Raccordement au point bas du système de drains • Raccord aux conduites ou aux chambres étanche au gaz à des conduites sises en profondeur • Raccords aux conduites ou aux chambres étanches (aux gaz) • Élimination de l'eau de condensation (dans la canalisation d'eaux usées ou un système semblable)

Installations ou opérations Fonction	
Conduites de collecte et tronçons de mesure des débits	<ul style="list-style-type: none"> • Canalisations auxquelles sont branchés plusieurs collecteurs différents • Possibilité d'effectuer des mesures (piquages pour mesurer la pression, la température et le débit) et de prendre des échantillons (pour mesurer la composition des gaz) dans les canalisations • Tronçons calibrés à écoulement laminaire, destinés à mesurer le débit
Extraction du gaz	<ul style="list-style-type: none"> • Compresseur à canal latéral • Ventilateur centrifuge ou compresseur à piston si de grandes différences de pression sont présentes • Équipements adaptés aux gaz de décharge nécessaires (équipements résistants à la corrosion, protection contre l'explosion, systèmes de détection des gaz)

3.2 Traitement des gaz (élimination ou valorisation)

Installations ou opérations Fonctions	
Torchère	<ul style="list-style-type: none"> • Torchère à haute température • Haute température nécessaire pour détruire intégralement les éléments-traces organiques (1000-1200°C dans le flux de gaz avec au moins 0,3 s de temps de séjour)
Combustion catalytique	<ul style="list-style-type: none"> • Catalyseur pour brûler les gaz • Catalyseurs spéciaux nécessaires • Niveau de température requis: 300-400°C
Valorisation énergétique des gaz de décharge	<ul style="list-style-type: none"> • Combustion des gaz de décharge extraits par des systèmes actifs dans des moteurs à gaz en vue de récupérer de l'énergie • Teneur élevée en méthane nécessaire dans les gaz de décharge • Moteurs ad hoc et conduite d'exploitation spéciale (matériaux adaptés, fréquence de changements de l'huile, etc.) en raison de l'agressivité élevée des gaz de décharge