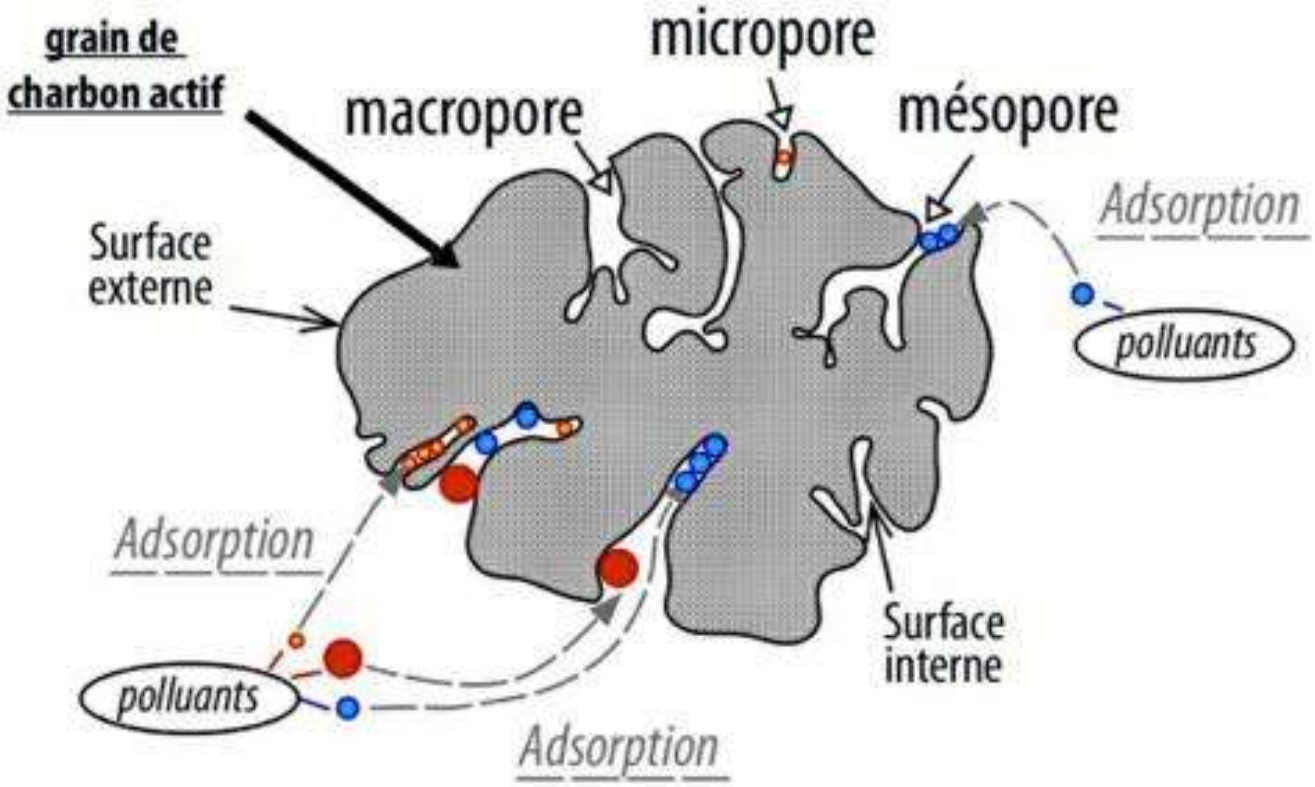
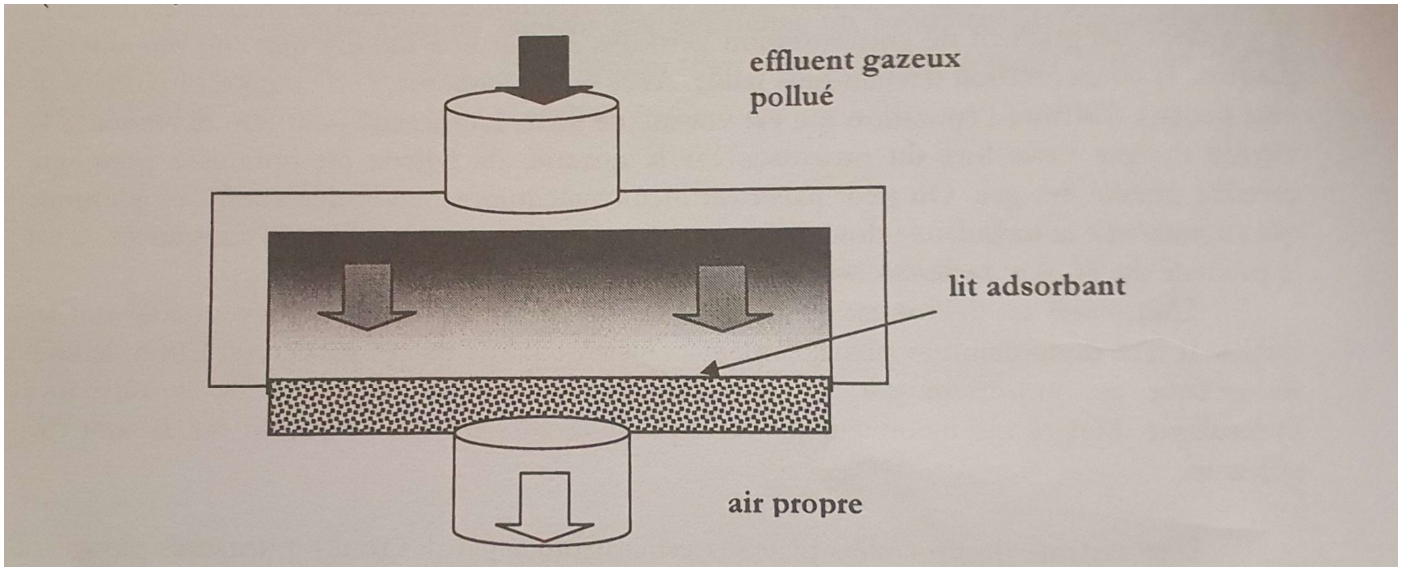
2/Adsorption des polluants de l’air

L’adsorption est un processus par lequel les molécules de gaz se fixent à la surface d'un solide, formant un film mince.

Ce processus peut être utilisé pour purifier l'air en piégeant des polluants


grain de
charbon actif
micropore
macropore
mésopore
Surface
externe
Adsorption
polluants
Adsorption
polluants
Surface
interne
Adsorption


effluent gazeux
pollué
lit adsorbant
air propre

A/Transfert gaz-solide

Le terme d'« adsorption » est utilisé pour décrire les phénomènes de transport et de transfert dans la phase gazeuse et la porosité du matériau ainsi que des interactions avec la surface du solide

Le transfert gaz-solide est un processus par lequel des composés gazeux interagissent avec une surface solide, que ce soit pour être adsorbés sur cette surface ou réagir chimiquement.

Exemples

Elimination des composés organiques volatils (COV)

Sont des polluants courants, provenant de différentes sources.

Pour éliminer ces **COV** de l'air, des matériaux adsorbants tels que le charbon actif sont souvent utilisés. Le charbon actif possède **une grande surface spécifique** et une forte capacité d'adsorption, ce qui lui permet de piéger efficacement les COV lorsqu'ils passent à travers un lit de charbon actif.

Élimination des odeurs : Les mauvaises odeurs dans l'air peuvent être causées par divers composés organiques volatils, gaz sulfureux ou autres substances odorantes.

Pour éliminer ces odeurs, des matériaux adsorbants tels que **le charbon actif ou des zéolithes** peuvent être utilisés.

Ces matériaux adsorbent les molécules responsables des odeurs, réduisant ainsi leur concentration dans l'air et améliorant la qualité de l'air intérieur.

	Adsorbant			
Polluant	*Charbons actifs*	*Alumine active*	*Gels de silice*	*Zéolithes*
Hydrocarbures	X	X	X	
Hydrocarbures halogénés	X		X	
Composés soufrés	X	X		X
Solvants	X			

le charbon actif peut éliminer aussi

Les polluants en gaz

Ammoniac : Utilisé dans les produits de nettoyage et les engrais.
Dioxyde de soufre (SO_2) : Produit par la combustion de combustibles fossiles.
Ozone (O_3) : Un polluant secondaire formé par des réactions chimiques dans l'atmosphère.
Monoxyde de carbone (CO) : Produit par la combustion incomplète de carburants.

le charbon actif peut éliminer

Produits chimiques industriels

Solvants : Utilisés dans les industries de la peinture, des revêtements, et des nettoyants industriels.
Pesticides et herbicides : Utilisés dans l'agriculture et les applications domestiques.

B/L'adsorption multicomposée

L'adsorption multicomposée fait référence au processus d'adsorption où **plusieurs composés gazeux sont présents dans l'air** et sont simultanément adsorbés sur la surface d'un adsorbant.

Contrairement à l'adsorption monocomposée, où un seul composé est adsorbé, l'adsorption multicomposée implique des interactions complexes entre plusieurs composés gazeux et la surface de l'adsorbant.

Compétition

Lorsque plusieurs composés sont présents dans l'air, ils peuvent compétitionner pour les sites actifs disponibles sur la surface de l'adsorbant.
Les composés les plus réactifs ou ayant la plus grande affinité pour l'adsorbant peuvent être adsorbés en priorité, tandis que d'autres peuvent être adsorbés à des taux plus lents ou être exclus du processus d'adsorption.

Désorption sélective

Lors de la régénération de l'adsorbant, les différents composés adsorbés peuvent être désorbés sélectivement en fonction de leurs propriétés physico-chimiques.
Des techniques de régénération spécifiques peuvent être utilisées pour libérer sélectivement certains composés adsorbés tout en préservant les autres.

Paramètres qui influence sur l’adsorption

Nature de l'adsorbant : Les propriétés physico-chimiques de l'adsorbant, telles que sa surface spécifique, sa composition chimique, sa porosité et sa structure cristalline, jouent un rôle crucial dans le processus d'adsorption.

Un adsorbant avec une grande surface spécifique et une structure poreuse bien développée aura une capacité d'adsorption plus élevée.

Nature des composés polluants : Les propriétés des composés gazeux à adsorber, telles que leur **taille moléculaire**, **leur polarité**, leur **masse moléculaire** et leur **température**, influent sur leur affinité pour l'adsorbant.

Concentration des polluants

Plus la concentration du gaz pollué est élevé plus la capacité d'adsorption est élevé

Pression et température

La pression et la température de l'air influencent également l'adsorption.

En général, une augmentation de la pression partielle des composés gazeux ou une diminution de la température favorise l'adsorption. Cependant, ces effets peuvent varier en fonction des propriétés spécifiques de l'adsorbant et des composés à adsorber.

Humidité de l'air

La présence d'eau dans l'air peut compétitionner avec les composés à adsorber pour les sites actifs sur la surface de l'adsorbant. Dans certains cas, l'humidité peut favoriser l'adsorption en facilitant la formation de liaisons hydrogène, tandis que dans d'autres cas, elle peut inhiber l'adsorption en bloquant les sites actifs.

Temps d'exposition

La durée pendant laquelle l'air est en contact avec l'adsorbant influence également l'efficacité de l'adsorption.

Un temps d'exposition plus long peut permettre une adsorption plus complète des composés gazeux, mais il peut également conduire à la saturation de l'adsorbant.

Présence d'autres composés dans l'air

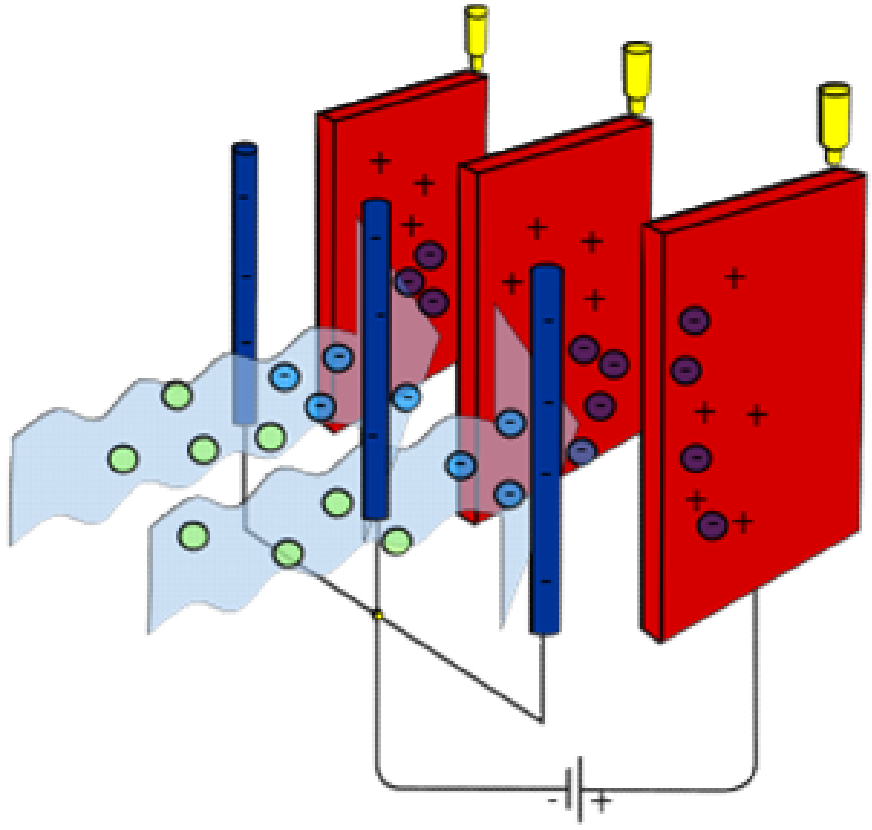
La présence d'autres composés dans l'air peut également influencer l'adsorption en compétitionnant pour les sites actifs sur la surface de l'adsorbant ou en modifiant les interactions entre les composés adsorbés et l'adsorbant.

3/Dépollution des particules électrofiltres

Il est constitué de deux plaques ou deux cylindres concentriques en métal, on applique entre les plaques (ou cylindres) **une différence de potentiel**. L'air pollué traverse l'espace entre les plaques.

Les particules se chargent électriquement et vont se coller et s'accumuler sur l'une des plaques par un système de raclage on recueille les poussières

Le système est extrêmement efficace pour les grosse particules >3µm



3/Oxydation thermique

L'oxydation thermique est un procédé couramment utilisé pour traiter les effluents gazeux contenant des composés organiques volatils (COV) et d'autres polluants atmosphériques.

L'oxydation thermique repose sur la combustion des polluants organiques présents dans les gaz à traiter. Ce processus transforme les COV et autres substances nocives en produits moins nocifs, principalement du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O), par une réaction chimique avec l'oxygène (O_2) à haute température.

Étapes du processus

Préchauffage : Les effluents gazeux sont d'abord préchauffés pour atteindre la température d'oxydation requise.

Chambre de combustion : Les gaz préchauffés sont ensuite introduits dans une chambre de combustion où ils sont portés à des températures élevées, généralement comprises entre 700 et 1 200°C.

Oxydation : À ces températures, les COV et autres polluants réagissent avec l'oxygène pour former du CO_2 et de l'H_2O. La réaction chimique est la suivante :

$$\mathbf{COV + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + chaleur}$$

Épuration des gaz : Les gaz traités sont ensuite refroidis et peuvent passer par des systèmes de filtration pour éliminer les particules et autres résidus avant d'être rejetés dans l'atmosphère.

autre exemple traiter l'ammoniac (NH_3) en azote (N2)

$$4NH_3+3O_2\rightarrow 2N_2+6H_2O$$

4/Oxydation catalytique

Un catalyseur en traitement de l'air est un dispositif qui augmente la vitesse de réactions chimiques spécifiques, aidant à transformer des polluants atmosphériques en produits moins nocifs sans être consommée par la réaction elle-même.

Les catalyseurs sont largement utilisés dans divers procédés de contrôle de la pollution de l'air, notamment dans les systèmes de purification des gaz d'échappement des véhicules et les installations industrielles.

Types de Catalyseurs

Catalyseurs à Base de Métaux Précieux

Platine (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh) : Souvent utilisés dans les pots catalytiques des voitures, ces métaux sont efficaces pour l'oxydation des hydrocarbures et du CO ainsi que pour la réduction des NOx.

Catalyseurs à Base de Métaux de Transition

Vanadium (V), Tungstène (W), Titane (Ti) : Utilisés principalement dans les systèmes SCR pour la réduction des NOx.

Catalyseurs à Base d'Oxyde Métallique

Oxyde de Cuivre (CuO), Oxyde de Fer (Fe_2O_3) : Utilisés dans certaines applications d'oxydation.

Exemple

$$2NO_2+4NH_3+O_2 \rightarrow 3N_2+6H_2O$$

5/Bioprocédés en traitement de l’air

Les bioprocédés en traitement de l'air sont des techniques qui utilisent **des organismes vivants**, principalement (bactéries, champignons, algues, moisissures, levures), pour **éliminer ou transformer les polluants** présents dans l'air pour leurs propre biosynthèse et comme source d'énergie.

Ces procédés sont basés sur la capacité des micro-organismes à dégrader les polluants gazeux en des substances moins nocives ou inoffensives comme le dioxyde de carbone, l'eau et des biomasses microbiennes.

Les procédés biologiques sont utilisés pour éliminer les composants indésirables des rejets gazeux industriels au moyen de micro-organismes.

Les gaz passent au travers de couches de matériaux filtrants sur lesquelles des micro-organismes ont été déposés.

Après le passage des polluants dans le matériau filtrant, les micro-organismes consomment les polluants et les transforment en produits inoffensifs tels que le dioxyde de carbone, l'eau et les sels minéraux.

Les principaux types de processus biologiques dans le traitement de l'air sont:

- Les biofiltres
- Les lits bactérients
- Les biolaveurs

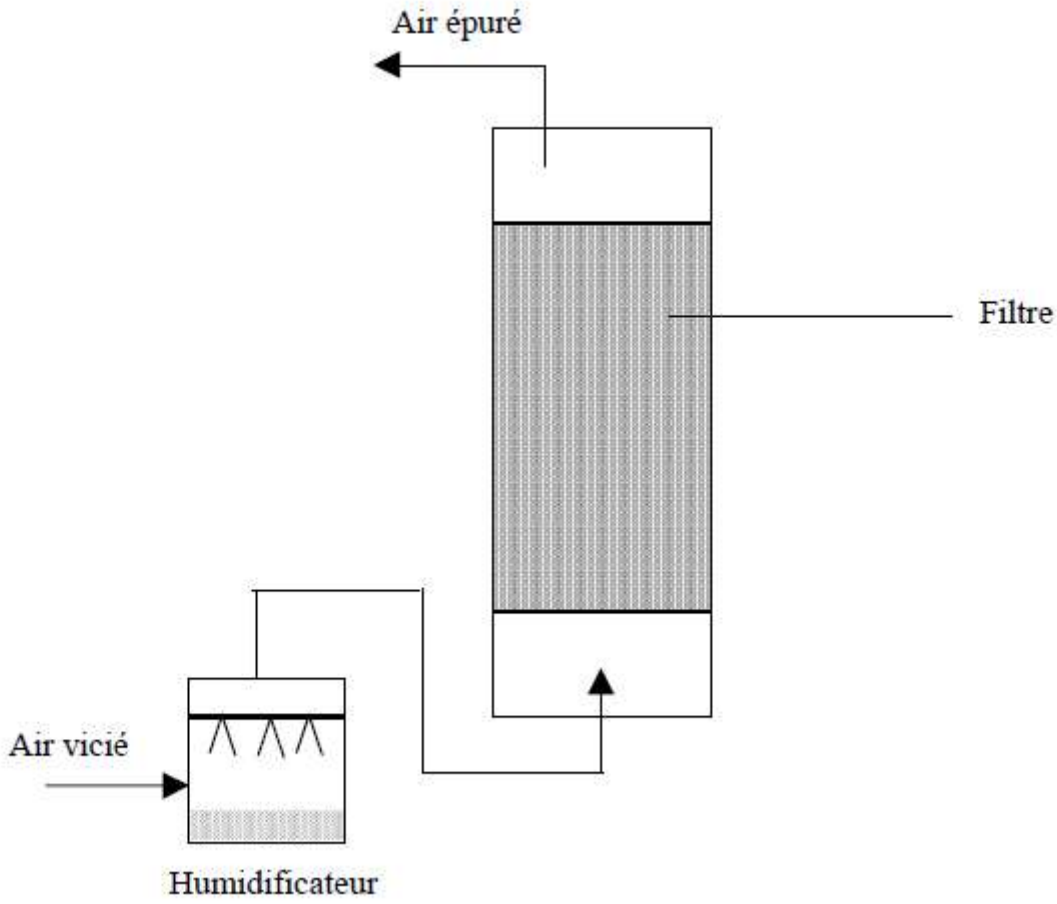
Inspirés des installations classiquement utilisées en traitement et épuration des eaux, les systèmes appliqués au traitement biologique de l'air sont équipés de réacteurs contenant la biomasse (X), libre ou supportée.

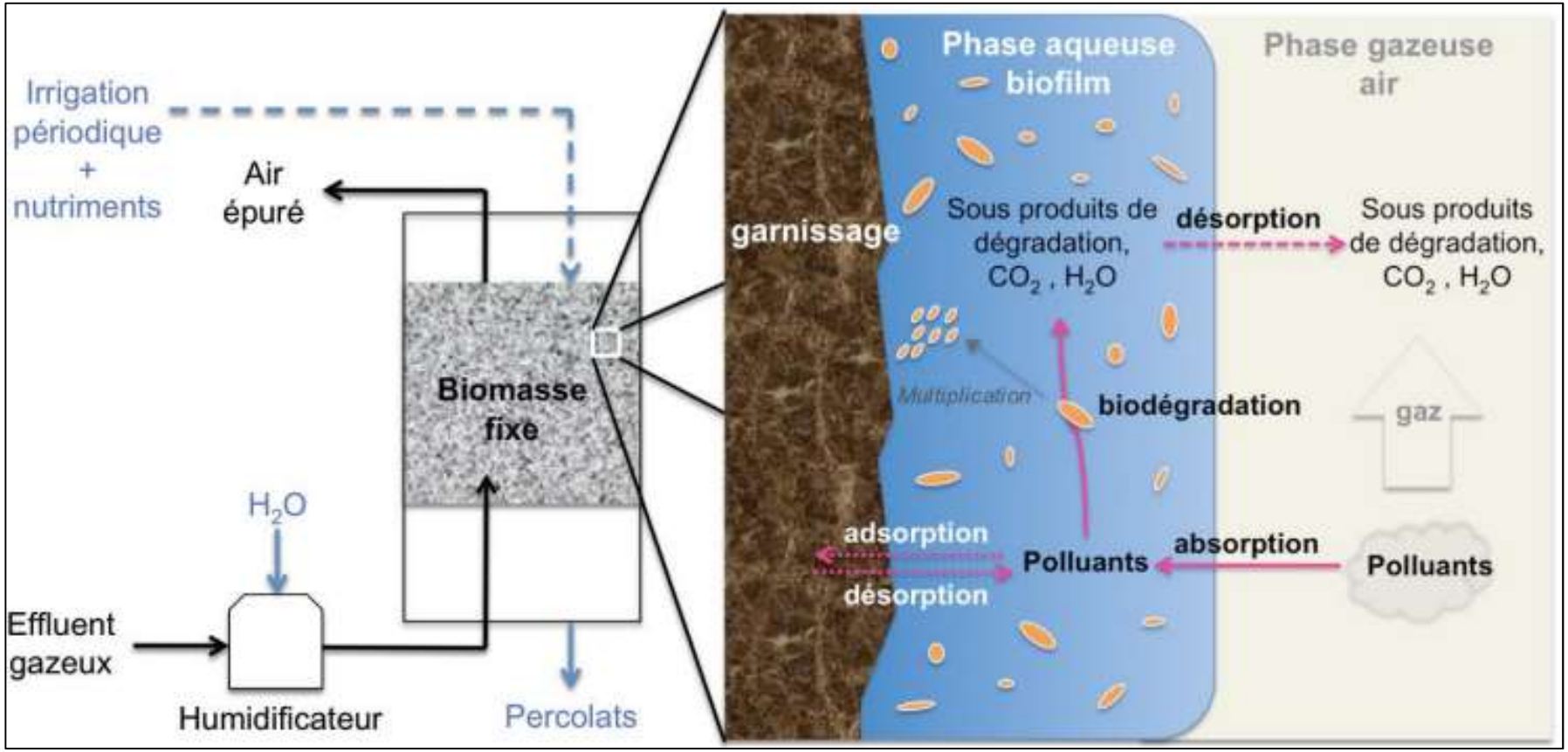
A/Biofiltres

Le biofiltre est un système composé d'un matériau de garnissage qui est constitué du compost, de la tourbe…, sur lequel se déposent des microorganismes formant un biofilm. La phase aqueuse de ce système est donc immobile.

L'air pollué traverse un lit de support solide où des biofilms de microorganismes se développent. Les polluants sont dégradés par les microorganismes.

Dans ces bioréacteurs, la biomasse est ainsi fixée et la phase aqueuse immobile. Un apport de nutriments complémentaire est parfois nécessaire afin d'éviter une baisse de l'activité biologique. Pour cette même raison, le maintien d'un certain taux d'humidité du filtre est indispensable et est réalisé par un arrosage séquentiel, ou par l'humidification préalable des effluents gazeux à traiter.


Air épuré
Filtre
Air vicié
Humidificateur


Irrigation
périodique
+
nutriments
Air
épuré
Biomasse
fixe
H_2O
Effluent
gazeux
Humidificateur
Percolats
garnissage
Phase aqueuse
biofilm
Phase gazeuse
air
Sous produits de
dégradation,
CO_2 , H_2O
désorption
Sous produits
de dégradation,
CO_2 , H_2O
Multiplication
biodégradation
gaz
adsorption
désorption
Polluants
absorption
Polluants

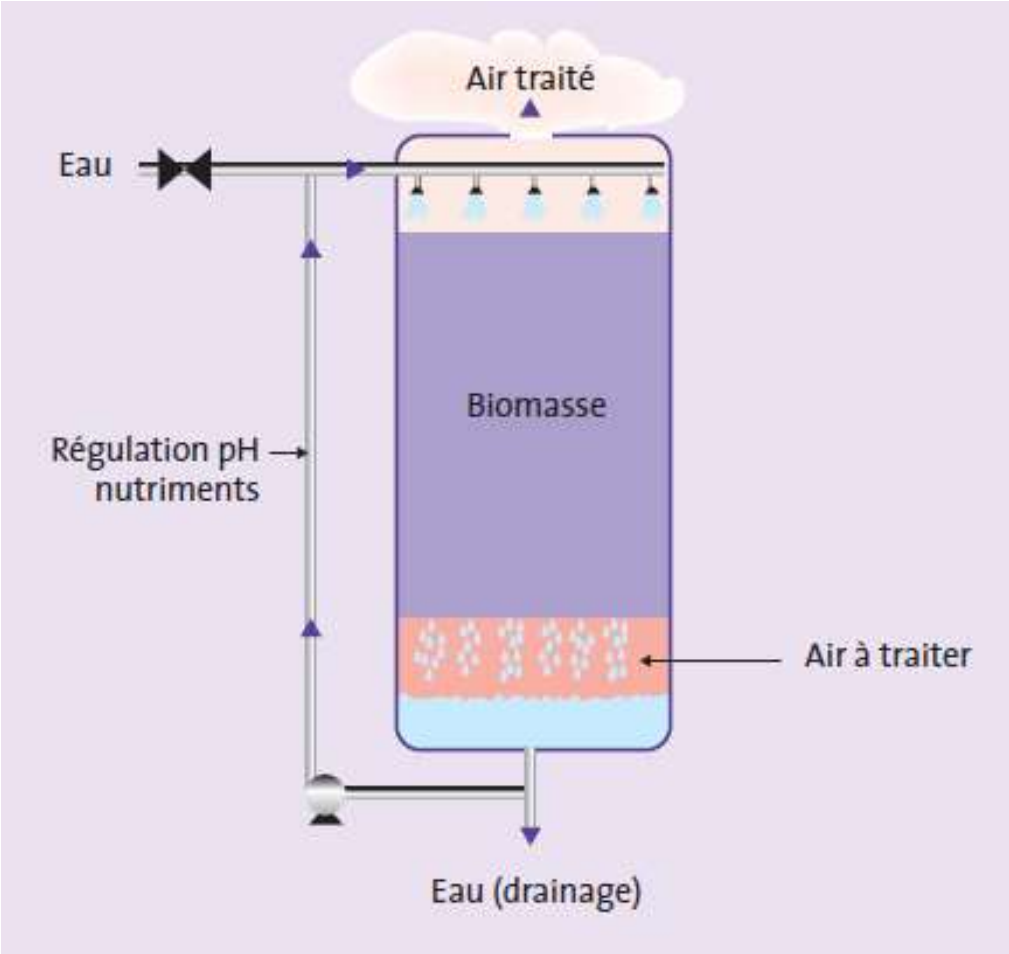
Des prétraitement sont à prévoir comme l'humidification du flux a traiter, le dépoussiérage, le dévésiculage, un refroidissement éventuel ou un réchauffage, un lissage des débits et des concentrations, ce type de dispositif à une durée de vie de 3 à 5 ans

B/Filtres percolateurs

Combine l'adsorption physique des polluants sur un support solide et la dégradation biologique par des micro-organismes.

Ils sont composés d’un seul compartiment avec une biomasse immobilisée, c'est-à-dire, des microorganismes en forme de biofilm.
Les microorganismes adhèrent à un matériau de garnissage souvent synthétique, par lequel circule en continue, une
solution nutritive.

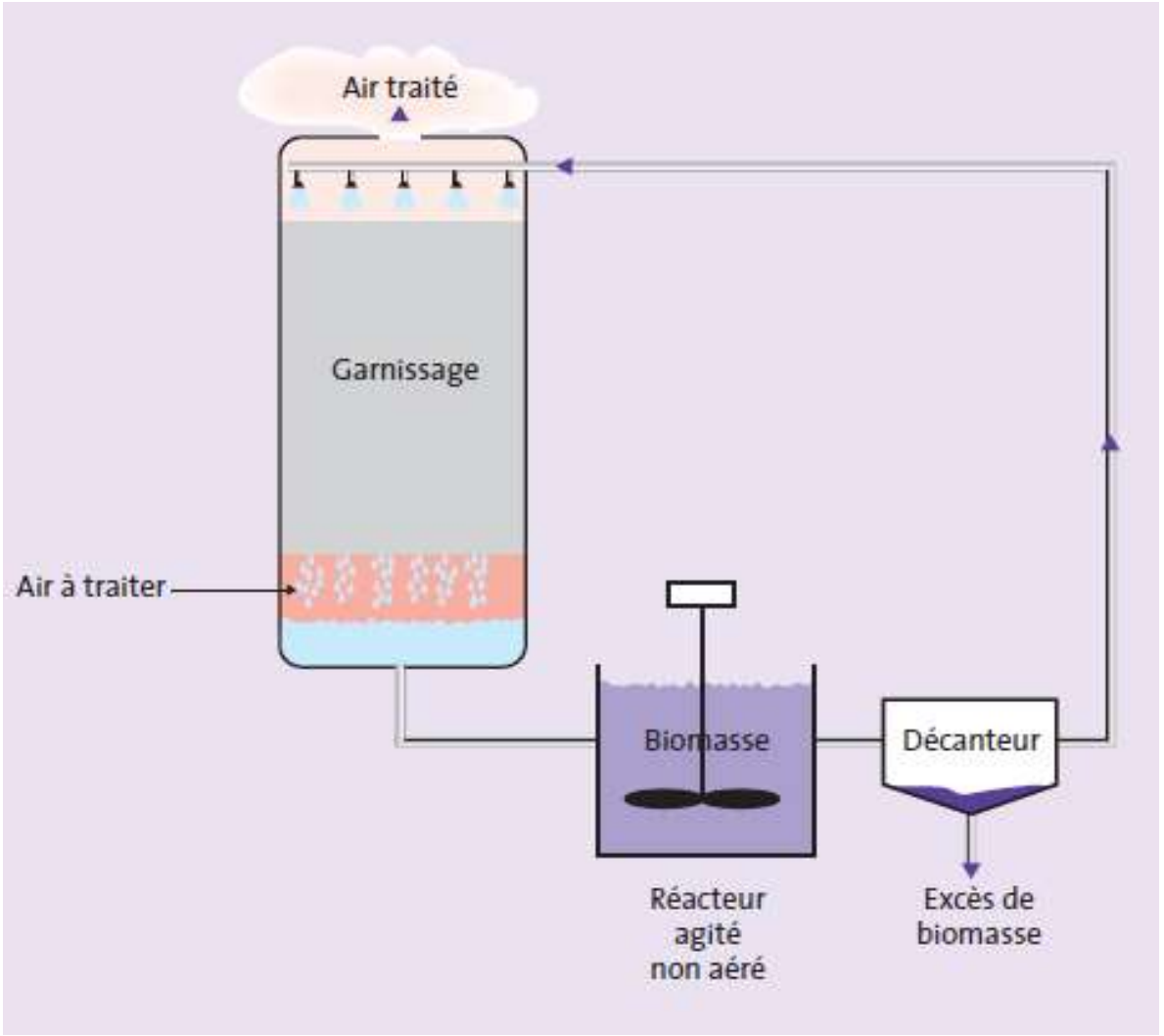
Le garnissage employé est ensemencé avec des souches de microorganismes spécifiques ou non aux polluants (boues activées). L'arrosage en continu permet de maintenir le taux d'humidité et l'apport de nutriments nécessaire au développement microbiologique.


Air traité
Eau
Biomasse
Régulation pH
nutriments
Air à traiter
Eau (drainage)

C/Biolaveurs

Il est composé de deux compartiments : une colonne d'absorption qui transforme le polluant gazeux en liquide, et d'un bioréacteur contenant les boues activées où les microorganismes sont en suspension ce qui nécessite un brassage et une oxygénation permanents pour maintenir les microorganismes dans cet état.

Donc l'air pollué est lavé dans une solution liquide contenant des micro-organismes qui dégradent les polluants.


Air traité
Garnissage
Air à traiter
Biomasse
Décanteur
Réacteur
agité
non aéré
Excès de
biomasse

	Phase aqueuse	
Biomasse (X)	**Mobile**	**Statique**
libre	Biolaveur	-
immobile	Lit bactérien ou biolaveur à cellules fixées	Biofiltre

	Accepteur d'électrons	Produits réduits	Exemples de micro-organismes
Aérobie	O_2	H_2O_2	Toutes les bactéries aérobies, les mycètes, les protozoaires et les algues
Anaérobie	NO_3^-	NO_2^-	Bactéries entériques
	NO_3^-	NO_2^- , N_2O, N_2	*Pseudomonas* et *Bacillus*
	SO_4^{2-}	H_2S	*Desulfovibrio* et *Desulfotomaculum*
	CO_2	CH_4	Tous les méthanogènes
	S^0	H_2S	*Desulforomonas* et *Thermoproteus*
	Fe^{3+}	Fe^{2+}	*Pseudomonas* et *Bacillus*

Les Nitrobacter pour les nitrites en milieu aérobie

Pour le CO2 les **Microalgues** et les **cyanobactéires**

Bactéries Sulfuroxydantes pour les dioxyde de soufre

POLLUANT	> Micro-organismes adaptés
■ HYDROCARBURES	> Nocardia, Pseudomonas
■ ALCOOLS	> Corynebacterium
■ AROMATIQUES	> Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas Putida
■ ALDÉHYDES, CÉTONES	> Rhodococcus, Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas Putida
■ AMINES	> Pseudomonas, Alcaligenes, Rhodococcus
■ CHLOROALCANES	> Xanthobacter, Mycobacterium, Hyphomicrobium
■ SOUFRÉS	> Hyphomicrobium, Thiobacillus, Bacillus

Facteurs influençant les bioprocédés

Présence de l'eau

La présence d'eau dans le milieu bioréactif est une condition indispensable de survie pour les micro-organismes.
Dans **les filtres percolateurs** et **les biolaveurs**, il est plus facile de maintenir une teneur en eau suffisante grâce à la circulation du courant liquide dans le système.
En revanche, **le biofiltre** est seulement à circulation de gaz . Or, l'air évacué entraîne de l'eau.
Pour empêcher le déssèchement du filtre qui bloque le processus biologique, on peut soit humidifier l'air pollué à l'entrée, soit placer au dessus du lit un système d'arrosage séquencé.

Des capteurs peuvent être placés à différents niveaux du lit permettant de suivre l'évolution de la masse du filtre

La température

- La température joue un rôle important sur le métabolisme microbien.
- Les réactions catalysées par les enzymes sont thermosensibles.
- Au-delà d'une certaine valeur, les températures élevées sont létales, des systèmes de transport moléculaire et ionique et des autres protéines constitutives de la cellule.
- Pour des températures trop basses, la croissance des bactéries est fortement ralentie
- La température a généralement un optimum entre 20 et 40 °C.

Le pH

Le pH est un facteur qui influe fortement sur le développement des micro-organismes.
À l'opposé des moisissures et des levures pour lesquelles le développement est favorisé à un pH acide (pH 3 à 6), **les bactéries** se multiplient plutôt **en milieu neutre** ou légèrement alcalin (pH 7 à 7,5), mais ces limites peuvent être assez larges.
Les micro-organismes modifient fréquemment le pH de leur propre habitat en produisant des déchets métaboliques acides ou basiques.

Milieu aérobie ou anaérobie

Certains micro-organismes sont **aérobies** stricts, exigeant de l'oxygène libre pour leur développement, lequel sert alors d'accepteur final de la chaîne transporteuse d'électrons (ou respiratoire).

D'autres, **anaérobies** stricts, ne peuvent se multiplier qu'en l'absence d'oxygène libre

D'autres encore sont anaérobies facultatifs, capables de croître avec ou sans oxygène libre ;

Les micro-aérophiles, eux, ne se reproduisent qu'en présence d'une faible pression d'oxygène (2 à 10 % de O_2 alors que l'air en contient 21 %).

Modélisation des bioréacteurs

Afin de pouvoir mieux concevoir, dimensionner et gérer les bioprocédés, par une compréhension fine des processus impliqués, il convient de savoir modéliser et simuler numériquement l'ensemble des phénomènes.

Pour cela, on utilise une mise en équation des phénomènes physiques, chimiques et biologiques tout en y adjoignant des relations empiriques issues d'études statistiques de données expérimentales.

Utilisation de modèles mathématiques pour décrire et prédire le comportement des bioprocédés.
Les modèles peuvent être basés sur des équations qui décrivent la cinétique de la dégradation des polluants, le transfert de masse entre les phases gaz et liquide, et la croissance des microorganismes.

Optimisation des bioprocédés :

- Les modèles permettent d'optimiser les conditions de fonctionnement (débit d'air, concentration de nutriments, etc.) pour maximiser l'efficacité de la dégradation des polluants.

- Les modèles peuvent prédire les performances des bioprocédés sous différentes conditions de charge de pollution, ce qui est crucial pour la planification et la gestion des systèmes de traitement de l'air.

- Avant de construire des installations à grande échelle, les modèles peuvent être utilisés pour évaluer la faisabilité technique et économique des bioprocédés.

Exemple Modèle d'Ottengraf

Pour décrire les mécanismes qui régissent le processus de transport, de transfert et de dégradation d'un polluant dans un **biofiltre**,

Ce modèle rend compte de la diffusion du composé biodégradable présent en phase gazeuse dans un biofilm se développant à la surface d'une particule du garnissage naturel où il subit une biodégradation aérobie.

Techniques d’analyses des émissions de polluants atmosphérique

Analyse sur site (in situ)

Capteurs de gaz

Capteurs électrochimiques : Utilisés pour mesurer les concentrations de gaz tels que l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), et le monoxyde de carbone (CO).

Spectroscopie infrarouge et d'absorption UV

Permet de détecter et de quantifier une grande variété de gaz en analysant leur spectre infrarouge et UV.

Les gaz couramment analysés par IR incluent :Dioxyde de carbone (CO_2)Monoxyde de carbone (CO)Méthane (CH_4)Dioxyde d'azote (NO_2)Protoxyde d'azote (N_2O)Ozone (O_3)Vapeur d'eau (H_2O)Sulfur hexafluoride (SF_6)Ammoniac (NH_3)Hydrogène sulfuré (H_2S)

Les gaz couramment analysés par UV-Vis incluent :Ozone (O_3)Dioxyde de soufre (SO_2)Dioxyde d'azote (NO_2)Nitrate de peroxyle (NO_3)Chlorine (Cl_2)Brome (Br_2)Formaldéhyde (HCHO)Acide nitreux (HONO)

Sonde de fluorescence

Utilisé pour mesurer la répartition spatiale des polluants atmosphériques en émettant **des impulsions laser** (des rayons X) et en analysant la lumière renvoyée par les particules et les molécules présentes dans l'atmosphère.

.

Collecteurs de particules

Utilisés pour échantillonner les particules en suspension (PM10, PM2.5) afin d'analyser leur composition chimique plus tard en laboratoire

Analyse en laboratoire

Chromatographie en phase gazeuse (GC)

Utilisée pour séparer et analyser les composés organiques volatils (COV) et d'autres gaz.

La chromatographie en phase gazeuse sépare les composants d'un mélange en fonction de leur volatilité et de leur interaction avec une phase stationnaire (une substance immobilisée dans la colonne) et une phase mobile (un gaz porteur).

Chromatographie liquide haute performance (HPLC)

Utilisée pour analyser les polluants organiques dissous dans les particules atmosphériques.

Spectrométrie de masse (MS) :

Souvent couplée à la GC ou à la HPLC pour identifier et quantifier les composés chimiques avec une grande précision.

La spectrométrie de masse (MS) est une technique analytique puissante utilisée pour identifier et quantifier des molécules en fonction de leur masse.

Analyseurs à chemiluminescence

sont des instruments utilisés en chimie analytique pour détecter et quantifier la présence de certaines substances en se basant sur leur capacité à produire de la lumière lors d'une réaction chimique.

Changement d’unité de mesure

Le ppm signifie en anglais part per million et en français partie par million. Ces unités permettent de connaitre le nombre de molécule d'un polluant (par exemple, le NH3) dans un million de molécules d’air pour le ppm (10^{-6}) et dans un milliard de molécules d'air pour le ppb (10^{-9}).

$1\ ppm = 1\ mg.kg^{-1} = 1mg/1L$

$1ppm = 1/10^{6} = 10^{-6}$

$1ppb = 1/10^{9} = 10^{-9}$

$1ppm = 1000ppb$

$$\text{ppm} = \frac{mg.m^3}{masse\ molaire \times volume\ molaire}$$

où la masse molaire est la masse atomique moyenne de l'élément ou du composé en question (g/mol),
le volume molaire est le volume occupé par une mole de gaz à des conditions normales de température et de pression (0 °C et 1 atm). Le volume molaire des gaz à ces conditions est d'environ 22,4 litres par mole.