

Chapitre III : Méthodes thermiques

III.1. Désorption thermique

Principe

La désorption thermique consiste à appliquer de la chaleur pour extraire par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils des sols excavés. La température utilisée est inférieure à celle nécessaire pour l'incinération.

Description

Les terres excavées sont introduites dans un four pour être chauffées jusqu'à des températures moyennes comprises entre 90 et 560 °C (ces températures sont inférieures à celles de l'incinération). Ce chauffage permet, d'une part, de désorber les polluants adsorbés sur la matrice sols et, d'autre part, d'augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils et de les extraire en phase gazeuse. Une partie des composés organiques peut être détruite même à de basses températures.

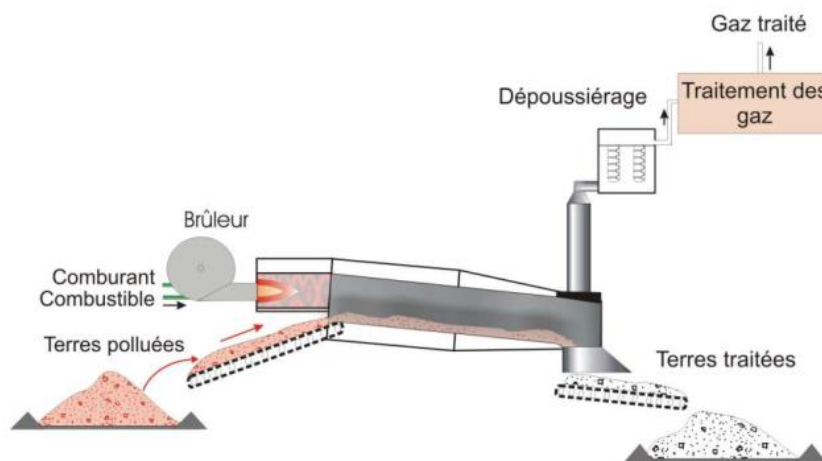


Figure : Schéma de principe de la désorption thermique ex situ ou on site.

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Les particules sont au préalable récupérées dans des filtres, des dépoussiéreurs humides ou des dépoussiéreurs électrostatiques ; par la suite, les composés organiques sont éliminés par destruction (brûlage, oxydation catalytique) ou fixation (charbon actif, condenseur).

Les sols dépollués, contrairement à l'incinération, ne sont pas détruits à l'état de cendre, mais conservent une bonne partie de ses propriétés physiques (notamment ses propriétés structurantes permettant de supporter éventuellement une activité biologique) et peuvent être incorporés le cas échéant à d'autres matériaux ou être enfouis.

Il existe deux types de désorption :

- La désorption thermique à basse température (90 à 320 °C) : cette technique est la plus utilisée en France notamment pour les polluants organiques.
- La désorption thermique à haute température (320 à 560 °C) : cette technique est souvent utilisée en combinaison avec l'incinération ou la stabilisation/solidification.

Les unités de désorption qui traitent les solvants chlorés sont équipées d'une unité de traitement adaptée pour la neutralisation de l'acide chlorhydrique.

Applicabilité

La désorption thermique est utilisée pour de nombreux polluants organiques (volatils, semi-volatils voire peu volatils) : hydrocarbures pétroliers (essences, gasoils, kérosènes ...), fractions plus lourdes d'hydrocarbures, solvants chlorés, huiles, PCB, pesticides, dioxines/furanes, HAP.

Efficacité/Performances

Les rendements épuratoires sont élevés (plus de 95 à 98 % pour les hydrocarbures pétroliers) et les concentrations finales en polluants sont faibles (inférieures à 5 mg/kg voire 100 ppb dans la plupart des cas).

Ce rendement dépend des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils).

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de la désorption thermique sont :

- technique permettant de traiter de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils,
- technique permettant de traiter les sols fortement pollués, les teneurs en hydrocarbures totaux doivent néanmoins rester d'une manière générale inférieure à 50 000 mg/kg,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes,
- technique permettant d'atteindre des taux de dépollution très importants,
- technique rapide,
- technique moins onéreuse que les autres traitements thermiques,
- traitement sur site possible grâce à des unités mobiles.

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- la technique de désorption ne permet pas de détruire les polluants,
- le procédé nécessite l'excavation des sols,
- le traitement on site nécessite une surface importante,
- le procédé utilisé en traitement hors site nécessite un transport coûteux,
- les rejets atmosphériques doivent faire l'objet d'un traitement poussé et coûteux,
- l'hétérogénéité et le taux de matières organiques des sols peuvent impacter notablement les rendements épuratoires,
- les températures réellement atteintes au cœur de la pollution influent le rendement épuratoire,
- les coûts de production de température (coûts d'exploitation) sont souvent importants et sont souvent un frein à l'application de ce procédé, notamment ceux générés pour la vaporisation de l'eau,
- les composés organiques peu volatils peuvent être volatilisés et donc extraits du sol en phase gazeuse à condition que leur tension de vapeur ait augmenté de manière significative.

Cependant, les composés peu volatils nécessitent des températures élevées et donc des coûts de fonctionnement plus élevés,

- les particules d'une taille supérieure à 5 cm ne sont pas admises : il faudra soit procéder à une ségrégation soit à un broyage,
- les sols présentant un taux d'humidité supérieur à 20 % doivent faire l'objet d'un prétraitement par chauffage,
- les sols compacts doivent faire l'objet d'un émottage,
- les teneurs élevées en azote organique peuvent également poser un problème supplémentaire de traitement des rejets atmosphériques (du fait de la formation possible de NO_x) ;
- les teneurs élevées en métaux génèrent des problèmes de rejets atmosphériques et de revalorisation des terres dépolluées.
- les émissions de CO₂ liés au procédé peuvent être importantes.

Coûts et délais

Les coûts de traitement en centres fixes sont de l'ordre de 60 à 110 €/t (hors coûts de transport). Pour des chantiers de tailles conséquentes, les coûts de traitement on site peuvent être moindres.

III.2. Pyrolyse

Principe

La pyrolyse consiste à chauffer les sols en l'absence d'oxygène pour en extraire les polluants volatils et semi-volatils.

Description

La pyrolyse consiste à introduire les terres excavées dans un four afin de les chauffer en l'absence d'oxygène à des températures comprises entre 150 et 540°C. Dans les faits, il est impossible d'obtenir une concentration en oxygène proche de 0 %, les techniques actuelles permettent néanmoins de travailler avec des concentrations en oxygène inférieures aux conditions stœchiométriques.

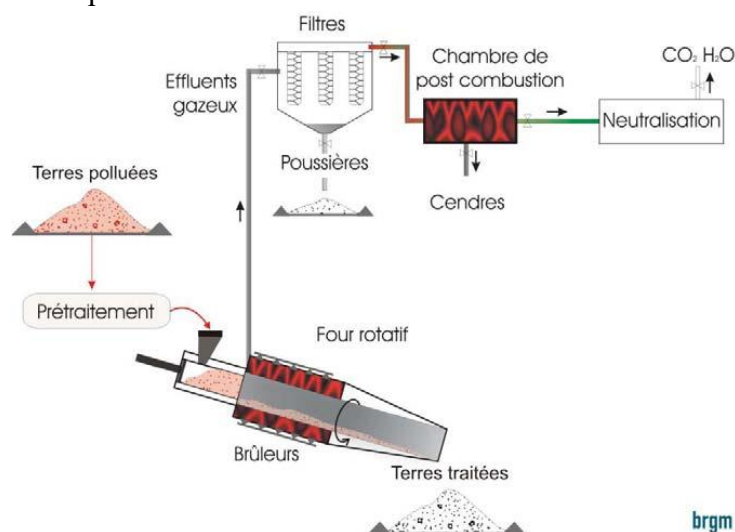


Figure : Schéma de principe de la pyrolyse.

Le but est de désorber les contaminants adsorbés sur la matrice sol et d'augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de les volatiliser et de les transférer dans la phase gazeuse.

Préalablement à la pyrolyse, les sols sont prétraités (tamisage, séchage ...) ; seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four.

Les sols pollués sont ainsi transformés en gaz et en un résidu solide. La pyrolyse provoque le « cracking » des polluants organiques en composés plus simples. Les gaz sont constitués de monoxyde de carbone, d'hydrogène, de méthane et d'hydrocarbures divers. La faible présence d'oxygène lors de la pyrolyse permet d'éviter la formation de sous-produits toxiques (par exemple, les dioxines). Les gaz sont récupérés en vue d'un traitement : élimination des particules (filtres, scrubbers) puis élimination des composés organiques et du monoxyde de carbone (brûleur, oxydation catalytique, seconde chambre de combustion, condenseur ou charbon actif).

Un résidu solide formé de cendres et de carbone (coke) ainsi que de verres et de métaux est récupéré. Il est soit valorisé par production d'électricité et de chaleur (thermolyse intégrée), soit lavé, soit éliminé en centre de stockage des déchets.

Applicabilité

La pyrolyse est particulièrement adaptée pour traiter les sols riches en matière organique contaminés par des composés semivolatils ou peu volatils : fractions lourdes d'hydrocarbures, huiles, pesticides, PCB, dioxines, furannes, HAP, résidus de raffinerie, produits de traitement du bois (pentachlorophénols), certains métaux lourds (mercure), mais aussi des sols pollués par des hydrocarbures plus légers mais fortement adsorbés sur certains types de sols (taux de matière organique très élevés) : essences, gasoils, kérosènes, solvants chlorés.

Efficacité/Performances

Dans de bonnes conditions, des rendements épuratoires supérieurs à 90 % ont été obtenus. Ces rendements dépendent des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils). Par exemple, les rendements sont inversement proportionnels au taux d'humidité des sols. On peut noter que des concentrations finales en BTEX et hydrocarbures totaux inférieures à 10 ppm voire 100 ppb ont été obtenues par pyrolyse.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de la pyrolyse sont :

- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- technique permettant de traiter de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils,
- technique permettant de traiter les sols fortement pollués,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes,
- technique permettant d'atteindre des taux de dépollution très importants,
- technique moins onéreuse que l'incinération et la vitrification,

- volume de gaz à traiter faible par rapport à l'incinération,
- cette technique permet de traiter tous les types de déchets et est particulièrement adaptée pour le traitement des sols riches en matière organique ;
- revalorisation énergétique possible des sous-produits solides.

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- la technique de désorption ne permet pas de détruire les polluants,
- le procédé nécessite l'excavation des sols,
- le procédé utilisé en traitement hors site nécessite un transport coûteux,
- les rejets atmosphériques doivent faire l'objet d'un traitement poussé et coûteux,
- les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitements en aval,
- l'hétérogénéité des sols peut impacter notablement les rendements épuratoires,
- les sols présentant un taux d'humidité supérieur à 20 % doivent faire l'objet d'un prétraitement par chauffage,
- les températures réellement atteintes au cœur de la pollution influent sur le rendement opératoire,
- les composés organiques peu volatils peuvent être volatilisés et donc extraits du sol en phase gazeuse à condition que leur tension de vapeur ait augmenté de manière significative ; en règle générale et pour un sol donné, moins le composé est volatil et plus la température requise est élevée,
- les coûts de production de température (coûts d'exploitation) sont souvent importants et sont souvent un frein à l'application de ce procédé,
- les composés peu volatils nécessitent des températures élevées et donc des coûts de fonctionnement plus élevés,
- les particules d'une taille supérieure à 5 cm ne sont pas admises : il faudra soit procéder à une ségrégation soit à un broyage,
- les sols compacts doivent faire l'objet d'un émottage, d'un mélange avec de la chaux, du gypse ou des sols plus friables,
- les sols à forte teneur en argile seront plus difficiles à chauffer,
- les teneurs élevées en métaux génèrent des problèmes de rejets atmosphériques ; ils peuvent aussi, le cas échéant, nécessiter une stabilisation des résidus solides,
- le procédé demande un haut niveau de technicité et des installations de traitement très lourdes.

Coûts et délais

Certaines unités de traitement sont capables de traiter de 20 à 30 t/h de sols.

Les coûts de traitement varient de 75 à 150 €/t de sols traités (selon le type de traitement : pyrolyse à thermolyse intégrée).

III.3. Incinération

Principe

L'incinération est une des techniques de traitement les plus anciennes. Son principe repose sur une combustion aérobie (en présence d'air) dans un four où les températures sont importantes (870 à 1200 °C). Ces hautes températures détruisent les polluants ou les volatilisent.

Maturité

L'incinération est exploitée commercialement depuis de nombreuses années. Constamment développée, elle est aujourd'hui adaptée à une très grande variété de polluants et est très souvent utilisée pour des polluants présents à des concentrations importantes.

Description

La combustion aérobie permet de détruire les polluants organiques en vapeur d'eau, gaz carbonique et résidus de combustion (cendres). Les métaux ne sont pas détruits et se retrouvent soit dans les effluents gazeux soit dans la fraction solide (cendres). Les métaux présents dans la fraction gazeuse peuvent faire l'objet d'une oxydation et d'une récupération spécifique.

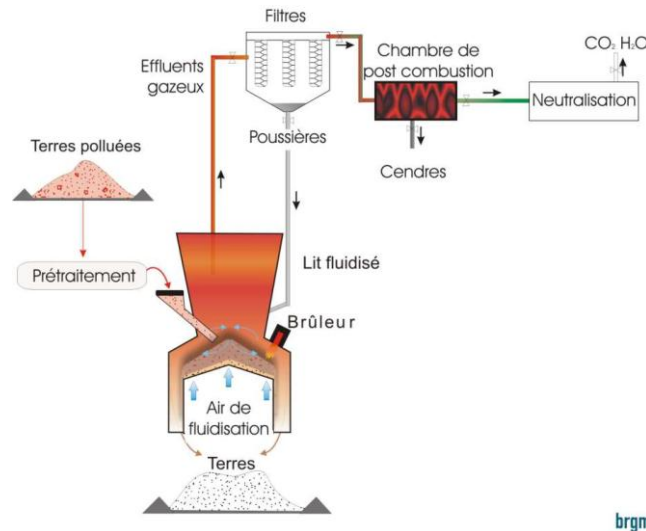


Figure : Schéma de principe de l'incinération.

Généralement, l'incinération se décompose en deux phases :

- une première chambre dans laquelle les polluants organiques sont désorbés et volatilisés (température > 400 °C),
- une seconde chambre de combustion dans laquelle les polluants organiques sont détruits (température > 1000 °C).

Préalablement à l'incinération, les sols sont prétraités (tamisage, séchage ...) ; seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four.

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Le chlore, l'azote et le soufre (présents sous forme de HCl, NOx, et SOx) sont éliminés des rejets atmosphériques le plus souvent par neutralisation en solution alcaline.

Applicabilité

L'incinération est utilisée pour de nombreux polluants organiques (volatils, semi-volatils voire peu volatils) à des teneurs très concentrées (de l'ordre de plusieurs pourcents parfois), hydrocarbures pétroliers (essences, gasoils, kérosènes), fractions plus lourdes d'hydrocarbures, solvants chlorés, huiles, PCB, pesticides, dioxines/furanes, HAP, composés explosifs.

Efficacité/Performances

Les rendements épuratoires sont les plus élevés (plus de 99,99 % pour les hydrocarbures pétroliers) et les concentrations finales en polluants sont négligeables pour les composés organiques.

Ces rendements dépendent des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils).

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de l'incinération sont :

- technique permettant de détruire les polluants,
- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,

- technique permettant de traiter de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils,
- technique permettant de traiter les sols très fortement pollués ; les teneurs en composés organiques peuvent être de l'ordre de plusieurs pourcents,
- technique permettant de traiter certains métaux "volatilisables" comme le zinc, le cadmium, le plomb...,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes,
- technique permettant d'atteindre des taux de dépollution très importants,
- technique rapide,
- technique moins onéreuse que les autres traitements thermiques,
- traitement sur site possible grâce à des unités mobiles. Les inconvénients et facteurs limitants sont :
- procédé nécessitant l'excavation des sols,
- technique très énergivore,
- une des techniques les plus onéreuses du marché,
- traitement on site nécessitant une surface importante,
- très haut niveau de technicité nécessaire,
- il est primordial d'atteindre de très hautes températures afin de ne pas dégager une partie des polluants dans l'atmosphère (ou leurs métabolites comme les dioxines et les furanes par exemple),
- procédé utilisé en traitement hors site nécessitant un transport coûteux,
- préalablement à l'installation d'une unité sur site, il faut monter un dossier d'autorisation d'exploiter,
- traitement poussé et coûteux des rejets atmosphériques,
- les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitement en aval,
- les débouchés de cendres très fortement contaminées notamment en métaux/métalloïdes doivent être considérés dès le départ du projet car ils peuvent poser des problèmes non négligeables ; la plupart du temps, ces cendres sont éliminées en centre de stockage de déchets ultimes,
- les métaux volatils (comprenant notamment le plomb, le cadmium, le mercure, l'arsenic) quittent l'unité de combustion et sont entraînés dans les rejets atmosphériques ; ce qui nécessite des unités de traitement spécifique (condenseurs),
- certains métaux forment temporairement des composés toxiques notamment avec les atomes de chlore et de soufre et doivent être traités au niveau de la neutralisation,

- l'hétérogénéité et le taux de matière organique des sols peuvent impacter notablement les rendements épuratoires,
- les températures réellement atteintes au cœur de la pollution influent le rendement opératoire,
- les composés organiques peu volatils peuvent être volatilisés et donc extraits du sol en phase gazeuse à condition que leur tension de vapeur ait augmenté de manière significative,
- les coûts de production de température (coûts d'exploitation) sont souvent importants et sont souvent un frein à l'application de ce procédé, notamment ceux générés par la vaporisation de l'eau,
- les composés peu volatils nécessitent des températures élevées et donc des coûts de fonctionnement plus élevés,
- les particules d'une taille supérieure à quelques centimètres ne sont pas admises : il faudra soit procéder à une ségrégation soit à un broyage,
- les sols présentant un taux d'humidité supérieur à 20 % doivent faire l'objet d'un prétraitement par chauffage,
- les sols compacts doivent faire l'objet d'un émottage,
- des mélanges sont parfois nécessaires afin de faciliter le traitement des sols (ajout de chaux, de gypse, de sols plus friables...),
- les sols à fortes teneurs en argile et en matières organiques sont plus difficiles à traiter,
- la présence de molécules de chlore et de soufre nécessite des unités de neutralisation (par voie humide le plus souvent),
- les teneurs élevées en azote organique peuvent également poser un problème supplémentaire de traitement des rejets atmosphériques (du fait de la formation possible de NOx),
- les teneurs élevées en métaux génèrent des problèmes de rejets atmosphériques et d'élimination des cendres.
- Emission de CO₂ importante lié au processus d'incinération.

Coûts et délais

Les durées de traitement dans l'unité de désorption ne durent que quelques minutes à quelques dizaines de minutes. Les unités de traitement modernes sont capables de traiter plusieurs dizaines de tonnes/heure.

Les coûts de traitement en centres fixes sont de l'ordre de 190 à 305 €/t voire jusqu'à 1050 €/t pour des polluants spécifiques (hors coûts de transport). Pour des chantiers de tailles conséquentes, les coûts de traitement on site peuvent être moindres.

Les coûts d'élimination en cimenterie (possible dans certains cas très stricts) varient entre 40 et 75 €/t.

III.4. Vitrification

Principe

La vitrification est un traitement thermique qui a pour but de solidifier/stabiliser les sols excavés par élévation de la température afin de les transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant.

Description

La vitrification est réalisée dans des fours qui permettent d'obtenir des températures extrêmement élevées (1600 à 2000 °C) lors de l'introduction des sols pollués. L'élévation de la

température peut être réalisée via la fusion électrique, la fusion par induction, la fusion par torche à plasma, la fusion par oxycombustion, les électrobrûleurs, le four à micro-ondes.

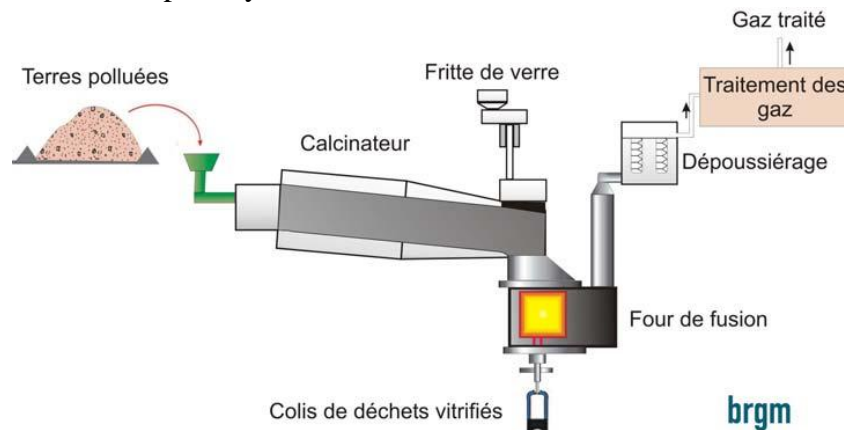


Figure : Schéma de principe de la vitrification thermique

Les composés organiques ainsi que certains composés métalliques volatils (mercure...) sont pyrolysés et vaporisés à ces très hautes températures. La vapeur d'eau et les produits pyrolysés sont récupérés et dirigés vers les unités de traitement des rejets atmosphériques (similaires à ceux utilisés en incinération).

Applicabilité

Cette technique, à l'instar des autres techniques de solidification/stabilisation, est applicable à de nombreux composés organiques (destruction des COV, SCO, dioxines, PCB...) mais est principalement destinée à traiter (par immobilisation) les composés inorganiques mais aussi l'amiante et les radionucléides.

Efficacité/Performances

Les concentrations dans les lixiviats après traitement peuvent être diminuées de plus de 95 %.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de la vitrification in situ sont :

- applicabilité à de très nombreux produits,
- résidus solides peu lixiviables,
- technique particulièrement adaptée aux contaminants toxiques non combustibles,
- technique éprouvée (dans certains pays étrangers) et fiable ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes.

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- technologie non destructive,
- consommation énergétique très importante et constituant un frein à l'application de ce procédé,
- les contaminants peu volatils (métaux, radionucléides, amiante ...) restent dans le sol mais sont immobilisés,
- les particules de sols présentant une granulométrie supérieure à 60 mm ne sont pas acceptées et doivent faire l'objet d'un prétraitement,
- le procédé utilisé en traitement hors site nécessite un transport coûteux,

- la proportion des contaminants organiques présents doit être inférieure à 5- 10%,
- le sol doit contenir suffisamment de silice pour que la vitrification soit efficace,
- la technique nécessite le contrôle d'éléments préjudiciables à la technique (humidité, sulfures, chlorures, phosphore) ainsi que des produits pouvant générer des risques d'explosions (produits inflammables ou explosifs),
- les sols alcalins (Na_2O et K_2O) se prêtent peu à cette technique (au-delà de 1,4% massique, la conductivité électrique du sol sera insuffisante) ; un prétraitement est parfois nécessaire,
- les propriétés texturales et de fertilisation des sols sont complètement détruites,
- augmentation de la densité des sols de 1,5-1,9 à 2,6 t/m^3 , donc de leur volume
- les sols se refroidissent en plusieurs mois à une année,
- conception fine du système de collecte afin d'éviter toute dissipation de la pollution,
- le procédé génère la volatilisation des composés organiques et de certains métaux/métalloïdes ; ces émissions atmosphériques nécessitent un traitement spécifique,
- les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitements en aval,
- le procédé génère un résidu stable dont la destination finale doit être prise en compte dès le départ du projet ; il s'agit la plupart du temps d'un enfouissement dans un centre de stockage de déchets (surcoûts).

Coûts et délais

Les coûts de traitement varient entre 250 et 800 €/t de sols traités. Le procédé de vitrification est rapide (de l'ordre de quelques heures).