

## **Annexe A2: Systèmes de traitement des effluents liquides et gazeux**

<b>1. Traitement de l'eau .....</b>	<b>2</b>
1.1 Strippage (à l'air).....	2
1.2 Oxydation (chimique ou photochimique par UV) .....	5
1.3 Adsorption au charbon actif.....	7
1.4 Précipitation/floculation/filtration .....	10
1.5 Traitement biologique.....	12
1.6 Techniques à membranes.....	15
<b>2. Traitement de l'air .....</b>	<b>18</b>
2.1 Adsorption au charbon actif.....	18
2.2 Oxydation thermique et oxydation catalytique .....	20
2.3 Épuration biologique des effluents gazeux.....	23
2.4 Absorption pour épurer les effluents gazeux issus d'un processus thermique .....	26

# 1. Traitement de l'eau

## 1.1 Strippage (à l'air)

<b>Autres désignations</b>
Le mot «strippage» est dérivé de l'anglais «to strip»: arracher, dépouiller, retirer.
<b>Principe</b>
Dans le procédé du strippage, des polluants sont retirés de l'eau en y faisant passer un gaz (air, vapeur d'eau, gaz de combustion, etc.) dans lequel ils sont transférés. Cela permet de désorber des polluants organiques volatils (HCCV, HCHV, BTEX, MTBE) à partir d'eau souterraine polluée ou d'eau de percolation.
<b>Fonctionnement</b>
La tension de vapeur relative des substances polluantes contenues dans l'eau doit être suffisamment élevée pour leur permettre de passer de l'état dissous à l'état gazeux. Il est aussi possible d'estimer le déroulement de ce processus en appliquant la constante de Henry. La désorption peut être améliorée en augmentant la température, en modifiant le pH ou en diminuant la pression. Dans le domaine du traitement des eaux, on utilise préférentiellement l'air ambiant comme vecteur de strippage.
<b>Description technique</b>
<p>L'eau polluée est retirée du site contaminé au moyen d'un puits et pompée jusqu'au sommet d'une colonne de strippage. Il en existe deux types:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La colonne à garnissage est remplie d'un matériel sur lequel des gicleurs répartissent l'eau, qui ruisselle à travers les éléments de garnissage sous l'effet de la gravité. Un ventilateur propulse de l'air en sens contraire (vers le haut) à travers l'installation. Le matériel de remplissage augmente considérablement la surface d'échange entre les phases liquide et gazeuse.</li> <li>▪ La colonne à plateaux perforés (strippeur compact) comprend un ou plusieurs tamis superposés. L'eau est épanchée sur le tamis supérieur. De l'air est introduit depuis le bas dans la couche liquide, à travers les trous du tamis, en quantité telle que l'eau ne peut pas «ruisseler» au travers du tamis jusqu'au niveau sous-jacent, mais doit passer par un déversoir (trop-plein). L'échange de substances se fait aux interfaces air-liquide générées dans le lit bouillonnant à chaque étage.</li> </ul> <p>Les polluants volatils sont transférés de l'eau à l'air – ils sont «strippés» – et transportés vers le haut (éventuellement sous vide). L'air effluent quitte l'installation de strippage à son sommet, puis est épuré, tandis que les gouttes d'eau sont retenues par un séparateur adéquat. La surface spécifique du matériau de remplissage ou la surface des bulles générées dans les tamis détermine, selon la volatilité des polluants, l'épaisseur du matériel ou le nombre de tamis qu'il faut pour atteindre le taux d'épuration visé. Plus le débit volumique à épurer est important, plus le diamètre de l'installation doit être grand. De même, plus la charge polluante est importante, plus la colonne de strippage doit être longue. Le rapport entre les débits de l'air et de l'eau varie entre 15 : 1 et 50 : 1 dans la pratique. Les installations de strippage sont généralement construites en matière plastique.</p>

### Schéma du procédé

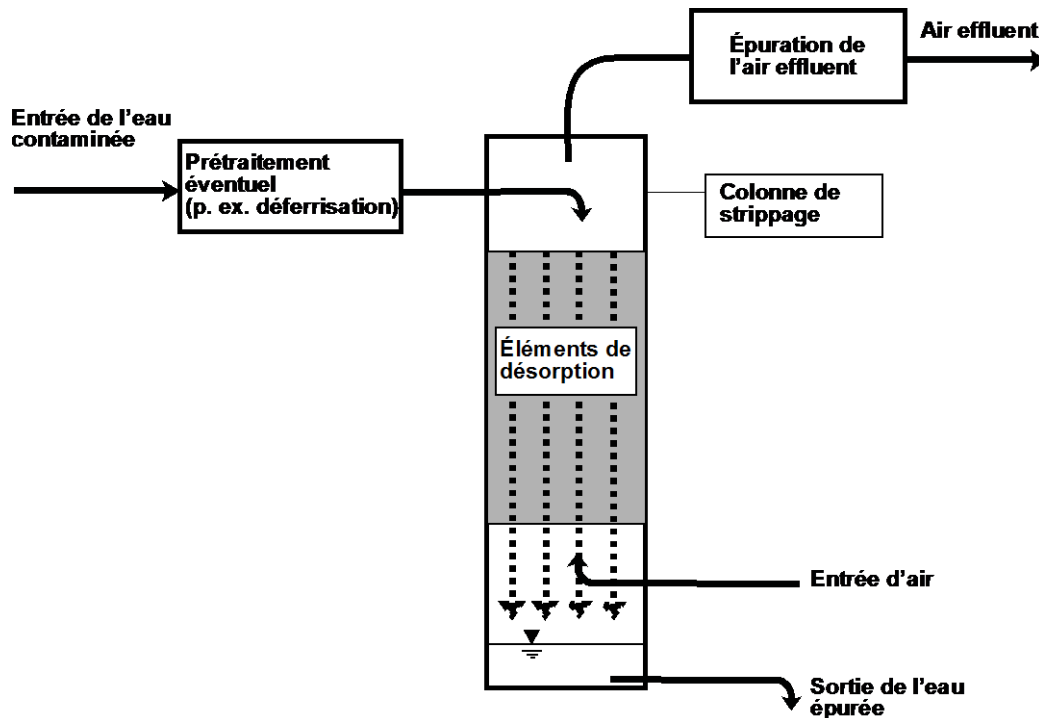


Schéma d'un procédé de traitement de l'eau dans une installation de strippage comprenant un dispositif d'épuration de l'air effluent et un dispositif de prétraitement éventuellement requis pour décalcifier ou pour déferrer l'eau.

### Modalités d'application

Milieu concerné	Eau
Polluants visés	<p>Polluants volatils, moyennement volatils ou autres polluants organiques, tels que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ HCHV (p. ex. dichlorométhane, dichloréthène, trichloréthane, trichloréthène, tétrachloréthène, chlorure de vinyle);</li> <li>▪ BTEX, naphthaline;</li> <li>▪ MTBE (dans une mesure restreinte);</li> <li>▪ composés azotés volatils (p. ex. ammoniac), hydrogène sulfuré.</li> </ul>

### Infrastructure requise

Assise plane, éventuellement raccordement aux égouts ou à un exutoire. Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.

### Suivi

- Suivi de l'eau et de l'air de strippage épurés (échantillonnage périodique ou enregistrement en continu).
- Suivi du fonctionnement de l'installation par télétransmission, avec annonce automatique des dysfonctionnements sur un réseau fixe ou mobile.

**Variantes**

Une colonne peut épurer de l'eau souterraine à raison de 0,25 m<sup>3</sup>/h (strippers compacts) à 500 m<sup>3</sup>/h (colonnes à garnissage). La mise en parallèle de colonnes permet d'obtenir des débits supérieurs. Lorsque les polluants ont une tension de vapeur faible, que l'eau est fortement polluée ou que l'épuration doit être très performante, des installations de strippage peuvent être mises en série (dispositif à deux paliers, superposés ou juxtaposés). L'eau souterraine doit éventuellement être prétraitée, par exemple pour en éliminer le fer et le manganèse ou pour en stabiliser les agents de dureté. L'air utilisé pour le strippage peut être mis en circuit pour diminuer le dépôt de calcaire dans l'installation, dans le but de ne pas perturber l'équilibre entre le calcaire et l'acide carbonique.

**Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires**

- Combinaison de l'installation de strippage avec tous les procédés d'épuration de l'air mentionnés (biofiltre/biolaveur, postcombustion catalytique ou thermique, filtre à charbon actif).
- Combinaison avec des installations de traitement de l'eau au charbon actif pour éliminer les HAP, les phénols et d'autres polluants organiques difficiles à stripper.
- Aspiration simultanée de l'air interstitiel pour éviter que les polluants de la zone insaturée du sol ne se dissolvent à nouveau dans l'eau souterraine.

**Évaluation et expérience pratique**

- Mesure d'assainissement correspondant à l'état de la technique, souvent éprouvée pour éliminer des polluants essentiellement volatils dans l'eau souterraine.
- Une tour de strippage permet d'obtenir des taux d'épuration supérieurs à 99 %.
- Danger d'entartrage dû à la précipitation de calcaire.
- Frais de réparation et d'entretien moyens à élevés.
- Frais énergétiques relativement élevés.

## 1.2 Oxydation (chimique ou photochimique par UV)

<b>Autres désignations</b>
En anglais: chemical oxidation, ultraviolet purification.
<b>Principe</b>
Sous l'effet de l'oxydation et du rayonnement ultraviolet (UV), les contaminants organiques ou inorganiques de l'eau sont détruits ou modifiés de telle sorte qu'ils puissent être éliminés de l'eau.
<b>Fonctionnement</b>
L'oxydation désigne une réaction chimique, souvent provoquée par l'oxygène, par laquelle des électrons sont retirés à d'autres éléments ou composés. Cette réaction entre l'oxygène et les polluants contenus dans l'eau est déclenchée par apport d'oxygène, d'ozone, de peroxyde d'hydrogène ou de permanganate, et peut être renforcée par des catalyseurs. Les substances organiques s'oxydent pour donner principalement du gaz carbonique (CO <sub>2</sub> ) et de l'eau (H <sub>2</sub> O), tandis que les substances inorganiques, comme le fer, forment des oxydes qui peuvent être précipités et ainsi retirés de l'eau. On peut aussi détruire des substances organiques par transformation photochimique, en les exposant à un rayonnement ultraviolet.
<b>Description technique</b>
<p><b>Oxydation à l'ozone:</b> l'ozone est introduit dans l'eau à traiter au travers de tubes, sous la forme de bulles de gaz finement réparties. Sa très grande réactivité le rend instable, si bien qu'il ne peut pas être stocké et est donc généralement fabriqué sur place. Pour produire de grandes quantités d'ozone (&gt;1 kg/h), il est de plus en plus fait recours à de l'oxygène technique ou à de l'air enrichi en oxygène.</p> <p><b>Oxydation au peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée):</b> à l'aide d'une pompe doseuse, le peroxyde d'hydrogène est</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ introduit directement en quantité adéquate dans le conduit d'eau à traiter où il est réparti uniformément par un mélangeur statique; ou</li> <li>▪ introduit dans l'eau à traiter au travers de tubes ou de tuyaux perforés.</li> </ul> <p>Le peroxyde d'hydrogène peut être stocké, contrairement à l'ozone, mais il est plus coûteux à fabriquer.</p> <p><b>Oxydation catalytique par voie humide:</b> dans ce procédé, de l'air comprimé (15 à 60 bars) à haute température (120 °C à 310 °C) est envoyé avec l'eau à épurer au-dessus d'un catalyseur à lit fixe résistant à l'eau. On utilise comme catalyseur des résines polymères, de l'oxyde d'aluminium, de l'oxyde de silicium, des zéolites ou du charbon actif. Ces composés adsorbent aussi bien l'oxygène ou un donneur d'oxygène que les polluants à leur surface, et l'oxydation catalytique se produit immédiatement dans la couche adsorbée. Ensuite, les produits d'oxydation sont détachés de la surface du catalyseur par désorption et ils doivent éventuellement être éliminés de l'eau.</p> <p><b>Rayonnement ultraviolet (UV):</b> le rayonnement UV est produit par des lampes à vapeur de mercure à basse pression. L'inactivation des microorganismes est la plus efficace à une longueur d'onde de 254 nm (transformation photochimique), qui provoque une modification photochimique des acides nucléiques empêchant les cellules de poursuivre leur division. Pour être efficace, une installation UV doit produire une dose de rayonnement ciblée d'au moins 25 mJ/cm<sup>2</sup>, qui est calculée à partir de la densité du flux de rayonnement. Celle-ci dépend de l'épaisseur de la couche d'eau, de sa turbidité et de la durée du rayonnement (temps de séjour de la cellule dans le rayonnement UV, tributaire de la vitesse d'écoulement).</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Eau.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Composants de nature organique présents dans l'eau usée tels que microorganismes;</li> <li>▪ substances inorganiques oxydables telles que cyanures, ammoniac, composés azotés, soufrés et de métaux lourds.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>	
Aucune exigence particulière concernant l'infrastructure, hormis une assise plane et les raccordements usuels (alimentation en électricité et en eau, éventuellement raccordement aux égouts). Les agents oxydants doivent être stockés d'une manière sûre et, le cas échéant, fabriqués dans des locaux spécialement sécurisés.	
<b>Variantes</b>	
S'il n'est pas nécessaire de dégrader intégralement les substances oxydables par voie chimique, l'apport d'air, la température et la pression régnant lors de l'oxydation peuvent être réduits, ce qui permet notamment de diminuer les frais d'exploitation.	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La combinaison d'une oxydation chimique (ozone, peroxyde d'hydrogène) suivie d'une épuration biologique (réacteur à lit fixe) ou d'une exposition à un rayonnement UV permet d'économiser jusqu'à 30 % sur les frais d'épuration par rapport à l'oxydation seule.</li> <li>▪ La répétition de la séquence ou le retour de l'effluent du processus d'épuration biologique en tête de l'étape d'oxydation permet d'économiser jusqu'à 10 % de plus sur les frais d'épuration.</li> <li>▪ Si le processus donne lieu à une précipitation oxydante, l'eau effluente doit encore être traitée par floculation et par décantation (bassin de décantation ou filtre).</li> </ul>	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les substances organiques peu dégradables peuvent être décomposées par l'oxydation en fragments plus aisément dégradables, susceptibles d'être éliminés lors des étapes d'épuration ultérieures.</li> <li>▪ Le procédé d'oxydation catalytique par voie humide présente l'avantage d'être très facilement automatisable, d'occuper une surface au sol relativement restreinte et d'être adaptable aux variations de la vitesse d'écoulement et de la composition de l'eau effluente. La demande chimique en oxygène (DCO) est réduite de 75 % à 99 % par rapport à l'oxydation normale par voie humide et tant les eaux usées légèrement polluées (DCO &lt;5000 mg/l) que les eaux très concentrées (DCO de 10 000 jusqu'à &gt;100 000 mg/l) peuvent être traitées.</li> <li>▪ Le traitement par rayonnement UV est considéré comme efficace et sûr; il n'altère ni le goût, ni la couleur, ni l'odeur de l'eau.</li> <li>▪ Les performances des installations d'épuration de l'eau en termes de débits sont très variables: elles peuvent traiter entre 1 m<sup>3</sup>/h et plusieurs centaines de m<sup>3</sup> par heure.</li> <li>▪ Ces procédés, souvent éprouvés, correspondent à l'état de la technique. Des fabricants des installations requises sont implantés dans tous les pays d'Europe.</li> </ul>	

### 1.3 Adsorption au charbon actif

<b>Autres désignations</b>
En anglais: granulated activated carbon (GAC).
<b>Principe</b>
Le charbon actif (CA) élimine par adsorption des substances organiques très volatiles et peu volatiles (HCHV, BTEX, MTBE; ozone, chlore, substances colorantes et odorantes) dans les eaux souterraines polluées ou dans les eaux usées. L'adsorption au charbon actif humide est surtout appropriée pour épurer des eaux souterraines et des eaux de lixiviation renfermant des quantités relativement faibles de polluants organiques et de métaux lourds (assainissement par pompage et traitement et par confinement hydraulique).
<b>Fonctionnement</b>
<p>L'adsorption est le processus inverse de la désorption, ce qui signifie que les polluants dissous dans un liquide n'en sont pas retirés par stripping – un changement de phase de l'état dissous à l'état gazeux –, mais liés physiquement à un matériau solide finement réparti dans le liquide. Autrement dit, des molécules de taille variable sont piégées à la surface d'autres molécules ou complexes moléculaires.</p> <p>Le matériau adsorbant le plus couramment utilisé dans le cadre du traitement de l'eau est le charbon actif. Chaque grain comprend d'innombrables pores et capillaires aux parois desquelles les substances à éliminer se lient physiquement. La superficie de ces parois, dite «surface interne», est de l'ordre de 500 à 1500 m<sup>2</sup>/g pour le charbon actif.</p>
<b>Description technique</b>
On peut soit introduire le charbon actif directement dans l'eau à épurer, soit faire passer cette eau à travers des récipients remplis de charbon actif. On utilise le plus souvent du charbon actif en grains, le plus facile à retirer ou à échanger. En règle générale, l'eau polluée passe directement sur le charbon actif humide en traversant un ou plusieurs récipients disposés en série.
<b>Schéma du procédé</b>
<p>Le schéma illustre le processus de traitement de l'eau par adsorption au charbon actif. L'eau contaminée entre par l'entrée de l'eau contaminée, passe par un prétraitement éventuel, puis est dirigée vers un filtre épurant. L'eau passe ensuite à travers un filtre de sécurité. Les deux filtres contiennent du charbon actif. L'eau épurée sort du filtre de sécurité.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Eau.
Polluants visés	<p>Les substances suivantes peuvent être éliminées par du charbon actif:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ substances odorantes et aromatiques;</li> <li>▪ hydrocarbures;</li> <li>▪ composés chlorés organiques (p. ex. solvants);</li> <li>▪ produits phytosanitaires;</li> <li>▪ substances humiques;</li> <li>▪ HCHV, BTEX, HAP, phénols.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>	
Assise plane, raccordement électrique.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Échantillonnage: le contrôle régulier de l'eau épurée permet de détecter à temps toute défaillance du filtre par saturation du charbon actif, qui peut alors être changé.</li> <li>▪ Enregistrement en continu: suivi du fonctionnement de l'installation par télétransmission, avec annonce automatique des dysfonctionnements sur un réseau fixe ou mobile.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mise en œuvre d'autres matériaux adsorbants (p. ex. argile ou zéolites).</li> <li>▪ Filtration en plusieurs étapes appliquant des charbons actifs particuliers ou sélectifs.</li> </ul>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pour que le charbon actif soit le plus efficace, il faut bien épurer l'eau avant le stade d'adsorption proprement dit, sinon sa capacité à éliminer des substances à l'état de traces baisse notablement du fait de la capture de particules en suspension et de l'adsorption concurrente d'autres substances contenues dans l'eau (p. ex. déferrisation préalable ou stabilisation des agents de dureté).</li> <li>▪ Pour éviter de trop solliciter le filtre à charbon actif, on insère généralement un filtre de sable ou de gravier avant le stade de l'épuration, afin d'éliminer les particules en suspension et précipitées.</li> <li>▪ Le charbon actif humide est souvent utilisé en combinaison avec d'autres procédés comme filtre de sécurité pour éliminer d'éventuelles contaminations résiduelles (p. ex. à l'aval d'une installation de strippage).</li> <li>▪ L'air interstitiel est aspiré simultanément pour éviter que les polluants de la zone insaturée du sol ne se dissolvent à nouveau dans l'eau souterraine.</li> </ul>	



**Évaluation et expérience pratique**

- Le procédé de l'adsorption de polluants dissous dans l'eau à l'aide de charbon actif, souvent éprouvé, correspond à l'état de la technique. Il est appliqué dans le monde entier et des fournisseurs (concepteurs et fabricants) sont représentés dans tous les pays.
- Avantages de ce système conventionnel très simple d'épuration de l'eau:
  - application presque universelle,
  - coût d'achat très modeste,
  - directement applicable sans tests préalables,
  - manipulations très simples,
  - fiabilité élevée.

## 1.4 Précipitation/floculation/filtration

Autres désignations	
En anglais: precipitation, flocculation, filtration.	
Principe	
<p>Avant ou après le traitement par oxydation, rayonnement UV ou épuration biologique, l'eau polluée fait l'objet d'une précipitation au moyen de sels de fer, de chaux hydratée et d'un floculant. Cette phase consiste principalement à retirer de l'eau effluente les substances en suspension et précipitées, les substances inorganiques dissoutes et les substances peu ou pas biodégradables, parmi lesquelles on trouve notamment une série de colorants.</p>	
Fonctionnement	
<p><b>Précipitation:</b> elle consiste à transformer les substances dissoutes dans l'eau en composés totalement ou partiellement insolubles, par réaction avec un agent précipitant. Ce procédé est appliqué pour extraire des ions métalliques, des sulfures et des phosphates et pour adoucir l'eau. Le précipité obtenu, à l'état colloïdal, est converti par floculation en une forme séparable.</p> <p><b>Floculation:</b> elle commence par une phase de coagulation. Pour que les colloïdes finement répartis puissent être séparés efficacement, il faut former les plus gros flocons possibles à partir de ces petites particules. Ce processus est favorisé par l'ajout de floculants minéraux ou organiques, artificiels ou naturels.</p> <p><b>Filtration:</b> les flocons sont finalement retirés de l'eau par sédimentation, filtration ou flottation.</p>	
Description technique	
<p><b>Précipitation:</b> ce procédé chimique qui transforme des composés dissous en substances insolubles par l'ajout de produits chimiques appropriés – les sels de fer et d'aluminium comptent parmi les agents précipitants les plus utilisés – se déroule dans des cuves à réaction équipées d'un agitateur ou d'un mélangeur statique. Le produit résultant de cette opération peut être séparé au terme d'une floculation par un procédé physique approprié (sédimentation, flottation, filtration). En présence d'agents complexants (composés organiques ou inorganiques liant des ions métalliques), il peut être nécessaire de faire précipiter les sulfures. Les anions perturbateurs sont précipités sous forme de sels (sels de calcium, de fer ou d'aluminium).</p> <p><b>Floculation:</b> une grande partie des particules en suspension (colloïdes) formées au terme d'une réaction de précipitation sont si petites qu'elles ne peuvent pas être séparées. La formation de flocons est obtenue, à un pH spécifique, par l'addition d'un coagulant (p. ex. chlorure de fer, sulfate d'aluminium, hydroxyde de calcium), puis d'un floculant (p. ex. polyélectrolyte [PE]). La présence de gros flocons permet de procéder à une séparation solide-liquide par sédimentation (bassin de décantation, clarificateur à surface inclinée) ou par filtration (filtre à silice avec rinçage à contre-courant).</p>	
Modalités d'application	
Milieu concerné	Eau.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Métaux lourds (cations de métaux lourds, chromates, arsenic);</li> <li>▪ matières en suspension;</li> <li>▪ agents de dureté.</li> </ul>

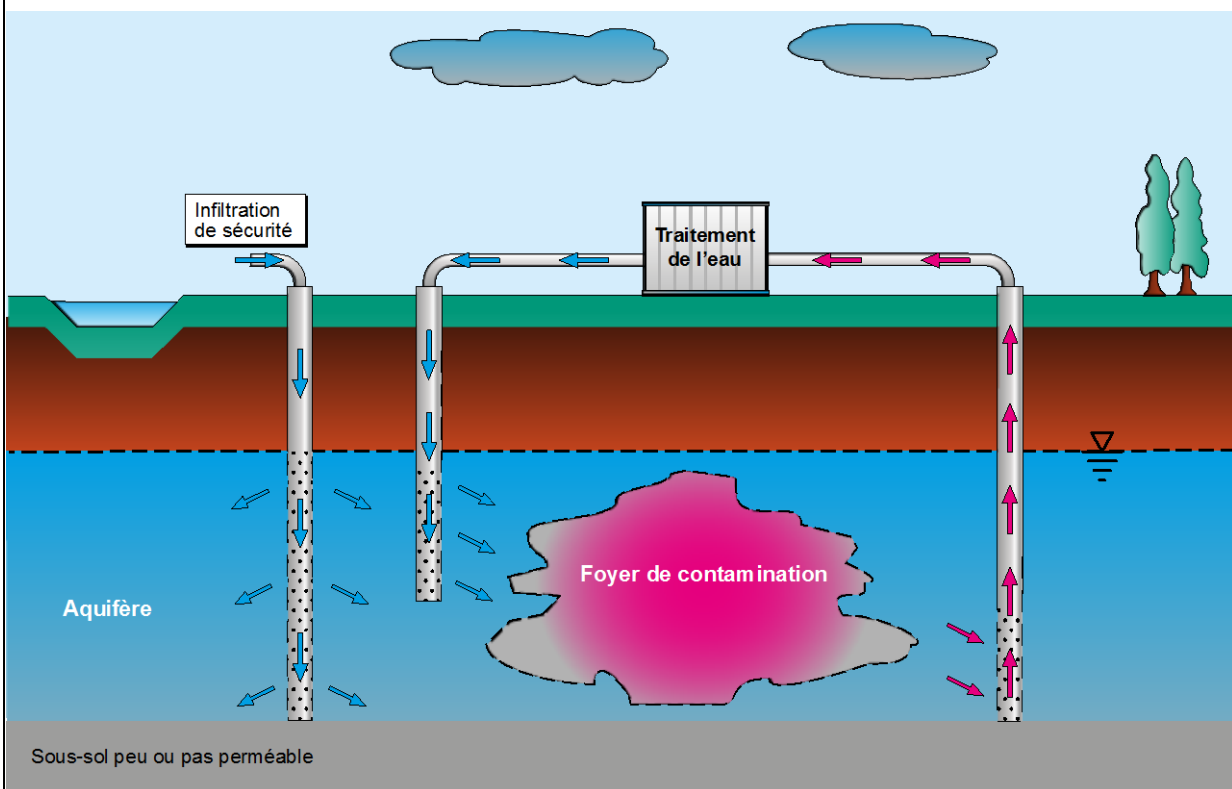
<b>Infrastructure requise</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assise plane, lieu de stockage sûr des produits chimiques, emplacement accessible aux véhicules de transport.</li> <li>▪ Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.</li> <li>▪ Réservoirs de stockage des boues séparées.</li> <li>▪ Le cas échéant, place pour les installations de traitement des boues (épaississeur, filtre-pressé, décanteur, dessiccateur).</li> </ul>
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de l'eau épurée, par échantillonnage ou enregistrement en continu (p. ex. pH, turbidité).</li> <li>▪ Détection des baisses de pression au niveau du filtre (installation automatique ou manuelle de rinçage à contre-courant).</li> <li>▪ Suivi du fonctionnement de l'installation par télétransmission, avec annonce automatique des dysfonctionnements sur un réseau fixe ou mobile.</li> </ul>
<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Filtration par un filtre à lit fixe équipé d'échangeurs d'ions inorganiques.</li> <li>▪ En lieu et place d'un filtre-pressé cellulaire, il est possible d'utiliser une centrifugeuse ou un décanteur.</li> <li>▪ Si aucune substance sédimentable n'est présente au terme de la floculation, on peut pratiquer une séparation par flottation.</li> <li>▪ Pour accélérer le processus de séparation lors de la flottation, les agglomérats sont chargés de bulles de gaz, tandis que l'eau claire s'écoule dans la partie inférieure de la cuve.</li> </ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<p>Les composés organiques doivent être dégradés par voie oxydative ou biologique avant ou après la précipitation/floculation.</p>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Ce procédé est éprouvé depuis de nombreuses années dans toutes sortes de cas de figure. Il correspond à l'état de la technique. Des concepteurs et des fabricants ont des représentants dans tous les pays d'Europe.</p>

## 1.5 Traitement biologique

<b>Autres désignations</b>
<p>Traitement biochimique de l'eau effluente.</p> <p>En anglais: biological wastewater treatment.</p>
<b>Principe</b>
<p>Le traitement biologique des eaux polluées consiste à faire dégrader les contaminants organiques qu'elles contiennent. La dégradation oxydative est assurée par des microorganismes (bactéries et champignons) en présence d'oxygène dissous. Il en résulte des composés inorganiques (gaz carbonique CO<sub>2</sub>, eau H<sub>2</sub>O) et une biomasse qui ne peut pas être dégradée davantage. Des procédés anaérobies sont également mis en œuvre.</p> <p>Les procédés hydrauliques in situ sont souvent combinés avec des installations aériennes de traitement de l'eau souterraine en circulation. La dégradation microbienne des polluants organiques est accélérée par une optimisation ciblée du milieu à l'intérieur de ces installations, le secteur contaminé du sol et l'eau souterraine étant mieux alimentés en oxygène et en substances nutritives.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>Le traitement biologique de l'eau effluente est également un procédé biochimique car, outre les processus de biodégradation, les métabolites (produits intermédiaires de la transformation biochimique) peuvent aussi être soumis à des réactions chimiques. Dans les processus aérobies, l'oxygène nécessaire est apporté par l'air dans l'eau à traiter. Dans les processus anaérobies, des conditions de dégradation réductrices sont établies en empêchant l'oxygène de pénétrer (p. ex. dénitrification, traitement des boues digérées).</p> <p>L'épuration biologique de l'eau polluée n'est pas perturbée tant que les microorganismes n'entrent pas en contact avec des acides, des bases et d'autres substances nocives et tant que, outre l'eau polluée, ils reçoivent constamment de la nourriture et de l'oxygène technique ou d'autres accepteurs d'électrons (nitrate, fer, CO<sub>2</sub>, etc.) en quantité suffisante. Les installations mécano-biologiques de traitement de l'eau bien dimensionnées et exploitées soigneusement sont à même d'épurer les eaux polluées dans une très large mesure.</p>
<b>Description technique</b>
<p><b>Procédé hors site:</b> l'eau souterraine contaminée est pompée en surface depuis un puits de captage et acheminée dans une installation d'épuration biologique. Un séparateur intercalé retire les huiles et un système d'aération vigoureuse garantit un degré de saturation élevé en oxygène dans l'eau chargée de substances nutritives. L'installation d'épuration biologique peut être constituée d'un lit percolateur, dans lequel l'épuration de l'eau est réalisée à l'aide de microorganismes aérobies fixés sur du matériel solide («lit bactérien»).</p> <p><b>Procédé in situ:</b> après avoir été épurée biologiquement dans le bioréacteur aérien, l'eau dépolluée, mais chargée de substances nutritives et de microorganismes, est réinjectée dans le sol, au-dessus du panache de pollution. La répartition lente des microorganismes et des substances nutritives dans la zone saturée et dans la zone insaturée induit en plus un assainissement in situ de l'eau souterraine. La biodégradation se produit là où la pollution se trouve dans le sol et dans l'eau souterraine, car les procédés microbiologiques in situ utilisent le sous-sol local comme un véritable bioréacteur. Si l'aquifère est profond, des lances d'aération sont mises en place pour assurer une oxygénation suffisante sur toute la hauteur du secteur contaminé. L'air atmosphérique peut être soit</p>

aspiré soit pulsé à travers la zone contaminée au moyen d'une pompe à vide ou par une technique d'injection (souffleurs). L'air capté dans le sol peut être acheminé vers un biofiltre ou un filtre à charbon actif pour être épuré.

### Schéma du procédé



### Modalités d'application

Milieu concerné	Eau polluée.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hydrocarbures pétroliers;</li> <li>▪ composés d'hydrocarbures halogénés;</li> <li>▪ BTEX;</li> <li>▪ essence;</li> <li>▪ kérosène;</li> <li>▪ naphtaline;</li> <li>▪ phénols;</li> <li>▪ ammonium, ammoniac, nitrate, nitrite.</li> </ul>

### Infrastructure requise

Assise plane. Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.

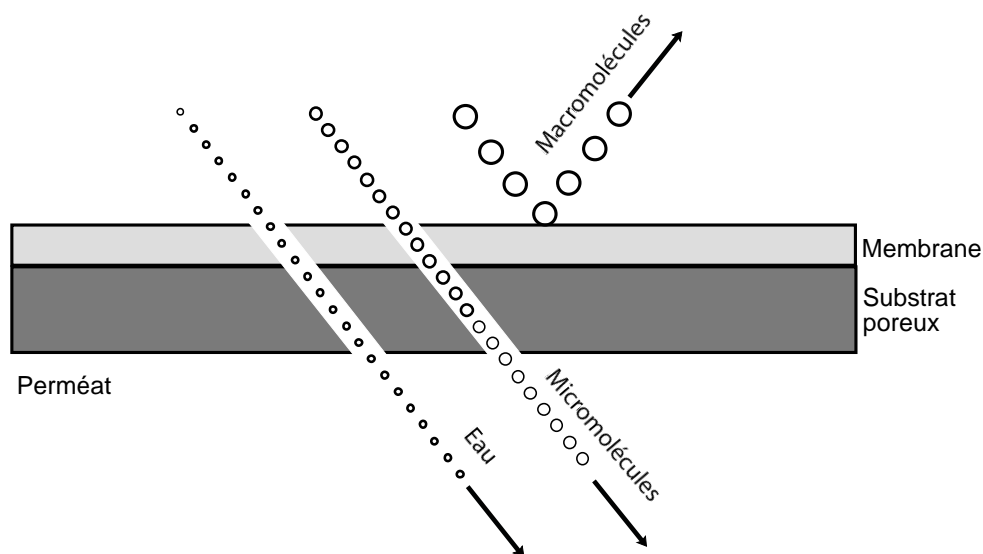
Récipients pour les boues excédentaires et place pour une éventuelle installation de traitement des boues.

<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Suivi de l'eau épurée quittant l'installation hors site (échantillonnage ou enregistrement en continu).</li><li>▪ Suivi du fonctionnement de l'installation par télétransmission, avec annonce automatique des dysfonctionnements sur un réseau fixe ou mobile.</li><li>▪ Des points de contrôle tels que piézomètres sont installés en complément aux puits de captage et d'infiltration et aux éventuelles lances d'aération. L'avancement de l'assainissement, soit le déroulement de la dégradation microbienne des polluants, est suivi en déterminant la pollution résiduelle dans l'eau souterraine et dans le sol au moyen de forages carottés permettant de prélever des échantillons représentatifs.</li></ul>
<b>Variantes</b>
La combinaison de secteurs de traitement aérobies et anaérobies permet d'épurer l'eau plus complètement (p. ex. nitrification et dénitrification).
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ces procédés sont souvent mis en œuvre en combinaison avec une mesure de bioventilation ou de biobarbotage.</li><li>▪ La combinaison avec un système d'aspiration active de l'air interstitiel permet de traiter également les polluants volatils.</li><li>▪ L'eau doit éventuellement faire l'objet d'un prétraitement ou d'un post-traitement par floculation et précipitation ou par filtration</li><li>▪ En présence de polluants volatils dissous, il faut parfois utiliser des bioréacteurs fermés et épurer l'air effluent.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Mesure d'assainissement correspondant à l'état de la technique, éprouvée pour éliminer des polluants biodégradables contenus dans l'eau souterraine et dans la zone saturée du sol.</li><li>▪ Mesure d'assainissement de moyenne à longue durée, requérant un investissement technique moyen à élevé.</li><li>▪ Suivi continu nécessaire.</li><li>▪ Frais de réparation et d'entretien faibles à moyens.</li><li>▪ Procédé adapté au traitement in situ d'un sous-sol sableux et graveleux, applicable sous réserve aux superpositions de couches géologiques de perméabilités différentes.</li><li>▪ Les lentilles géologiques de matériel fin sont souvent insuffisamment lessivées, aussi des foyers de pollution subsistent-ils dans ces zones peu perméables.</li></ul>

## 1.6 Techniques à membranes

<b>Autres désignations</b>
<p>Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse.</p> <p>En anglais: microfiltration, ultrafiltration (UF), nanofiltration, reverse osmosis (OR).</p>
<b>Principe</b>
<p>Les membranes agissent comme des filtres retenant les composés organiques et inorganiques contenus dans l'eau à épurer lorsqu'elle traverse la membrane.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>On désigne comme techniques à membranes les procédés dans lesquels l'eau à épurer est forcée à travers une membrane poreuse ou non poreuse. Il existe plusieurs processus qui diffèrent essentiellement par le type de membrane:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ microfiltration;</li> <li>▪ ultrafiltration;</li> <li>▪ nanofiltration;</li> <li>▪ osmose inverse.</li> </ul> <p>La microfiltration et l'ultrafiltration font appel à des membranes poreuses, la nanofiltration et l'osmose inverse à des membranes non poreuses. Plus les particules, colloïdes, molécules ou ions sont petits, plus la pression appliquée doit être forte. La pression exercée lors de l'osmose inverse doit être suffisamment élevée pour surmonter la différence de pression osmotique entre l'eau polluée et l'eau épurée. Les petites molécules d'eau franchissent la membrane (diamètre des pores entre 0,01 et 1 000 µm) pour former le «perméat», tandis que les contaminants sont arrêtés pour constituer un «rétentat» très concentré.</p>
<b>Description technique</b>
<p>Pour des raisons de résistance des matériaux, la pression exercée lors de l'osmose inverse est généralement limitée à 65 bars, mais elle peut monter à 120 bars selon le système mis en œuvre. Le processus de séparation au niveau de la membrane est assuré par une couche active épaisse de seulement quelque 0,2 µm. Un substrat poreux sous-jacent de 0,2 mm d'épaisseur procure une résistance suffisante à l'ensemble. Le taux de concentration dépend de la pression exercée, qui doit toujours nettement dépasser la pression osmotique. Les filtres revêtent la forme de modules membranaires tubulaires, plans ou spiraux. Une unité de construction prête à l'emploi (module) comporte plusieurs membranes. Plusieurs modules sont assemblés pour former un bloc. Les blocs sont équipés de dispositifs de rinçage et de nettoyage ainsi que de pompes permettant de les mettre en œuvre. Les installations à membranes comprennent soit une seule étape, soit plusieurs montées en série. Le matériel filtrant se compose d'acétate de cellulose, de polyamide ou de polyamide-hydrazide.</p>

### Schéma du procédé



### Modalités d'application

Milieu concerné

Eau polluée ou salée.

Polluants visés

- Polluants organiques;
- métaux lourds;
- composés phosphorés;
- composés azotés (NH<sub>3</sub>);
- sels dissous;
- pesticides, substances humiques, virus, germes, peintures et agents de dureté.

### Limites d'application

- Pour que ce processus fonctionne, il est essentiel de traiter préalablement l'émulsion, qui doit contenir le moins de matières solides que possible.
- L'émulsion ne doit pas non plus contenir de substances susceptibles de provoquer un encroûtement de la membrane (blocage) ou de l'attaquer (sont nuisibles: le chlore libre, l'oxygène libre, les acides, les bases et les bactéries).

### Infrastructure requise

- Assise plane, encoffrement de l'installation.
- Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.

### Suivi

- Suivi du fonctionnement de l'installation par télétransmission, avec annonce automatique des dysfonctionnements sur un réseau fixe ou mobile.
- Les paramètres d'exploitation essentiels pour l'effet épurant de l'installation (pression, température, pH) doivent faire l'objet d'un suivi.



**Variantes**

Les modules sont généralement subdivisés en plusieurs blocs soumis à une rotation interne. Cela permet d'atteindre des vitesses d'écoulement élevées et de prévenir ainsi la formation de dépôts et d'encroûtements. Le danger d'encroûtement croît dans l'ordre suivant: modules tubulaires – modules spiraux – modules plans. Le concentrat («rétentat») est habituellement éliminé par évaporation ou par séchage.

**Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires**

Les procédés à membranes peuvent être combinés avec des installations de filtration conventionnelles ou avec des échangeurs d'ions selon l'effet épurateur souhaité.

**Évaluation et expérience pratique**

Les procédés mettant en œuvre des membranes sont souvent utilisés pour traiter l'eau d'usage ou de boisson, pour la dessaler ou l'adoucir ou pour épurer l'eau de percolation dans une décharge. Ils correspondent à l'état de la technique, mais ils ne sont pas encore très répandus dans le traitement de l'eau souterraine.

## 2. Traitement de l'air

### 2.1 Adsorption au charbon actif

Autres désignations	
<p>Traitement au charbon actif sec pour épurer du gaz (par opposition au traitement au charbon actif humide pour épurer de l'eau).</p> <p>En anglais: adsorption with activated carbon/charcoal (GAC).</p>	
Principe	
<p>Le charbon actif (CA) élimine par adsorption des substances organiques volatiles et peu volatiles qui polluent l'air effluent. Il est utilisé pour épurer l'air issu de strippage ainsi que l'air interstitiel. Le charbon actif pollué peut ensuite être régénéré à la vapeur, réactivé ou éliminé d'une manière respectueuse de l'environnement.</p>	
Fonctionnement	
<p>Les polluants contenus dans l'air sous forme gazeuse sont liés physiquement au charbon actif en parcourant une colonne d'adsorption. Autrement dit, des molécules de taille variable sont piégées à la surface d'autres molécules ou complexes moléculaires.</p>	
Description technique	
<p>Le matériel adsorbant le plus couramment utilisé dans le cadre du traitement de l'air est le charbon actif. Chaque grain comprend d'innombrables pores et capillaires aux parois desquelles les substances à éliminer se lient physiquement. La surface de ces parois, dite «surface interne», est de l'ordre de 500 à 1500 m<sup>2</sup>/g pour le charbon actif.</p>	
Modalités d'application	
Milieus concernés	Air effluent, air interstitiel, gaz effluents.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Substances odorantes et aromatiques;</li> <li>▪ hydrocarbures;</li> <li>▪ composés chlorés organiques (p. ex. solvants);</li> <li>▪ HCHV, BTEX, MTBE, HAP, HCCV, phénols;</li> <li>▪ métaux lourds à l'état gazeux (Hg, Cd), seulement avec du charbon actif spécial.</li> </ul>
Infrastructure requise	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assise plane, éventuellement raccordement aux égouts.</li> <li>▪ Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.</li> </ul>	
Suivi	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Enregistrement en continu, de préférence en aval de deux filtres au charbon actif montés en série ou entre ces deux filtres.</li> <li>▪ Échantillonnage: le contrôle régulier de l'air effluent épuré permet de détecter à temps toute défaillance du filtre par saturation du charbon actif, qui peut alors être changé.</li> </ul>	

<b>Variante</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ L'air interstitiel peut être chauffé pour en évaporer l'eau résiduelle avant l'entrée dans le filtre à charbon actif.</li><li>▪ Dispositif de régénération du charbon actif à la vapeur installé sur le site.</li></ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Pour que le fonctionnement du charbon actif soit le plus efficace, il faut retirer l'eau de l'air et extraire les poussières avant la phase d'adsorption proprement dite.</li><li>▪ Les filtres au charbon actif sont souvent utilisés en combinaison avec d'autres procédés (p. ex. à l'aval d'une installation de traitement thermique ou en association avec d'autres étapes de filtration) pour éliminer d'éventuelles contaminations résiduelles.</li><li>▪ Un filtre à charbon actif dit de sécurité est placé à la fin de la chaîne de traitement lorsqu'il faut craindre des pertes de polluants dans les dispositifs de filtration situés en amont.</li><li>▪ Outre des compresseurs à canal latéral de diverses puissances, il peut être fait usage de pompes à vide ou de ventilateurs.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Procédé souvent éprouvé qui correspond à l'état de la technique. Des fabricants ont des représentants dans tous les pays d'Europe.</li><li>▪ Il est possible de récupérer les polluants adsorbés et de régénérer le charbon actif sur place ou dans des installations spéciales.</li><li>▪ Avantages de ce système conventionnel et très simple d'épuration de l'air:<ul style="list-style-type: none"><li>○ application presque universelle,</li><li>○ coût d'achat très modeste,</li><li>○ directement applicable sans tests préalables,</li><li>○ manipulations très simples,</li><li>○ fiabilité élevée.</li></ul></li></ul>

## 2.2 Oxydation thermique et oxydation catalytique

<b>Autres désignations</b>
En anglais: thermal treatment, catalytic degasification / treatment of exhaust gases.
<b>Principe</b>
L'oxydation thermique et l'oxydation catalytique détruisent les substances organiques et inorganiques contenues dans l'air ou les modifient de manière à ce qu'on puisse les extraire de l'air.
<b>Fonctionnement</b>
<p>L'oxydation désigne une réaction chimique, souvent provoquée par l'oxygène, par laquelle des électrons sont retirés à d'autres éléments ou composés. La postcombustion thermique requiert des températures de l'ordre de 900 °C (650 à 1050 °C) et un temps de séjour suffisant dans la chambre de combustion.</p> <p>L'utilisation de catalyseurs permet d'abaisser notablement la température nécessaire pour entretenir la réaction entre l'oxygène et les polluants de l'air. Dans les deux cas, les substances organiques sont oxydées en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en eau (H<sub>2</sub>O), mais elles laissent des résidus tels que HCl, HF, SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub>, qui réagissent de manière très acide avec la vapeur d'eau. Les polluants inorganiques sous forme gazeuse sont susceptibles de former des oxydes ou d'autres composés qui peuvent être extraits de l'air dans un dispositif d'épuration installé en aval dans le cas favorable.</p>
<b>Description technique</b>
<p><b>Oxydation thermique:</b> l'oxydation thermique ou postcombustion est un procédé idéal et éprouvé du point de vue de la qualité de l'air, car les polluants présents dans l'air effluent sous forme gazeuse, à part les oxydes d'azote, le soufre, les halogènes et les métaux lourds, peuvent être transformés complètement en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en eau (H<sub>2</sub>O). Dans le cas le plus simple, la postcombustion thermique peut être pratiquée dans des incinérateurs existants (p. ex. chaufferie). Sinon, il peut être nécessaire d'ajouter des combustibles auxiliaires pour atteindre la température nécessaire. L'air interstitiel pollué, par exemple par des solvants, est introduit par un ventilateur dans une chaudière thermorésistante construite spécialement, où il est incinéré par exposition à une flamme ouverte générée par un brûleur à mazout ou à gaz. Un échangeur de chaleur placé en aval permet de récupérer l'énergie de la combustion pour préchauffer l'air interstitiel.</p> <p><b>Oxydation catalytique:</b> les catalyseurs sont des substances intervenant dans des réactions sans être consommées par celles-ci. Ils abaissent l'énergie d'activation nécessaire à la réaction et accélèrent cette dernière sans modifier son équilibre. On nomme ici «catalyseur» le support enduit de la substance catalytique active. Ce support est habituellement constitué de céramique, dont l'intérieur des pores est revêtu de substance catalytique. Dans l'épuration des gaz, le revêtement actif est le plus souvent composé de métaux ou de composés métalliques.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Air interstitiel, air effluent.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Essence;</li> <li>▪ hydrocarbures organiques (COV);</li> <li>▪ hydrocarbures pétroliers;</li> <li>▪ polluants odorants;</li> <li>▪ kérosène;</li> <li>▪ phénols;</li> <li>▪ BTEX;</li> <li>▪ MTBE.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assise plane, cheminée, citerne ou alimentation en gaz.</li> <li>▪ Les raccordements usuels (électricité, eaux, etc.) devraient être assurés.</li> </ul>	
<b>Suivi</b>	
<p>Pour pouvoir évaluer l'effet épurant de l'installation et surveiller la qualité de l'air rejeté, il est impératif de contrôler l'air à épurer et l'air épuré, en continu et par échantillonnages ponctuels pratiqués à intervalles prédéfinis. Les mesures en continu sont par exemple effectuées au moyen d'un détecteur à photo-ionisation (PID) ou d'un détecteur à ionisation de flamme (FID). Pour contrôler l'effet épurateur d'une telle installation, il suffit souvent de mesurer un paramètre somme (carbone organique).</p>	
<b>Variantes</b>	
<p>Le traitement thermique doit habituellement être suivi d'une ou plusieurs étapes d'absorption visant à extraire les fumées nocives contenant des oxydes de soufre, des composés azotés, de l'acide chlorhydrique ou de l'acide fluorhydrique (cf. point 2.4).</p>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<p>L'incinération thermique et l'incinération catalytique ne sont économiquement rationnelles que lorsque la concentration des polluants dans l'air interstitiel ou dans l'air effluent est très élevée. Le traitement thermique peut être suivi d'une étape d'adsorption.</p>	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
<p><b>En règle générale:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ procédés très efficaces;</li> <li>▪ la composition de l'air à traiter doit être connue;</li> <li>▪ perte de pression faible;</li> <li>▪ processus facilement pilotables;</li> <li>▪ la présence de cheminées peut être mal tolérée.</li> </ul> <p><b>Spécificités de l'oxydation catalytique:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ température inférieure à celle d'autres procédés thermiques, d'où problèmes de matériaux moindres, chauffage plus rapide, etc.;</li> <li>▪ certains composés chimiques sont difficiles à dégrader par voie catalytique;</li> <li>▪ tout catalyseur peut être contaminé.</li> </ul>	

Le traitement thermique correspond à l'état de la technique. L'air interstitiel est généralement traité en appliquant l'un ou l'autre procédé catalytique, parce qu'ils engendrent des frais d'exploitation moindres et que le dispositif de traitement de l'air effluent positionné en aval est techniquement plus simple à concevoir.

## 2.3 Épuration biologique des effluents gazeux

<b>Autres désignations</b>
<p>Traitement biochimique de l'air, biofiltre.</p> <p>En anglais: biological waste air treatment.</p>
<b>Principe</b>
<p>L'épuration biologique des effluents gazeux consiste à faire dégrader les contaminants organiques solubles qu'ils contiennent par des microorganismes (bactéries et champignons), en présence d'oxygène (oxydation biologique). Il en résulte des composés inorganiques (gaz carbonique CO<sub>2</sub>, eau H<sub>2</sub>O) et une biomasse.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>Contrairement au traitement biologique des eaux usées, celui de l'air effluent exige que les substances à épurer passent de la phase gazeuse à la phase liquide avant de pouvoir être dégradées. Ce processus nécessite généralement un apport d'eau. Les substances dissoutes dans l'eau fournissent l'énergie nécessaire aux microorganismes. En principe, ils peuvent consommer tous les composés organiques, mais avec des vitesses de dégradation très variables. En outre, certains microorganismes sont capables d'oxyder le H<sub>2</sub>S et le NH<sub>3</sub>, composés inorganiques nauséabonds, en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> d'odeur neutre. L'épuration biologique de l'air n'est pas perturbée tant que les microorganismes n'entrent pas en contact avec des acides, des bases ou d'autres substances toxiques et tant que l'air à traiter leur apporte constamment de la nourriture et de l'oxygène en suffisance.</p>
<b>Description technique</b>
<p><b>Biofiltre:</b> un ventilateur insuffle l'air à traiter à travers un lit filtrant composé de matériel organique humecté. Les composés gazeux à éliminer sont dissous dans le film humide entourant ce support, d'où ils peuvent être ingérés par les microorganismes et dégradés – en parallèle à la dégradation lente du support organique, indépendante des composants gazeux. Le matériel du lit fournit de la nourriture, des sels nutritifs et de l'eau aux microorganismes. Il doit être changé après quelques années, car sa dégradation induit une augmentation de la fraction fine, et par conséquent une baisse de pression. L'humidité du filtre est maintenue par un humidificateur placé en amont.</p> <p><b>Biolaveur:</b> un ventilateur insuffle l'air à traiter dans le laveur. Les contaminants qu'il contient sont dissous dans de l'eau. Les polluants dissous sont ensuite dégradés par des microorganismes, soit dans un bassin à boues activées placé en aval (station d'épuration), soit par aspersion d'un lit bactérien (biofilm fixé sur un support solide) placé dans le laveur même. Les biolaveurs sont nettement moins volumineux que les biofiltres travaillant en conditions similaires. Mais les microorganismes peuvent obstruer le lit bactérien et les gicleurs tandis que le gaz carbonique, l'eau et les sous-produits de dégradation acides (SO<sub>x</sub>, HCl, HF, etc.) générés la plupart du temps sont susceptibles d'endommager ces éléments, c'est pourquoi il est nécessaire de réguler le pH.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Air interstitiel, air effluent.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Essence;</li> <li>▪ hydrocarbures organiques (COV);</li> <li>▪ hydrocarbures pétroliers;</li> <li>▪ kérosène;</li> <li>▪ phénols;</li> <li>▪ BTEX;</li> <li>▪ polluants et autres substances odorantes, etc.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assise plane, accès.</li> <li>▪ Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.</li> </ul>	
<b>Suivi</b>	
<p><b>En règle générale:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température comprise entre 10 et 40 °C (des installations spécialement adaptées permettent d'atteindre des températures jusqu'à 55 °C).</li> <li>▪ Humidité &gt;0,9 (cette valeur correspond à une humidité relative de l'air effluent de 90 % au voisinage des microorganismes).</li> <li>▪ pH approximativement neutre (des pH très acides sont utiles pour dégrader des composés soufrés inorganiques).</li> <li>▪ Ne supporte pas l'introduction de gaz stérilisants (ces composés ont un effet toxique sur les microorganismes et les détruisent).</li> <li>▪ Le rapport C:N:P doit être adapté (il peut s'avérer très important lors du traitement d'air pollué par des solvants, mais il ne présente aucun problème lorsqu'il s'agit d'éliminer des odeurs).</li> <li>▪ L'alimentation en O<sub>2</sub> doit être suffisante (aucun processus ne fonctionne à une teneur inférieure à 13 %).</li> <li>▪ Suivi en continu de l'air et de l'eau effluents.</li> </ul> <p><b>Spécificités des biolaveurs:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nécessité de limiter l'apport d'azote ou d'installer un dispositif de rinçage mécanique (pour prévenir les engorgements par la biomasse).</li> <li>▪ Nécessité de réguler le pH (neutralisation des sous-produits acides de la dégradation microbienne).</li> <li>▪ Nécessité d'installer une déviation partielle du flux et de conditionner l'eau de lavage.</li> <li>▪ Contrôle et régulation de l'alimentation en azote et en phosphore.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<p><b>Réacteur à lit arrosé:</b> il est très similaire au biofiltre. La différence réside dans l'utilisation d'un matériel filtrant inerte à durée de fonctionnement «illimitée» et pertes de pression réduites. Ce matériel ne peut pas stocker d'humidité, c'est pourquoi il doit être arrosé d'eau, additionnée éventuellement de sels nutritifs (engrais pour les microorganismes).</p>	



### Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires

**Biofiltre:** selon l'utilisation prévue, l'air à traiter doit être conditionné avant d'atteindre le biofiltre. Des laveurs spéciaux sont utilisés pour satisfaire aux exigences concernant la séparation des poussières, la température de l'air et l'humidité ambiante.

**Biolaveur:** dans la plupart des cas d'épuration biologique de l'air effluent, celui-ci contient toutes sortes de substances en faibles concentrations, parfois peu solubles. C'est pourquoi il doit souvent être prétraité par un biolaveur placé en amont du biofiltre. Outre la fonction de prétraitement, ce biolaveur joue également le rôle d'humidificateur et permet de réduire le volume du biofiltre en fonction de l'efficacité du prétraitement.

### Évaluation et expérience pratique

- Installations éprouvées pour éliminer des polluants biodégradables contenus dans l'air interstitiel et dans l'air rejeté par les installations de traitement de l'eau. Ce procédé correspond à l'état de la technique.
- Mesure d'assainissement de moyenne à longue durée, requérant un investissement technique moyen à élevé.
- Frais de réparation et d'entretien faibles à moyens.
- Procédé applicable uniquement aux polluants biodégradables.
- **Biofiltre extensif:** requiert un investissement modeste, mais demande beaucoup de place.
- **Filtre en conteneurs:** très fiable, peu d'emprise au sol, écoulement homogène, protection contre les influences environnementales, possibilité d'empiler des modules.
- Les biofiltres (en particulier pour les flux importants d'air effluent) et les biolaveurs se sont avérés fiables pour éliminer des hydrocarbures organiques et des polluants odorants.

## 2.4 Absorption pour épurer les effluents gazeux issus d'un processus thermique

Autres désignations
<p>Lavage des gaz, absorption à sec.</p> <p>En anglais: chemical absorption, wet scrubber.</p>
Principe
<p>Les gaz acides contenus dans l'air effluent sont extraits par un liquide de lavage ou liés chimiquement à des particules solides dans un réacteur. Il se produit entre ces gaz et les particules solides basiques ou les ions alcalins contenus dans l'eau de lavage une réaction chimique qui forme des sels. Les systèmes d'absorption à sec sont suivis d'un séparateur de poussières, tandis que les systèmes par voie humide sont aussi en mesure d'extraire les poussières (métaux lourds) et les aérosols (acides, métaux lourds).</p>
Fonctionnement
<p>Dans un système d'absorption par voie sèche ou humide, l'absorption est tributaire de la densité des particules ou gouttes et de leur taille.</p> <p><b>Par voie sèche:</b> la matière absorbante est habituellement de l'hydroxyde de calcium <math>\text{Ca}(\text{OH})_2</math> sous forme de poudre. Les gaz acides réagissent avec lui pour former des sels.</p> <p><b>Par voie humide:</b> la solubilité des gaz acides dans l'eau de lavage (qui dépend du gradient de pression partielle) joue aussi un rôle crucial dans l'absorption. Les gaz bien solubles (p. ex. le HCl) peuvent être neutralisés par de la chaux hors de la colonne de lavage; les gaz peu solubles (p. ex. les <math>\text{SO}_x</math>) sont neutralisés directement dans l'installation de lavage avec de la soude caustique (NaOH) pour éviter la formation de gypse, susceptible d'engorger le réacteur.</p>
Description technique
<p><b>Par voie sèche:</b> les gaz à épurer sont injectés dans un réacteur suivi d'un séparateur de poussières. À l'intérieur du réacteur, des particules d'hydroxyde de calcium <math>\text{Ca}(\text{OH})_2</math> sont injectées dans le flux de gaz. Les gaz nocifs sont absorbés par les molécules d'hydroxyde de calcium et ils réagissent avec elles pour former à leur surface des sels, lesquels se détachent en partie sous l'effet de la dilatation thermique induite par la chaleur dégagée lors des réactions. La surface des particules d'hydroxyde de calcium s'en trouve partiellement régénérée. L'efficacité de la réaction dépend étroitement de la surface de contact, du temps de séjour et de la teneur en eau des fumées. Lorsque la quantité de gaz fluctue beaucoup, l'installation doit être exploitée avec un fort excédent de matière absorbante (facteur stœchiométrique de 1,5 à 3) afin de respecter les valeurs assignées au gaz épuré. Différents appareils sont utilisés comme chambres de réaction (réacteur cyclonique, venturi à lit fluidisé extensible). Les produits de réaction sont extraits au moyen d'un filtre à poussières, à la surface duquel se produit une nouvelle réaction. Une partie des résidus est souvent remise en circulation afin d'optimiser l'utilisation de l'hydroxyde de calcium pour neutraliser les gaz nocifs.</p> <p><b>Par voie humide:</b> l'air interstitiel aspiré dans le site contaminé est habituellement introduit directement dans l'installation de lavage, qui ressemble à une machine à laver. Le système de lavage (colonne à garnissage ou à pulvérisation) comprend trois stades au maximum:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ extraction du HCl et du HF dans un bain d'acide;</li> <li>▪ extraction des oxydes de soufre dans un bain neutre (neutralisé par de la soude caustique);</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ extraction des poussières et des aérosols.</li> </ul> <p>Dans le cas usuel, le flux d'eau parcourt le système de lavage dans le sens opposé aux gaz, puis l'eau de lavage est neutralisée avec de la chaux dans une installation d'épuration des eaux usées et traitée. Les opérations de précipitation et de floculation fournissent une boue et une eau usée chargée en sels.</p>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Air issu d'une installation de traitement thermique de l'air effluent.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ HCl, HF, HI, HBr, SO<sub>x</sub>;</li> <li>▪ oxyde d'éthylène (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O), silanes (SiH<sub>4</sub>), amines, ammoniac (NH<sub>3</sub>);</li> <li>▪ solvants organiques volatils (COV);</li> <li>▪ aérosols (Hg, HCl, sels);</li> <li>▪ poussières organiques et inorganiques;</li> <li>▪ poussières de métaux lourds.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assise plane, éventuellement raccordement aux égouts, stockage sûr des produits chimiques et des substances résiduelles (sous forme de matière solide ou de boue).</li> <li>▪ Les raccordements usuels (électricité, eau, etc.) devraient être assurés.</li> </ul>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contrôle de l'air effluent.</li> <li>▪ Contrôle de l'eau effluente.</li> <li>▪ Suivi de la température (p. ex. à l'entrée du laveur).</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<p>Sorption à sec avec des produits chimiques sous forme de poudre, absorption presque à sec avec des produits chimiques liquides dont la part d'eau est entièrement évaporée durant le processus et absorption par voie humide (lavage des gaz), qui requièrent une installation onéreuse de traitement des eaux effluentes. Le matériau résiduel le plus courant est du gypse.</p>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tout réacteur ou système de lavage doit être combiné avec un séparateur de poussières ou d'aérosols.</li> <li>▪ Tout système de lavage doit comprendre une installation de traitement des eaux effluentes, ce qui n'est pas le cas pour les deux variantes «à sec».</li> <li>▪ L'élimination des résidus doit être garantie.</li> </ul>	

### Évaluation et expérience pratique

- Mesure d'assainissement éprouvée pour débarrasser l'air effluent de polluants pouvant être absorbés.
- Procédé applicable à l'épuration de l'air interstitiel seulement en aval d'une installation Katox ou d'un procédé d'incinération thermique.
- Frais de réparation et d'entretien faibles à moyens.
- Risque d'engorgement (par voie sèche: si les produits de réaction sont humides; par voie humide: risque de blocage).
- Les séparateurs par absorption sont utilisés dans toutes sortes de domaines depuis les années 1950 (industrie chimique, sidérurgie, incinération des déchets, etc.).
- Les séparateurs correspondent à l'état de la technique.
- Procédés et installations relativement coûteux.