

Problématique odeurs et désodorisation Elaboration et justification d'un programme coordonné de recherche

Etat de l'Art





ETUDE N° 91-0801/1A

**ÉTAT DE L'ART SUR LA PROBLEMATIQUE
ODEURS ET DESODORISATION**

**ÉLABORATION ET JUSTIFICATION D'UN PROGRAMME
COORDONNE DE RECHERCHE**

RAPPORT FINAL

mars 1993

P. LE CLOIREC - GEODE (Groupe d'Études Odeurs et Désodorisation) - Ecole des
Mines d'Alès

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Etat de l'Art sur la problématique odeurs et désodorisation. Elaboration et justification d'un programme coordonné de recherche, 1993, 202 p, n°91-0801/1A.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 1993

Etude RECORD n°91-0801/1A

Les idées, propositions et suggestions émises dans ce document ne reflètent pas obligatoirement les positions du Ministère de l'Industrie et de l'Ecole des Mines d'Alès, mais sont publiées sous la seule responsabilité de leurs auteurs.

SOMMAIRE

CONVENTION ARMINES/RECORD 1992.....	5
AVANT-PROPOS.....	6
INTRODUCTION.....	7

PERCEPTION - COMMUNICATION

INTRODUCTION.....	9
PROPOSITIONS STRATEGIQUES POUR FAVORISER L'ACCEPTABILITE DE SITES : CAS DES DECHARGES.....	10
LE QUOI.	11
LE COMMENT, LE QUAND, PAR QUI.	12

METROLOGIE

INTRODUCTION.....	14
SUGGESTIONS POUR DES ACTIONS FUTURES	16

PROCEDES DE TRAITEMENTS

INTRODUCTION.....	19
I PERSPECTIVES DE RECHERCHE PAR PROCEDES.....	20
I-1 MASQUAGE ET INTERACTIONS ODORANTES.....	20
I-2 L'INCINERATION.....	21
I-3 LE LAVAGE DE GAZ - L'ABSORPTION	22
1-3-1 Difficultés rencontrées dans les Procédés d'Absorption.....	22

I-3-2	Thèmes de recherche sur l'absorption.....	23
I-4	LES TRANSFERTS GAZ/SOLIDE - L'ADSORPTION.....	24
I-4-1	Difficultés dans les procédés d'adsorption	24
I-4-2	Quelques axes potentiels de recherche sur l'adsorption	25
I-4	LES PROCEDES BIOLOGIQUES	26
I-4-1	Les biofiltres	26
I-4-2	Les biolaveurs.....	26
I-4-3	Quelques suggestions de recherches.....	27
II	PERSPECTIVES DE RECHERCHE PAR APPLICATIONS.....	27
II-1	DEFINITION DES CHAMPS D'APPLICATION.....	27
II-2	LES PROCEDES EXISTANTS.....	28
II-3	REFLEXIONS SUR LES TRAITEMENTS DE DESODORISATION - RESEAUX UNITAIRES OU SEPARATIFS	29
II-4	THEMES DE RECHERCHE SUR CES APPLICATIONS	30
III	CONCLUSIONS : DES THEMES DE RECHERCHE POTENTIELS.....	31
III-1	APPROCHE DE LA COMMUNICATION ENTRE LE SITE INDUSTRIEL ET LE VOISINAGE.....	31
III-2	ANALYSE - AUTO CONTROLE DE L'EMISSION GAZEUSE TRAITEE OU NON	31
III-3	PROCEDURE QUALITE	32
III-4	ETUDE DES INTERACTIONS MOLECULES ODORANTES/SOLIDE AVEC OU SANS BIOMASSE	32
III-4-1	Interaction molécule - molécule	32
III-4-2	Mise en œuvre de nouveaux matériaux dans les procédés de désodorisation.....	32
III-4-3	Matériaux et biodésodorisation	32

CONVENTION ARMINES/RECORD 1992

Contrat de Recherche N° 91-801 signé entre l'Association R.E.C.O.R.D. représentée par son Président, Monsieur DARIUS François et son Directeur Scientifique, Monsieur le Professeur Alain NAVARRO.

et

ARMINES - Centre Alès, représenté par son Directeur Général, Monsieur J. OSSARD.

La responsabilité scientifique incombe à l'Ecole des Mines d'Alès où ont été menés les travaux

AVANT-PROPOS

A la demande de l'association RECORD, cette étude est due à un travail d'ensemble d'experts sur les odeurs et la désodorisation industrielles au sein d'un collectif appelé GEODE (Groupe d'Etudes sur les Odeurs et la Désodorisation) :

Animation :

P. Le Cloirec	(EMA)
J.R. Degorce Dumas	(EMA)
J.L. Fanlo	(EMA)

Expertise :

B. Lamaty	(USTL)
G. Martin	(ENSCR)
M.L. Perrin	(CEA)
P. Laffort	(CNRS)
M. Ramel	(INERIS)
J.L. Terra	(Centre Hospitalier Le Vinatier, Service Hospitalo-Universitaire de Psychiatrie)

Les coordonnées complètes des diverses personnes sont données en annexe 1.

INTRODUCTION

La nuisance olfactive est avec le bruit celle qui est la plus mal supportée par le voisinage. En outre, les mauvaises odeurs, même s'il n'y a pas de notion de toxicité, donnent une image négative de l'activité ou de l'industrie émettrice. Ce constat a amené les décideurs, pouvoirs publics ou privés, à se pencher sur ce problème d'émission d'odeurs. Si celles-ci ont fait l'objet d'un certain nombre d'études et de travaux, il a semblé nécessaire de faire le point sur l'état actuel des connaissances et de proposer des axes de recherches et de développement. En un mot, de proposer une perspective de recherches sur les odeurs et la désodorisation industrielle.

Afin d'assurer une approche la plus complète possible, trois sous-groupes ont été constitués :

- Perception - Communication, rapporteur Mr Terra
- Métrologie, rapporteur Mr Lamaty
- Procédés de traitement, rapporteur Mr Le Cloirec

Dans ce document, nous reprendrons les développements et les conclusions des divers sous-groupes en mettant l'accent sur les propositions correspondant à chaque thème.

PERCEPTION - COMMUNICATION

INTRODUCTION

A partir d'arguments appartenant aux champs de la psychologie et de l'épidémiologie psychiatrique, l'on tentera d'expliquer pourquoi l'émanation d'odeur peut "atteindre" la population exposée, au point de provoquer des manifestations pathologiques individuelles et susciter aussi des phénomènes de groupe.

Les facteurs favorisant une acceptabilité des émanations odorantes issues de décharges seront envisagés ensuite pour proposer quelques lignes de force dans une stratégie de communication avec les populations exposées.

L'existence d'émanations odorantes peut être l'épine dorsale irritative et servir d'alibi à des phénomènes psychopathologiques massifs avec l'excitation puis la décharge tensionnelle de trouver un vrai persécuteur.

En effet, l'étranger, l'innommable, peut être le support de toutes les projections psychiques qui rappelons-le, sont une façon de mettre à l'extérieur de soi ce qui nous est insupportable, d'attribuer à l'autre ce qui nous appartient initialement : de façon simplifiée, on peut dire qu'il s'agit d'un processus de détoxification sommaire. Ici, il faudra encore distinguer les phénomènes individuels, liés à l'histoire personnelle et les phénomènes de groupe.

L'intensité et la densité des premiers sera à même de catalyser les seconds.

En cas de désagrément collectif, deux types de personnalités peuvent avoir une conduite inflationniste vis-à-vis du phénomène. Ce sont les personnalités hystériques qui peuvent alimenter l'angoisse collective par leur capacité à dire leurs affects et à les transmettre aux autres et les personnalités paranoïaques propres à démontrer l'inanité du sort qui leur est fait et capables de recueillir les suffrages par voie de pétitions.

Ces éléments sont à prendre en compte non pour dénier les nuisances réelles mais pour dire que dans certains cas, la communication avec les populations est sous le sceau de composantes psychopathologiques qui hypothèquent les possibilités de négociation et de gestion des conflits.

Enfin, il faut savoir qu'il n'existe pas de population générale saine. Celle-ci est constituée de sujets plus ou moins bien portants tant sur le plan

somatique que psychique, avec au moins 15 % de perturbations psychologiques.

De ce fait, le phénomène bien réel de l'amplification (l'inflation) du sentiment de gêne ou de danger supposé par une fraction de la population doit être pris en compte dans toute démarche qui visera, avant tout, à faire apparaître objectivement les éléments d'une situation donnée.

Afin d'éviter que l'industriel, gestionnaire d'un site source d'odeurs, n'ait à faire face à un grand groupe assimilable à une foule dont on connaît l'imprévisibilité et l'émotionnalité des réactions (cf. travaux sur les peurs collectives), la communication, objective, doit prendre une forme structurée.

PROPOSITIONS STRATEGIQUES POUR FAVORISER L'ACCEPTABILITE DE SITES : CAS DES DECHARGES.

De façon générale, il semble nécessaire de donner les moyens à la population de comprendre au mieux l'ensemble de problèmes des déchets, en expliquant leurs sources, leur méthode de traitement et de stockage. Donner des moyens au public d'avoir un accès aux sites, favoriserait la mise en représentation de ce qui se passe.

A une époque où la communication privilégie le visuel et le direct, donner la possibilité de "voir" un site paraît le moyen le plus propice à désamorcer l'idée que les gestionnaires cachent la réalité. Villeparisis est dans ce sens, un site exemplaire : l'entrée du site est filmée en permanence la nuit pour prouver à la population qu'aucun camion ne pénètre dans l'enceinte sans être programmé. Les cassettes, bien qu'à la disposition de la population n'ont jamais été demandées pour être visionnées.

La fonction des décharges doit être resituée dans le cadre de la production de biens de consommation qui sont nécessaires et familiers. Montrer à chaque citoyen dans quelle mesure il est lui-même un ordonnateur de déchets et lui indiquer quel en est le destin, permettrait de relativiser la présence d'un site "spécialisé" à proximité.

La maîtrise technique est importante à mettre en exergue tout en montrant ses limitations actuelles dans le domaine des odeurs. Pour ce qui concerne celles-ci, il serait utile d'indiquer que l'appareil olfactif permet la détection de produit à des concentrations très faibles et que dans la plupart des

cas, la présence d'une odeur n'est pas synonyme de risque toxique. En effet, la prégnance de l'odeur peut faire supposer un risque toxique pour le corps au-delà du simple désagrément sensoriel. Il est important de dissocier l'aspect perception de l'aspect toxicité, qui, dans la quasi totalité des cas, n'est pas avéré.

Dans la situation où la nuisance est élevée, et qu'il ne se présente pas de solution radicale, une simple information ne suffit pas. En effet le public ne saurait être cantonné longtemps dans son rôle de victime éclairée sur ce qui l'importune. Donner l'occasion d'une participation active aux personnes exposées peut se faire en associant la population à des cercles de qualité qui s'associeraient pour promouvoir et évaluer de nouvelles mesures.

Cette démarche est différente dans le cas d'un site "propre" où les progrès sont tels que la population après une phase d'inquiétude ne souhaite plus en entendre parler. Dans ce cas, il resterait indispensable de communiquer régulièrement des bilans d'exploitation afin de ne pas enterrer les problèmes.

Communication : des repères.

La communication vers le public doit, nous l'avons précisé, être structurée. Il s'agit en particulier d'envisager les questions suivantes :

Quoi communiquer ?

Comment communiquer ?

Quand communiquer ?

LE QUOI.

Rendre "visible" par le public un problème d'odeurs n'est certes pas chose simple. Montrer, expliquer est de toute évidence indispensable ; toutes les informations à caractère scientifique, technique, médical, disponibles ou connues, relatives aux odeurs, doivent être accessibles. Elles peuvent concerner :

- les caractéristiques des odeurs : origine, nature, seuil de perception, de toxicité, rythme des émissions (ponctuel, intermittent, continu ...), fluctuations liées à l'activité industrielle, à des facteurs météorologiques...

- les aspects techniques : mesures de prévention, analyses (suivi), procédés de traitement mis en œuvre...
- les aspects financiers et sociaux : efforts de l'entreprise en matière de protection des salariés, de l'environnement ...

LE COMMENT, LE QUAND, PAR QUI.

La question du comment est importante. Dans la mesure où la transparence des informations est respectée, et fait état notamment de l'absence de risques pour la santé du public, il est nécessaire de s'interroger sur la stratégie (fond et forme) à dégager en matière de communication vers le public.

Suffit-il d'afficher des résultats d'analyses montrant la parfaite absence de risques ou de danger ?

Faut-il rechercher d'autres méthodes ou initiatives (cercle de qualité, dialogue direct avec les associations de défense ...) impliquant de façon plus active le public ou ses représentants ?

Une situation de pollution permanente plus ou moins bien supportée, peut-elle être comparée à une situation de crise et abordée de la même façon ?

L'élaboration d'un véritable plan de communication en prévision d'une situation de crise est elle nécessaire ?

Enfin, qui doit communiquer et à qui ?

METROLOGIE

données, sans masquer les approximations et les difficultés rencontrées dans ces deux démarches.

Ces deux laboratoires, à la pointe de la Recherche et du Développement dans ce domaine des nuisances olfactives ne sont pas les seuls, loin de là, à y exercer leur activité. Au hasard de ses lectures et de ses contacts, le présentateur de ce rapport a relevé les noms d'autres équipes effectuant recherches et mesures dans ce domaine :

- Laboratoire de Chimie des Molécules Odorantes et l'Université du Havre (Pr. MOREL), 30 rue Gabriel Péri, LE HAVRE,
- Société E.O.G. SA et GUIGUES SA, domiciliées à la même adresse : 10 rue Pierre DUHEM, Z.I. Les Milles, 13856 AIX EN PROVENCE Cedex 3.
- outre, évidemment, les spécialistes ayant participé à la rédaction de l'ouvrage : "Odeurs et Désodorisations dans l'Environnement", (Tec-Doc LAVOISIER, Paris, 1991).

Par ailleurs, les trois laboratoires ou équipes suivants travaillent sur le piégeage et l'analyse des composés organiques volatils, qu'ils soient malodorants ou non. Etant donnée la similitude des techniques analytiques utilisées il n'est pas inutile de les mentionner ici :

- Groupe de Recherches Environnement et Chimie Appliquée de l'Université de GRENOBLE (Pr. FOSTER),
- Laboratoire Central de l'Air, Laboratoire WOLFF à CLICHY (M. HENNEQUIN),
- Laboratoire d'Hygiène de la ville de PARIS (M. PERSON).

Il faut enfin mentionner la parution récente d'un ouvrage sur les techniques d'Analyse par Chromatographie Gazeuse : "Gas Chromatography in Air Pollution Analysis" (Elsevier, AMSTERDAM, 1991) par V.G. BEREZKIN et Y.S. DRUGOV.

SUGGESTIONS POUR DES ACTIONS FUTURES

La méthode "Olfactométrie" semble actuellement bien maîtrisée puisque des normes AFNOR - référencées dans le rapport de Madame PERRIN - ont été publiées sur le "Mesurage des effluents gazeux", le "Mesurage de l'odeur d'une atmosphère gazeuse" et les "Méthodes de prélèvement des atmosphères odorantes".

En revanche, des progrès sont encore à faire dans l'Analyse Chimique des Substances Odorantes. L'Analyse "en continu", sur le site, à l'aide de matériel analytique "embarqué" n'est actuellement possible que pour une classe réduite, mais importante, d'effluents gazeux polluants : les composés soufrés réduits (H₂S, thiols, sulfures)... [voir toutefois l'article du Pr. HAUNOLD et coll., LC GC International, 1992, n° 10, p. 28-35 qui décrit un appareillage "mobile" capable d'analyser également le SO₂ atmosphérique].

Les points sur lesquels devraient porter les recherches futures semblent être :

- l'acquisition de la maîtrise de l'Adsorption quantitative des effluents atmosphériques sur support solide, pour toutes les familles de composés chimiques,
- l'acquisition de la maîtrise de la désorption totale des molécules piégées avant leur introduction dans la chaîne d'analyses.

Sur ces deux points, des solutions partielles existent pour telle ou telle famille de composés chimiques mais il n'y a ni adsorbant ni méthode de désorption universels.

- La réalisation d'une chaîne complète d'analyse "embarquable" susceptible d'effectuer des déterminations qualitatives et quantitatives "in situ" de toutes les familles de Composés Volatils, Organiques ou Minéraux.

Plusieurs années de travail seront certainement nécessaires pour atteindre ces objectifs si tant est qu'ils puissent l'être.

- Les "nez artificiels"

Au sein d'une source odorante où les polluants sont peu nombreux (par exemple 4 à 5) et où l'on dispose de capteurs appropriés, le problème est

relativement simple à résoudre : il suffit de pondérer chacune des concentrations obtenues par les valeurs de seuils et d'exposants de Stevens standardisés pour avoir les intensités odorantes de chacun des polluants à différents niveaux de dilution de l'ensemble (nous avons vu que ces niveaux de dilution autour d'une source pouvaient, eux aussi, être modélisés). Il ne reste alors qu'à sommer les intensités odorantes selon le modèle Gamma exposé dans la partie Métrologie, Annexe 2.

Tout autre est le problème de l'évaluation odorante d'une atmosphère donnée. Généralement les analyseurs physico-chimiques (ou capteurs) sont trop peu sensibles à cet effet. Pour pallier à cet état de fait, on procède à des concentrations d'atmosphères (cf plus haut).

La deuxième difficulté qui se pose alors est la profusion de constituants détectés (on parle de "forêts de pics chromatographiques") et l'incertitude où l'on se trouve quant à l'impact odorant de chacun d'eux. De surcroît, les modèles d'addition d'intensités odorantes n'ont pas été validés au delà de mélanges à cinq composantes. Les solutions à ce type de problématique ne peuvent être d'ordre général mais passent très certainement par des études préalables au cas par cas combinant les méthodes psychophysiques et analytiques. Ce peut être, par exemple, pour une pollution de base relativement homogène mais modulée, un flairage en sortie de chromatographe après "splittage" approprié, puis une identification des fractions jugées olfactivement efficaces, et enfin la mise en œuvre de détecteurs spécifiques de ces fractions. On peut se trouver ramené, dans certains cas, à la situation du paragraphe précédent.

D'une manière générale, il semble que les axes de recherches à recommander, dans ce domaine, portent d'abord sur la mise au point (ou l'amélioration) de capteurs à la fois spécifiques et sensibles. On peut également être amené à compléter les banques de données psychophysiques standardisées existantes. Enfin, dans un but ultérieur de mise au point de détecteurs mimant l'appareil olfactif, les études en cours sur les relations de structure-activité pourraient être encouragées.

PROCEDES DE TRAITEMENTS

INTRODUCTION

Du fait du mélange complexe et hyperdilué que constitue l'air odorant, plusieurs procédés d'épuration ont été développés et mis en œuvre industriellement. Ces procédés de traitement s'appuient généralement sur les caractéristiques physicochimiques des molécules odorantes.

L'état de l'art présenté en annexe 1 reprend les connaissances actuelles, en termes de mécanismes, de performances, de mise en œuvre et de simulation des procédés de désodorisation. Les systèmes les plus classiques sont abordés :

- masquage et interactions odorantes
- l'incinération,
- l'absorption,
- l'adsorption,
- les traitements biologiques.

Reprenant cette approche par procédés, il sera possible d'envisager les thèmes de recherche et développement à entreprendre.

Chaque procédé de traitement sera donc analysé en termes de besoins d'amélioration des performances du procédé lui-même, mais aussi en termes de connaissance et de compréhension des mécanismes mis en jeu.

Une seconde approche possible est de déterminer des perspectives de recherche sur les procédés de désodorisation par branches industrielles. Il est bien évident que ceci ne peut être exhaustif. Nous axerons le travail sur quelques grands domaines, abordés d'une manière globale, à savoir :

- l'industrie liée aux déchets,
- l'agroalimentaire
- l'industrie chimique.

Les réflexions et propositions émises ici sont la suite logique du travail mené lors de l'enquête effectuée auprès d'industriels ayant en fonctionnement des procédés de traitement d'émissions odorantes. La procédure d'enquête et les principaux résultats sont donnés en annexe 2.

Afin d'obtenir une démarche logique nous aborderons chaque paragraphe en soulevant les problèmes rencontrés en termes de procédés ou d'applications industrielles et nous en déduirons des possibilités de recherches dans le domaine considéré. A partir de cet ensemble de réflexions, nous tenterons d'en faire la synthèse et d'en extraire quelques thèmes fédérateurs susceptibles de mobiliser des équipes de recherches pluridisciplinaires.

I PERSPECTIVES DE RECHERCHE PAR PROCÉDES

Dans cette approche seront abordés successivement le masquage, l'incinération, l'absorption, l'adsorption et les traitements biologiques, c'est-à-dire principalement les biolaveurs et les biofiltres.

I-1 MASQUAGE ET INTERACTIONS ODORANTES

Une technique de désodorisation consiste à casser des synergies existant entre les différents polluants ou à provoquer des inhibitions. Ces phénomènes de synergie et d'inhibition, c'est-à-dire d'une manière plus générale d'interaction, sont bien connus en pharmacologie. Ils le sont également en olfaction par les spécialistes de ce domaine, mais jusqu'à une époque relativement récente, sans aucune possibilité prédictive. La situation actuelle est beaucoup plus satisfaisante, même si des progrès restent à accomplir. Résumons la rapidement :

- Il n'y a de possibilité prédictive que lorsqu'on exprime les intensités odorantes d'un mélange en fonction des intensités odorantes des constituants. Toutes choses étant égales par ailleurs, une paire de substances odorantes est caractérisée par une constante ($\cos \alpha$), que l'on détermine expérimentalement pour quelques cas particuliers. La généralisation de la validité du modèle (dit "en U") à d'autres concentrations que celles ayant servi à l'établissement de la constante $\cos \alpha$, a été largement démontrée pour des mélanges binaires, sommairement pour des mélanges à plusieurs composantes.
- La constante $\cos \alpha$ dépend d'une part des exposants de Stevens des constituants du mélange, et d'autre part, d'un degré d'interaction intrinsèque que l'on caractérise par l'indice Γ (Gamma). On constate une interaction

intrinsèque pour certaines paires de substances et pas pour d'autres, mais le nombre de valeurs de Γ actuellement connues est trop faible pour permettre de tenter une relation de structure-activité.

- La simple prise en considération de la loi de Stevens (qui lie l'intensité odorante à la concentration, ainsi que nous l'avons vu) a permis de démontrer qu'en l'absence d'interaction intrinsèque, des mélanges de substances à exposant fort et à exposant faible se traduisent par des situations de forte "interaction apparente" mutuelle, variant de sens en fonction des concentrations réciproques. Nous appelons, faute de mieux, "interaction apparente", celle que l'on observe lorsqu'on exprime une intensité odorante en fonction des concentrations des constituants. Ce dernier point est d'ores et déjà, lui aussi, applicable à l'environnement.

Les axes de recherche que l'on peut recommander dans ce domaine portent donc, d'une part sur la détermination de l'indice Γ pour un grand nombre de paires de substances, et d'autre part, sur la validation (et éventuellement l'affinement) des modèles en U et Γ appliqués à des mélanges à plus de deux composantes.

I-2 L'INCINERATION

L'incinération des émissions malodorantes ne peut être envisagée que dans des cas précis (fortes concentrations, rejets de solvants, faibles débits...) et est utilisée lorsque sa mise en œuvre est possible avec des installations déjà existantes (problème de coût).

S'il ne semble pas que l'incinération soit une opération difficile, d'un point de vue utilisation, il convient cependant d'évaluer les risques en termes d'explosivité des mélanges à brûler et de corrosion des installations due à l'acidité possible des émissions (composés soufrés). En outre, de nombreux composés, en particulier les molécules halogénées (chlorés et fluorés principalement) ne peuvent être minimisés du fait de la production en cheminée d'acide chlorhydrique ou fluorhydrique.

Ces quelques réflexions sur l'incinération comme procédé de désodorisation amènent à proposer une recherche sur la mesure en ligne et l'asservissement et la régulation du flux à traiter en fonction de cette analyse

en continu. En effet, un manque de mesure multiparamètres en ligne a été relevé et mis en évidence par le groupe chargé du thème analyse. Une recherche de capteurs spécifiques de familles de molécules odorantes pourrait être envisagée. Ces capteurs, dont certains existent sur le marché, se doivent d'être développés dans un but de sécurité (explosivité), de protection de l'environnement (rejets halogénés) et d'une manière plus générale, d'autocontrôle à la fois du flux entrant dans l'incinérateur et du rejet à l'atmosphère.

I-3 LE LAVAGE DE GAZ - L'ABSORPTION

Par procédés de lavage, il convient de considérer les traitements par transfert gaz-liquide avec ou sans réactions chimiques acido-basiques ou oxydantes. La mise en œuvre est effectuée dans des réacteurs garnis, par pulvérisation dans des colonnes vides, par venturi, scrubber...

1-3-1 Difficultés rencontrées dans les Procédés d'Absorption

La présentation des connaissances actuelles (annexe 1) a montré que la mise en œuvre de ce transfert s'effectue dans plusieurs réacteurs dans lesquels ruissent des solutions acides (H_2SO_4), basiques (NaOH) ou tout simplement de l'eau.

Si le dimensionnement de ces installations est relativement facile dans le cas d'un seul polluant (H_2S , NH_3 ...), il est bien plus difficile de calculer les coefficients de transfert et donc les hauteurs de garnissage dans le cas de mélanges complexes. On approche donc le dimensionnement de ces installations par empirisme et savoir-faire ou en se plaçant dans le cas le plus défavorable. Cette situation entraîne un surdimensionnement des installations et donc un surcoût d'investissement et de fonctionnement (énergie de circulation des fluides).

Un deuxième problème rencontré sur ce type d'installations est la régulation des débits et des concentrations des réactifs liquides. En effet, on peut penser qu'une simple sonde pH doit suffire à définir le taux de circulation et de fuite des solutions de lavage ; en fait, on note souvent en milieu industriel des problèmes de maintenance, de fiabilité de la mesure, d'asservissement. Ceci entraîne une mauvaise régulation flux odorant - réactif de lavage.

Lié à ce problème de régulation, se pose celui du devenir des solutions de lavage en termes de neutralisation, biodégradation, nuisances induites...

Dans le cas du lavage basique, il existe une surconsommation de réactif due à l'absorption de CO_2 , incontournable dans le cas spécifique du lavage de l'air. Il faut noter que très souvent, les émissions odorantes sont le résultat de fermentations ou d'oxydations biologiques, ce qui explique les fortes concentrations en gaz carbonique rencontrées dans les rejets. Cette difficulté se rencontre également dans le cas du lavage par eau de javel.

La présence de molécules non ou peu hydrosolubles dans l'air à traiter pose un sérieux problème qu'il convient de mettre en avant. Plusieurs solutions sont envisageables en particulier, l'utilisation d'un tiers solvant régénérable.

Les solutions de lavage peuvent être des réactifs chimiques oxydants. Par exemple, l'hypochlorite de sodium, l'eau oxygénée sont utilisés ou utilisables. L'eau de javel est le réactif le plus utilisé. Il peut être fabriqué in situ, à partir de solutions salines de NaCl (avec des problèmes possibles d'électrolyse) ou injecté directement. Dans les deux cas, il convient de faire attention à une corrosion potentielle. Comme dans le cas du lavage à la soude, on est confronté avec l'eau de javel à un transfert de CO_2 dans la solution de lavage. Dans le cas de la fabrication d'eau ozonée, il peut exister des difficultés de transfert gaz (O_3) - liquide (eau) qui doit se faire avant le lavage du gaz odorant proprement dit.

I-3-2 Thèmes de recherche sur l'absorption

Après avoir mentionné un certain nombre de difficultés rencontrées lors du lavage de gaz, certaines semblant incontournables, quelques thèmes de recherches semblent émerger :

- Utilisation de solutions de lavage originales. On peut penser à des huiles, des éthylènes glycols condensés. A l'emploi de ces produits doit être associée une régénération par oxydation, biodégradation.
- Régulation et asservissement.

Ce thème, dans le cas précis du lavage de gaz doit être plutôt focalisé vers la formation des personnels et la définition de fiches Qualité - Procédé. Cette dernière remarque nous semble importante. En effet, comme pour la synthèse chimique ou autre fabrication, il conviendrait de définir de manière très précise une procédure Qualité en terme de mise en marche - régulation - maintenance...

- Il semble apparaître aussi un besoin en terme de simulation - modélisation et dimensionnement des installations dans le cas de mélanges complexes. Il convient dans ce cas de concevoir un modèle multicomposants - multiparamètres intégrant la possibilité de réaction ou non des différentes molécules avec la solution de lavage. Le modèle doit avoir une double fonction : simulation des procédés existants - dimensionnement des nouvelles installations.

I-4 LES TRANSFERTS GAZ/SOLIDE - L'ADSORPTION

Industriellement, on rencontre à l'heure actuelle principalement des procédés mettant en œuvre du charbon actif et d'une manière générale, des filtres garnis de grains de charbon actif. Cependant, la littérature montre l'émergence d'autres matériaux adsorbants utilisables en traitement des odeurs. Ceci nous amène à définir les difficultés rencontrées sur les systèmes existants et à proposer des axes de recherches devant permettre l'amélioration des procédés et l'émergence de nouveaux adsorbants.

I-4-1 Difficultés dans les procédés d'adsorption

Si la mise en œuvre du charbon actif en grains est aisée, la principale difficulté rencontrée sur les filtres est la saturation. En effet, il est difficile d'estimer le degré de saturation d'un filtre et de déterminer sa capacité maximale d'adsorption dans le cas de mélanges complexes de molécules odorantes. On approche ici le problème de la compétition d'adsorption liée à cette saturation. Un problème majeur est la régénération du charbon actif : la plupart du temps, le matériau est remplacé et le charbon actif usagé est soit mis en décharge, soit incinéré, soit régénéré thermiquement chez le fabricant. Il convient de constater que les régénérations chimiques ou biologiques ne sont pas appliquées industriellement.

I-4-2 Quelques axes potentiels de recherche sur l'adsorption

Il est possible de regrouper les thèmes de recherche en trois axes :

- Mise en œuvre de "nouveaux" matériaux adsorbants.

On peut penser principalement aux zéolites, aux alumines mais aussi à de nouvelles présentations de charbons actifs (feutres, fibres, toiles...) qui permettent d'envisager la conception de réacteurs de transfert originaux. A la mise en œuvre de ces matériaux s'ajoute la possibilité de leur fonctionnalisation par des méthodes chimiques ou thermiques fournissant des solides poreux utilisables pour des piégeages spécifiques. Ces adsorbants modifiés sont à comparer au charbon actif en termes de vitesse d'adsorption, mais aussi de compétition de piégeage, phénomène devant obligatoirement être pris en compte dans le cas de la désodorisation.

- Régénération in situ

L'adsorption de molécules odorantes ne peut se concevoir qu'avec un système de régénération de préférence in situ. Le charbon actif sous ses différentes formes (grains, fibres, feutres...), les autres adsorbants (zéolites, alumines...) peuvent être régénérés thermiquement in situ par chauffage intrinsèque du matériau. Il conviendrait pour cela, de favoriser les recherches sur le chauffage par effet Joule, induction électromagnétique ou par micro-ondes qui semblent particulièrement prometteuses.

- Etude de couplages mettant à profit les qualités spécifiques des différents adsorbants.

Ceci amène à considérer le charbon actif ou autres solides comme des matériaux poreux adsorbants mais aussi, comme des catalyseurs permettant des oxydations chimiques à températures ordinaires et avec l'oxygène de l'air. Une autre possibilité est de lier les qualités adsorbantes à celles de supports bactériens permettant une adsorption - biodégradation des molécules odorantes.

I-4 LES PROCEDES BIOLOGIQUES

Par procédés biologiques, il convient de comprendre à la fois les biolaveurs et les biofiltres.

I-4-1 Les biofiltres

Ils représentent la majeure partie des procédés de traitement biologique. On trouve en France une dizaine d'installations industrielles dans les stations d'épuration et quelques unités dans les industries liées au traitement des déchets (équarissage, poisson...).

Si leur utilisation est intéressante en termes de coût d'investissement et de fonctionnement, quelques problèmes subsistent :

- l'hydrodynamique n'est pas très bien maîtrisée, entraînant des chemins préférentiels et donc les performances minimisées.
- les dimensions des installations sont importantes. En effet, du fait de réactions biologiques sur supports à concentration en bactéries relativement faible, il est nécessaire de prévoir des vitesses de passage de fluides faibles et des temps de séjour importants.
- La gestion des filtres est souvent mal assurée en raison des difficultés inhérentes à la maîtrise de l'ensemble des paramètres de fonctionnement et à la compréhension des mécanismes complexes existant au sein du bioréacteur.

I-4-2 Les biolaveurs

A notre connaissance, ces procédés ne sont pas opérationnels industriellement, mais font l'objet de travaux de recherche-développement. On note quelques travaux sur l'élimination de solvants, d'acides volatils...

Les difficultés rencontrées sont proches de celles citées pour les biofiltres, à savoir la gestion coordonnée multiparamètres et la compréhension des mécanismes biologiques dans les milieux complexes. Il convient de noter que les molécules transformables se doivent d'être solubles et donc comme pour les procédés d'absorption, on peut imaginer de contourner la difficulté par l'utilisation d'un tiers solvant de transfert avant la biodégradation des molécules absorbées.

I-4-3 Quelques suggestions de recherches

- Etude de l'hydrodynamique des installations existantes et des nouveaux procédés.
- Recherche de nouveaux matériaux de garnissage permettant la mise en œuvre de fortes concentrations de bactéries afin de réduire la taille des installations. Cette approche est applicable à la fois aux biofiltres et aux biolaveurs.
- Etude de la mise en place de systèmes d'autocontrôle et de procédures qualité comme pour les procédés d'absorption ou d'adsorption.

II PERSPECTIVES DE RECHERCHE PAR APPLICATIONS

Il serait vain de vouloir approcher de manière exhaustive les besoins en recherche sur l'ensemble des applications possibles de la désodorisation biologique ou physico-chimique. Aussi, comme il a été mentionné en introduction, nous centrerons notre approche sur trois branches industrielles susceptibles d'utiliser ou utilisant actuellement des procédés de désodorisation, soit :

- l'industrie liée aux déchets,
- l'agroalimentaire,
- l'industrie chimique.

Ce choix est dicté par l'enquête menée précédemment et présentée en annexe 2. La réflexion proposée est globale, quelles que soient les applications. Afin de ne pas alourdir la présentation, nous éviterons de décrire trop longuement les interactions entre applications et procédés ayant été mentionnés dans le paragraphe précédent.

II-1 DEFINITION DES CHAMPS D'APPLICATION

Par activités liées aux déchets, il convient de comprendre les entreprises travaillant dans les déchets solides du type ordures ménagères ou industrielles mais aussi les activités comme les équarrissages, le traitement des déchets de poissons, les stations d'épuration.

Les industries de l'agroalimentaire concernées par notre approche sont surtout celles des conserveries, des levures, de l'alimentation humaine ou animale.

Les émissions de l'industrie chimique qui doivent être traitées sont chargées de solvants ou de produits spécifiques particulièrement odorants : molécules soufrées, azotées...

L'ensemble des champs d'application des procédés de désodorisation que nous voulons aborder ici peuvent être caractérisés par les mots clés suivants :

- Nuisances odorantes marquées,
- Flux importants à épurer,
- Effort de mise en place de traitement,
- Variations des charges odorantes,
- Besoin de prétraitement de l'air,
- La désodorisation est une activité annexe.

II-2 LES PROCEDES EXISTANTS

L'enquête a montré, au niveau de ces activités, une évolution des procédés utilisés.

La première mise en œuvre de la désodorisation s'est effectuée sous la forme de laveurs physico-chimiques. Le plus souvent, des tours garnies avec utilisation de solutions de lavage telles que l'eau, des solutions acides et/ou basiques, des solutions oxydantes comme l'eau de javel. Les difficultés rencontrées sont souvent liées aux variations de charge, au mélange d'émissions peu odorantes (ventilation d'atelier) avec des rejets plus fortement chargés (cuiseurs, traitement des boues...), à la régulation des solutions lavantes, et d'une manière générale, au suivi de ces installations.

En outre, les produits d'oxydation ou d'une manière plus générale les solutions de lavage usagées ne font l'objet d'aucune étude ou réflexion quant à leur traitement.

Si ces laveurs ont été mis en place il y a quelques années, on remarque maintenant une tendance à utiliser des traitements biologiques comme procédé de désodorisation. Les filtres sont le plus souvent garnis de tourbe. Par rapport à l'activité, on note qu'un prétraitement est souvent nécessaire, soit un refroidissement des gaz, soit un dépoussiérage - dégraissage afin d'éviter un colmatage des filtres. Un apport d'éléments nutritionnels par l'eau d'humidification est parfois envisagé. Cependant, peu de contrôles et d'analyses sont effectués sur les réactifs, les performances et les produits de réactions.

II-3 REFLEXIONS SUR LES TRAITEMENTS DE DESODORISATION - RESEAUX UNITAIRES OU SEPARATIFS.

Si l'on peut dire que les deux procédés (lavage et traitement biologiques) sont principalement utilisés dans les activités de traitement et de valorisation des déchets, on note une approche nouvelle des traitements. En effet, au lieu de canaliser et de mélanger l'ensemble des émissions gazeuses odorantes vers un point de traitement, il est parfois envisagé de traiter spécifiquement par source d'émission odorante. Ceci implique de repenser le traitement du point de vue des flux et des technologies à mettre en œuvre. Ainsi sont utilisés dans ce cas des filtres de charbons actifs, des laveurs du type venturi ou scrubbers..., c'est-à-dire des procédés très performants dimensionnés et fonctionnant sur un rejet nuisant très spécifique. Cette manière d'appréhender les problèmes de désodorisation semble séduisante puisqu'elle permet de cibler le traitement sur des sources nuisantes importantes (système séparatif de faible débit mais concentration forte) et donc de réduire à la fois les dimensions des installations et les longueurs de canalisation comparativement au système de traitement unitaire.

Cette réflexion sur des réseaux unitaires ou des traitements séparatifs amène à se poser le problème des émissions diffuses particulièrement difficiles à résoudre dans le cas de sites industriels existants. Il est en effet difficile d'aborder ce sujet à la fois en termes d'analyse mais aussi d'un point de vue traitement. Si une ventilation est envisagée, alors on obtient un fort débit de faible concentration à traiter. Mais il est possible d'aborder le traitement de ces émissions diffuses par l'emploi de masquants.

II-4 THEMES DE RECHERCHE SUR CES APPLICATIONS

Si ces activités amènent à rechercher des thèmes de recherche par procédés du fait de l'implantation effective des systèmes de désodorisation sur les sites industriels, il est aussi possible de proposer quelques axes de recherche plus spécifiques à ces domaines.

Il convient dans un premier temps de promouvoir une réflexion sur le thème de la Procédure Qualité ; c'est-à-dire que pour chaque procédé, il faut définir une procédure écrite rigoureuse de la mise en route, du fonctionnement des installations en régime établi et du contrôle des performances des procédés.

Un deuxième thème pourrait être le problème des émissions diffuses dans ces secteurs d'activités. Il convient de préciser dans un premier temps une approche globale du site industriel en terme d'émission d'odeur. Dans le cas d'odeur diffuse, deux directions peuvent être prises :

- i) une réduction des émissions en se basant sur le principe des technologies propres.

Ceci implique de repenser le ou les procédés de fabrication en tenant compte des rejets et en particulier des émissions odorantes. Cependant, il faut aussi intégrer les nuisances olfactives potentielles générées lors du transport des produits et réactifs ou des rejets.

- ii) un traitement soit par des voies classiques du type ventilation - canalisation - épuration ou par l'emploi de masquants.

En outre, les propositions de recherches sur les procédés et en particulier sur l'absorption, l'adsorption et les traitements biologiques sont à intégrer dans ce paragraphe.

III CONCLUSIONS :

DES THEMES DE RECHERCHE POTENTIELS

L'approche générale sur les odeurs et la désodorisation, présentée dans ce document et dans les annexes a permis de mettre en lumière un certain nombre de problèmes, tant au niveau de la perception et communication, de l'analyse ou des procédés de traitement. Ceci nous amène à proposer des pistes de recherches pouvant déboucher sur la mobilisation de laboratoires et à la formation d'équipes de recherches pluridisciplinaires.

Ces thèmes de recherche peuvent être regroupés en s'appuyant sur le premier classement des sous-groupes de travail de GEODE.

III-1 APPROCHE DE LA COMMUNICATION ENTRE LE SITE INDUSTRIEL ET LE VOISINAGE

Le travail consiste à définir, en termes d'émission ou de traitement des odeurs :

- Quoi communiquer ?
- Comment communiquer ?
- Quand communiquer ?
- Qui communique ?

Ce type de questions est applicable en temps de crise, mais aussi lorsqu'il existe une émission odorante en "bruit de fond".

III-2 ANALYSE - AUTO CONTROLE DE L'EMISSION GAZEUSE TRAITEE OU NON

Cette procédure de surveillance doit pouvoir être mise en œuvre soit sur le site de l'usine, soit au voisinage de l'usine. Elle doit permettre à l'industriel de prévoir et de réagir très vite à un problème d'odeur. Ce travail peut se concevoir à la fois comme une définition de matériels d'analyse, de capteurs spécifiques... , une évaluation de ceux-ci dans des cas simples et enfin une qualification de la procédure et des outils analytiques sur site réel.

III-3 PROCEDURE QUALITE

Pour ce terme, il convient de définir une procédure de gestion des installations de désodorisation. Cette approche consiste, dans différentes activités industrielles et sur divers types de traitements, à mettre en place une démarche qualité ; c'est-à-dire à écrire de manière très précise les modes opératoires permettant d'obtenir à tout moment et à moindre coût un rendement optimal de l'installation de désodorisation.

III-4 ETUDE DES INTERACTIONS MOLECULES ODORANTES/SOLIDE AVEC OU SANS BIOMASSE

C'est une étude très vaste qui pourrait s'articuler en plusieurs sous-thèmes de recherche :

III-4-1 Intéraction molécule - molécule

Le travail consiste à casser d'éventuelles synergies entre les différents polluants ou à provoquer des inhibitions minimisant l'effet global de l'odeur, par la mise en œuvre d'épuration sélective ou d'agents masquants.

III-4-2 Mise en œuvre de nouveaux matériaux dans les procédés de désodorisation

Le but est d'augmenter les performances des installations. On peut penser à l'étude de nouveaux adsorbants mais aussi à de nouveaux garnissages de laveurs de gaz.

Cette étude doit être appréhendée, certes avec le souci d'augmenter les performances des systèmes de désodorisation, mais aussi de minimiser les coûts en investissement et fonctionnement. Ceci implique une approche vers des procédés rustiques et fiables.

III-4-3 Matériaux et biodésodorisation

Cette approche "nouveaux matériaux" couplée à une mise en œuvre originale de procédés de traitement biologique doit permettre des rendements meilleurs tout en diminuant les tailles des installations et en évitant les problèmes hydrodynamiques.

SOMMAIRE

ANNEXE 1 - COORDONNEES DES EXPERTS.....	8
ANNEXE 2 - ODEURS ET DESODORISATION INDUSTRIELLES : ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE.....	11
1 PERCEPTION - COMMUNICATION : Du risque psychique à l'acceptabilité	12
1.1 LES ODEURS	12
1.2 LA QUETE DE CAUSALITE.....	13
1.3 ODEUR ET SANTE	13
1.4 PERCEPTION DES ODEURS ET TROUBLES PSYCHIQUES : DE L'INDIVIDUEL AU COLLECTIF.....	13
1.5 PROPOSITIONS STRATEGIQUES POUR FAVORISER L'ACCEPTABILITE DE SITES : CAS DES DECHARGES	14
Bibliographie.....	16
2 METROLOGIE.....	17
2.1 LA MESURE DES ODEURS.....	17
2.1.1 Le modèle animal	17
2.1.2 La Psychophysique.....	18
2.1.2.1 Le seuil olfactif ou seuil de minimum perceptible	18
2.1.2.2 L'intensité odorante	18
2.1.2.3 La qualité odorante	20
2.1.2.4 L'indice de gêne.....	20
2.1.3 Les "nez artificiels"	21
Bibliographie.....	22
2.2 OLFACOMETRIE DANS L'INDUSTRIE.....	24
Généralités	24
2.2.1 Méthode de mesure de la concentration d'un mélange odorant au seuil de detection (ou determination du facteur de dilution au seuil de detection)	25
2.2.1.1 Définitions.....	25
2.2.1.1.1 Gaz inodore.....	25
2.2.1.1.2 Facteur de dilution	25
2.2.1.1.3 Seuil de détection.....	25

2.2.1.1.4	Facteur de dilution au seuil de détection, K50.....	25
2.2.1.1.5	Concentration.....	25
2.2.1.2	Principe de la mesure	26
2.2.1.3	Echantillonnage.....	26
2.2.1.4	Appareillage.....	26
2.2.1.5	Sélection des personnes constituant le jury	26
2.2.1.6	Mode opératoire	27
2.2.1.7	Traitement statistique des résultats	27
2.2.2	Méthodes de mesure de l'intensité odorante d'une atmosphère.....	27
2.2.2.1	Définition.....	27
2.2.2.2	Principe de la mesure	27
2.2.2.3	Sélection des personnes constituant le jury.....	28
2.2.2.4	Mode opératoire	28
2.2.2.5	Echantillonnage.....	28
2.2.2.6	Traitement statistique des résultats	28
2.2.3	Application de l'olfactométrie à l'industrie	28
2.2.3.1	Mesures à l'émission.....	28
2.2.3.2	Mesures dans l'environnement	29
2.2.3.3	Evaluation de la gêne ressentie par les populations.....	29
	Bibliographie.....	30
2.3	ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES COMPOSES ODORANTS.....	31
2.3.1	Détermination des sources et de leur flux polluant.....	31
2.3.2	Techniques d'analyse	32
2.3.2.1	Prélèvement de l'air pollué et transfert de l'échantillon.....	33
2.3.2.2	Analyse continue spécifique.....	33
2.3.2.3	Analyse "exhaustive"	33
2.3.2.4	Analyses par famille, réalisées en différé.....	34
	Conclusion.....	35
3	LES PROCEDES DE TRAITEMENTS.....	37
3.1	INTRODUCTION.....	37
3.2	LA COMBUSTION.....	37
3.2.1	L'incinération thermique.....	39
3.2.2	l'incinération catalytique.....	43
3.2.3	Domaines d'application	45
3.2.4	Conclusion	46
3.3	LES PROCEDES GAZ / SOLIDE : L'ADSORPTION.....	46
3.3.1	L'adsorption : aspects généraux	46
3.3.1.1	Transfert et adsorption dans un matériau poreux	46
3.3.1.2	L'adsorption	48
3.3.1.3	Approche mathématique des interactions solide / molécule : exemples d'applications.....	49

3.3.2	Les matériaux adsorbants, caractéristiques et performances.....	52
3.3.2.1	Le charbon actif.....	52
3.3.2.2	Des adsorbants naturels.....	57
3.3.2.3	Des adsorbants de synthèse.....	58
3.3.3	La régénération.....	58
3.3.4	Dimensionnement et modélisation.....	60
3.3.4.1	Eléments de dimensionnement.....	60
3.3.5	Des exemples industriels de la désodorisation par adsorption.....	62
3.3.5.1	Cas de l'air de ventilation d'un biostabilisateur d'ordures ménagères	62
3.3.5.2	Cas d'un effluent gazeux de station d'épuration.....	64
3.4	LE TRANSFERT GAZ-LIQUIDE : L'ABSORPTION.....	64
3.4.1	L'absorption : aspects généraux.....	65
3.4.1.1	Les conditions d'équilibre entre un gaz et un liquide.....	65
3.4.1.2	Approche des mécanismes d'absorption.....	66
	• Cas d'un transfert simple.....	66
	• Cas d'un transfert avec réaction chimique.....	68
3.4.2	Mise en œuvre des lavages de gaz.....	69
3.4.2.1	Les tours vides ou atomiseurs.....	73
3.4.2.2	Les colonnes à garnissage.....	74
	• Présentation générale.....	74
	• Hydrodynamique d'une colonne à garnissage.....	74
	• Unité de transfert et hauteur de colonne.....	80
	• Approche globale du dimensionnement.....	85
3.4.2.3	Les Venturi-scrubbers et les éjecteurs.....	85
3.4.2.4	Comparaison des paramètres de transfert.....	88
3.4.3	Les réactifs de lavage des gaz odorants.....	89
3.4.4	Mise en œuvre des laveurs.....	90
3.4.5	Rappel du symbolisme utilisé.....	91
3.5	L'OXYDATION PAR VOIE SECHE.....	93
3.6	LE MASQUAGE ET LA DISPERSION.....	95
3.6.1	Le Masquage.....	95
3.6.2	La Dispersion.....	95
3.6.2.1	Dispersion et facteurs météorologiques.....	96
3.6.2.2	Approche du calcul de cheminées.....	98
3.6.2.3	Interprétation des résultats.....	99
	Bibliographie.....	100
3.7	LES TRAITEMENTS BIOLOGIQUES.....	104
3.7.1	Introduction.....	104
3.7.2.	Dégradation de substrats.....	104
3.7.2.1.	Biodégradabilité.....	104
3.7.2.2.	Composés xénobiotiques.....	106

3.7.3.	Les procédés biologiques.....	107
3.7.3.1.	Biofiltre.....	108
	• Les procédés.....	108
	• Les matériaux filtrants.....	110
	• Paramètres physiques.....	111
	• Aspects cinétiques.....	113
	• Applications et aspects financiers.....	113
3.7.3.2	Lit bactérien.....	117
	• Les procédés.....	117
	• Paramètres physiques.....	118
	• Aspects cinétiques - modélisation.....	119
	• Applications.....	119
3.7.3.3	Laveurs biologiques.....	119
	• Les Procédés.....	119
	• Aspects cinétiques.....	120
	• Applications.....	121
3.7.4	Conclusion.....	122
Bibliographie.....		124
ANNEXE 3 - ENQUETE SUR LES PROCEDES DE TRAITEMENT.....		128
1	METHODOLOGIE.....	129
2	ETUDES DE CAS.....	129
2 1	LE QUESTIONNAIRE.....	129
2 2	TABLEAU RECAPITULATIF DES ETUDES DE CAS.....	136
3	ANALYSES DES ETUDES DE CAS.....	137
4	CONCLUSIONS.....	141
ANNEXE 4 - ASPECTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS.....		142
1	ASPECTS LEGISLATIFS.....	143
1.1	ASPECT REGLEMENTAIRE.....	143
1.1.1	Les Installations Classées.....	143
1.1.1.1	Les procédures réglementaires.....	143
1.1.1.2	Règles techniques imposées à l'exploitant.....	144
1.1.1.3	Contrôle.....	144
1.1.1.4	Sanctions.....	144
1.1.2	Aspects techniques de la réglementation des installations classées.....	145
1.1.2.1	La métrologie des odeurs.....	145
1.1.2.2	Métrologie et réglementation.....	145
1 1.3	Autres réglementations.....	145
1.1.3.1	Le règlement sanitaire départemental.....	145
1.1.3.2	La loi n° 61.842 du 2 août 1961 (lutte contre les pollutions atmosphériques).....	146
1.1.3.3	Décret du 13 mai 1974 (contrôle des émissions polluantes).....	146

1.1.3.4	Décret du 11 mai 1990 (taxe parafiscale)	147
1.2	TEXTES PARTICULIERS TRAITANT DU PROBLEME DES ODEURS : EXEMPLES	148
1.2.1	Arrêtés-types	148
1.2.2	Arrêtés, circulaires et instructions techniques	151
1.3	LA REGLEMENTATION AU PLAN COMMUNAUTAIRE	152
1.4	CONCLUSION	153
	Règlementation - Textes.....	154
	Bibliographie.....	156
2	QUALITE DE L'AIR : ASPECTS NORMATIFS	157
2.1	LA NORMALISATION : SES APPORTS.....	157
2.1.1	Généralités.....	157
2.1.2	Définition de la norme.....	157
2.1.3	Rôle de l'Afnor : élaboration et promotion des normes	157
2.2	LA QUALITE DE L'AIR	157
2.3	L'ISO (INTERNATIONAL STANDARDISATION ORGANISATION)	158
2.3.1	Règles de fonctionnement	158
2.3.2	La normalisation internationale en qualité de l'air.....	158
2.4	LE CEN (COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION)	158
2.4.1	Règles de fonctionnement	158
a-	Obligation de reprise.....	158
b-	Statu-quo.....	158
c-	Vote à majorité qualifiée.....	159
2.4.2	La normalisation en qualité de l'air au CEN.....	159
a-	CEN/TC 137	159
b-	CEN/TC 264	159
2.4.3	Relations ISO/CEN	159
2.5	L'AFNOR.....	159
2.5.1	Commissions françaises	159
2.5.2	Leurs missions.....	160
2.6	LES OBJECTIFS	160
2.6.1	Suivre l'ISO et le CEN.....	160
2.6.2	Participer.....	161
2.6.3	Prendre des initiatives.....	161
2.6.4	Olfactométrie	161
2.6.5	Les moyens.....	161

ANNEXE 5 - LISTES DES PRINCIPAUX ACTEURS DANS LE DOMAINE DES ODEURS	163
Analyse et mesure de gaz - matériels.....	164
U.V. et visible - Paramagétisme - Electrochimie - Chimie - Chromatographie gazeuse - Spectrométrie de masse.....	164
Absorption de rayonnement - Chimie Luminescence - Fluorescence - Infrarouge.....	165
Gaz toxiques.....	166
Contrôle de la pollution atmosphérique.....	166
Mesure et contrôle de l'émission des gaz et poussières.....	167
Ambiance de travail	168
Analyse (olfactométrie)	168
Associations - Centres de documentation - Centres de recherche.....	168
Procédé de traitement (fournisseurs).....	169
absorption.....	169
adsorption.....	169
biofiltration.....	170
biolaveur	170
Incinération	170
ozonation	171

ANNEXE 1

COORDONNEES DES EXPERTS

Jean-Régis Degorce-Dumas

Laboratoire Génie de l'Environnement
Centre de l'Environnement Industriel

Ecole des Mines d'Alès

6 Avenue de Clavières

30319 Alès Cedex

Tel 66 78 53 43 Télécopie 66 78 52 01

Jean-Louis Fanlo

Laboratoire Génie de l'Environnement
Centre de l'Environnement Industriel

Ecole des Mines d'Alès

6 Avenue de Clavières

30319 Alès Cedex

Tel 66 78 53 45 Télécopie 66 78 52 01

Pierre Le Cloirec

Laboratoire Génie de l'Environnement
Centre de l'Environnement Industriel

Ecole des Mines d'Alès

6 Avenue de Clavières

30319 Alès Cedex

Tel 66 78 53 72 Télécopie 66 78 52 01

Guy Martin

Laboratoire Chimie des Nuisances et Génie de l'Environnement
E.N.S.Chimie

Avenue du général Leclerc

35700 Rennes

Tel 99 87 13 26 Télécopie 99 87 13 99

Marie-Line Perrin

Laboratoire d'Olfactométrie
IPSN

60-68 Avenue du général Leclerc

BP 6 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex

Tel 46 54 77 96 Télécopie 46 57 22 74

Martine Ramel

INERIS
Parc Technologique ALATA

BP 2 60550 Verneuil-en-Halatte

Tel 44 55 66 77 Télécopie 44 55 66 99

Gérard Lamaty

Laboratoire de Chimie Organique
USTL

Place E Bataillon

34095 Montpellier Cedex 5

Tel 67 14 38 02 Télécopie 67 54 30 79

Jean-Louis Terra

Centre Hospitalier Spécialisé "Le Vinatier"
Centre Hospitalo-Universitaire de Psychiatrie

95 Boulevard Pinel

69677 Bron Cedex

Tel 72 35 85 46 Télécopie 72 35 85 45

Paul Laffort

Physiologie de la Chimioréception, CNRS

Avenue de la Terrasse

91198 Gif-Sur-Yvette

Tel (1) 69 82 39 08 Télécopie 69 82 37 67

ANNEXE 2

ODEURS ET DESODORISATION INDUSTRIELLES
ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

1 - PERCEPTION - COMMUNICATION

DU RISQUE PSYCHIQUE A L'ACCEPTABILITE

Dans cette note, nous essayons de montrer à partir d'arguments appartenant aux champs de la psychologie et de l'épidémiologie psychiatrique pourquoi l'émanation d'odeur peut "atteindre" la population exposée au point de provoquer des manifestations pathologiques individuelles et susciter aussi des phénomènes de groupe.

Les facteurs favorisant une acceptabilité des émanations odorantes issues de décharges seront envisagées ensuite pour proposer quelques lignes de force dans une stratégie de communication avec les populations exposées.

1.1 LES ODEURS

La perception des odeurs se situe essentiellement dans le règne du qualitatif avec des odeurs neutres, bonnes et mauvaises.

L'odorat est un système de détection très puissant dont les performances varient selon qu'il s'agit d'exposition aiguë ou chronique. Ses performances peuvent être développées par l'apprentissage et liées à la tonalité affective de certaines odeurs pour un individu, selon son histoire.

L'odeur, qu'elle soit bonne ou mauvaise, est analysée par le système olfactif dont les récepteurs sont dans les fosses nasales. D'une part, pour beaucoup de personnes, les notions de goût et odorat sont souvent confondues, peut-être, parce qu'associées lors de la prise alimentaire. D'autre part, la perception d'odeur est liée au phénomène de la respiration avec l'impression que l'air odorant pénètre au profond du corps. Certaines odeurs "lourdes", très présentes, voire oppressantes induisent la sensation d'étouffer, de manquer d'air. La pénétration de l'odeur dans le corps peut induire l'image d'un empoisonnement et réveiller les racines historiques du gaz ypérite et de l'extermination collective. Elle rappelle ainsi le danger domestique représenté par le gaz avec le risque d'explosion en cas de fuite. Au-delà des perturbations physiologiques liées à un risque toxique, le risque est représenté par la valeur symbolique du respir comme synonyme de vie. La sensation de manquer d'air est un des signes principaux de la claustrophobie et surtout de la crise d'angoisse aiguë. Dans cette dernière, l'angoisse de mort, omniprésente, peut paralyser le fonctionnement pendant plusieurs heures.

Dans le cadre des nuisances induites par les décharges, le sujet exposé aux odeurs n'a peu ou pas de moyens de s'y soustraire. La mobilité de l'odeur transporte les "molécules" à domicile et abolit ainsi les distances qui ne sont plus préservées avec les autres nuisances (visuelles, auditives) ainsi que la possibilité de repérer la direction de la source.

1.2 LA QUETE DE CAUSALITE

Invisibles et pénétrantes, les odeurs peuvent représenter une violence subie passivement par l'individu. La perception d'une odeur conduit l'individu à rechercher la source et la cause de cette perception. L'odeur jouerait le rôle de trace d'un objet à rechercher évoquant par là le comportement de la chasse. Ce rapprochement permet de saisir la force avec laquelle l'appareil psychique cherche à associer une odeur avec l'image de sa source. Il est possible que le caractère invisible de l'odeur soit le moteur de cette avidité de représentation.

L'odeur est importante dans la reconnaissance du Soi Non-Soi, dans l'attachement maternel, dans la sexualité et dans le processus d'élimination des déchets corporels.

Une mauvaise odeur peut évoquer à la fois l'étranger, le sexuel, le honteux, l'objet à éloigner de soi (l'abject). La paradigme de cet objet étant le cadavre.

La perception d'une odeur mauvaise induit la recherche de son mécanisme de production. Que la tolérance diffère selon qu'il s'agit d'une entreprise de "construction" ou d'une entreprise de "destruction" est très probable car les enquêtes réalisées auprès des travailleurs, montrent que la satisfaction se greffe sur la notion de production de produits finis et la qualité de vie négative vers celles d'hygiène insuffisante et mauvaise d'atmosphère de travail. Il est possible que cette démarche intellectuelle augmente l'image négative des décharges auprès du public en raison de leur improductivité et du manque de noblesse de l'entreprise.

1.3 ODEUR ET SANTE

De l'histoire de la médecine, on retient que les germes bactériens ne signalaient leur présence et n'étaient repérés que par l'odeur qui émanait de l'infecté avant l'ère pasteurienne. A cette époque, le flairage médical remplaçait le microscope.

Au temps d'une médecine peu performante, la prescription du bon air était quelquefois la seule action possible.

Le climat, vif et pur de moyenne montagne a toujours été considéré comme propice à une bonne santé et favorable pour lutter contre les maladies pulmonaires, à apaiser les nerfs voire à contrecarrer les méfaits du confinement des villes et son lot de misère sociale, par l'instauration de Centres Aérés. Si ces principes sont moins actifs actuellement, ils restent vifs pour les personnes atteintes d'affection respiratoire chronique et surtout l'asthme connu pour l'importance des facteurs psychologiques dans sa pathogénèse. Les personnes entourant une personne dont la santé est un sujet de préoccupation, telle qu'un enfant en bas âge ou une personne âgée, peuvent être très attentives à la qualité de l'atmosphère, de façon légitime mais parfois de façon excessive en raison de leur inquiétude.

1.4 PERCEPTION DES ODEURS ET TROUBLES PSYCHIQUES : DE L'INDIVIDUEL AU COLLECTIF

Si les odeurs des décharges existent bel et bien, elles peuvent être l'épine irritative et servir d'alibi à des phénomènes psychopathologiques massifs avec l'excitation puis la décharge tensionnelle de trouver un vrai persécuteur. En effet, l'étranger, l'innommable peut être le support de toutes les projections psychiques qui rappelons-le, sont une façon de mettre à l'extérieur de soi ce qui nous est insupportable, d'attribuer à l'autre ce qui nous appartient initialement : de façon simplifiée, on peut dire qu'il s'agit d'un processus de détoxication sommaire. Ici, il faudra encore distinguer les phénomènes individuels, liés à l'histoire

personnelle et les phénomènes de groupe. L'intensité et la densité des premiers sera à même de catalyser les seconds.

Classiquement, une attention excessive portée aux odeurs ou une perception anormale ne sont pas des symptômes de premier rang dans les affections mentales.

D'une façon générale, anxieux, phobiques et obsessionnels peuvent être vigilants à ce phénomène s'il existe, mais comme pour tout autre évènement de leur vie, il est cependant important de dire que le trouble anxieux touche environ 10 % de la population générale et que ces individus peuvent servir de caisse de résonance à une inquiétude initialement légitime.

En cas de désagrément collectif, deux types de personnalités peuvent avoir une conduite inflationniste vis-à-vis du phénomène. Ce sont les personnalités hystériques qui peuvent alimenter l'angoisse collective par leur capacité à dire leurs affects et à les transmettre aux autres et les personnalités paranoïaques propres à démontrer l'inanité du sort qui leur est fait et capables de recueillir les suffrages par voie de pétitions.

Ces éléments sont à prendre en compte non pour dénier les nuisances réelles mais pour dire que dans certains cas, la communication avec les populations est sous le sceau de composantes psychopathologiques qui hypothèquent les possibilités de négociation et de gestion des conflits.

Enfin, il faut savoir qu'il n'existe pas de population générale saine. Celle-ci est constituée de sujets plus ou moins bien portants tant sur le plan somatique que psychique, avec au moins 15 % de perturbations psychologiques.

En faisant l'hypothèse que le nuage odorant par son côté enveloppant synchronise le vécu des habitants sous son "influence", on considère que cette population fonctionne comme un grand groupe. Cette cohésion issue d'un percept négatif, sera à la source de comportement collectif dont les règles de fonctionnement sont connues. On peut citer :

- l'aspect climatologique pour évoquer la sensibilité du groupe à l'atmosphère affective,
- son rôle de catalyseur émotionnel mettant en phase les individus, phénomène renforcé par les médias,
- sa dépendance vis-à-vis d'un leader mais aussi vis-à-vis d'un persécuteur (leader négatif),
- le groupe favorise aussi l'instinct grégaire, la pensée magique, ainsi que les illusions groupales et les positions manichéennes,
- enfin, l'angoisse du groupe peut se cristalliser autour de fantasmes originaires comme la crainte d'une attaque de la lignée (peur d'une atteinte de la descendance).

Afin d'éviter que les gestionnaires d'un site de déchets n'aient à faire face à un grand groupe assimilable à une foule dont on connaît l'imprévisibilité et l'émotionnalité des réactions (cf. travaux sur les peurs collectives), la communication doit prendre une forme structurée.

1.5 PROPOSITIONS STRATEGIQUES POUR FAVORISER L'ACCEPTABILITE DE SITES : CAS DES DECHARGES

De façon générale, il semble nécessaire de donner les moyens à la population de comprendre au mieux l'ensemble de problèmes des déchets, en expliquant leurs sources, leur méthode de traitement et de stockage. Donner des moyens au public d'avoir un accès aux sites, favoriserait la mise en représentation de ce qui se passe.

A une époque où la communication privilégie le visuel et le direct, donner la possibilité de "voir" un site paraît le moyen le plus propice à désamorcer l'idée que les gestionnaires cachent la réalité. Villeparisis est dans ce sens, un site exemplaire : l'entrée du site est filmée en permanence la nuit pour prouver à la population qu'aucun camion ne pénètre dans l'enceinte sans être programmé. Les cassettes, bien qu'à la disposition de la population n'ont jamais été demandées pour être visionnées.

La fonction des décharges doit être resituée dans le cadre de la production de biens de consommation qui sont nécessaires et familiers. Montrer à chaque citoyen dans quelle mesure il est lui-même un ordonnateur de déchets et lui indiquer quel en est le destin, permettrait de relativiser la présence d'un site "spécialisé" à proximité.

La maîtrise technique est importante à mettre en exergue tout en montrant ses limitations actuelles dans le domaine des odeurs. Pour ce qui concerne celles-ci, il serait utile d'indiquer que l'appareil olfactif permet la détection de produit à des concentrations très faibles et que dans la plupart des cas, la présence d'une odeur n'est pas synonyme de risque toxique. En effet, la prégnance de l'odeur peut faire supposer un risque toxique pour le corps au-delà du simple désagrément sensoriel.

Dans la situation où la nuisance est élevée, et qu'il ne se présente pas de solution radicale, une simple information ne suffit pas. En effet le public ne saurait être cantonné longtemps dans son rôle de victime éclairée sur ce qui l'importune. Donner l'occasion d'une participation active aux personnes exposées peut se faire en associant la population à des cercles de qualité qui s'associeraient pour promouvoir et évaluer de nouvelles mesures.

Cette démarche est différente dans le cas d'un site "propre" où les progrès sont tels que la population après une phase d'inquiétude ne souhaite plus en entendre parler. Dans ce cas, il resterait indispensable de communiquer régulièrement des bilans d'exploitation afin de ne pas enterrer les problèmes.

QUE FAIRE APRES ?

Intégrer le site dans le paysage, comme un corps non étranger aux éléments naturels est la tentation qui guette l'entreprise qui réussit sa communication.

Jusqu'où peut-on aller dans l'illusion pour faire penser que cette "bosse" n'est qu'un plissement géologique.

Le public est certainement plus séduit par une restitution ad integrum, espèce de chirurgie esthétique réparatrice du paysage que par un site qui garderait les stigmates de l'activité industrielle de l'homme. Pourtant il y a peut-être un danger à favoriser l'oubli de l'histoire du site même s'il s'agit d'une demande collective.

Faire un parc de santé sur une ancienne décharge est d'une rare élégance mais risque de se révéler trop audacieux si un incident venait transformer l'illusion en duperie.

BIBLIOGRAPHIE

- **ANZIEU D.** *Le groupe et l'inconscient*, Paris, DUNOD, 1975.

- **DU TOIT A.J.** Practical odour nuisance gauging : two case studies of objective odour quantification in agriculture and industry. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 21, Brighton, pp. 1077-1087, 1989.

- **FIRNHABER WHITE R., FELDMAN R.G., HYLAND TRAVERS P.** Neurobehavioral Effects of Toxicity Due to Metals, Solvents and Insecticides. *Clin. Neuropharm.* Vol. 13, N°5, pp. 392-412, 1990.

- **LANDRIGAN P.J.** Toxic exposures and psychiatric disease-lessons from the epidemiology of cancer. *Acta. Psychiatr. Scand. Suppl.* Vol 303, pp. 6-15, 1983.

- **LANDRIGAN P.J.** Environmental exposure to neurotoxic agents and psychiatric disease - a new problem ? *Acta. Psychiatr. Scand. Suppl.* Vol. 303, pp 1-104, 1983.

- **LEROY C.** Psychopathologie liée aux milieux urbains. *Encycl. Méd. Chir., Paris, Psychiatrie*, 37 881 A¹⁰, 10-1981.

- **LEWIN K.** *psychologie dynamique*, Paris, P.U.F., 1959.

- **STEWART D.E., RASKIN J.** Psychiatric assessment of patients with "20th century disease" ("total allergy syndrome"). *Can. Med. Assoc. J.* Nov. 15, Vol 133 (10), pp. 1001-1006, 1985.

2 - METROLOGIE

2.1 LA MESURE DES ODEURS

L'odorité d'une atmosphère donnée, c'est-à-dire son aptitude à provoquer une sensation olfactive, peut être mesurée en utilisant différents groupes de techniques, chacune ayant sa spécificité propre.

2.1.1 LE MODELE ANIMAL

L'odorat des animaux, notamment du Chien, est utilisé en maintes circonstances pour détecter la présence de certaines odeurs : victimes ensevelies à la suite d'avalanches ou de tremblements de terre, stupéfiants, explosifs, pistes de suspects, truffes (conjointement avec la Truie), et bien entendu... le gibier de chasse. Ce type de détection est "tout ou rien" ; en d'autres termes, l'animal trouve ou ne trouve pas une source d'odeur.

Lorsque la question posée porte sur la nuance qualitative de l'odeur ou sur son caractère plus ou moins intense, on est amené à utiliser des protocoles expérimentaux plus élaborés que l'habituel "dressage" par un maître-chien, et qui, peut-être en partie pour cette raison, ne sont guère appliqués que dans les laboratoires de recherche. En fait, cette tradition pourrait être remise en question, via le recrutement de biologistes par l'industrie. Une deuxième raison de leur non-utilisation à des problèmes d'environnement est très certainement la mauvaise connaissance des spectres de sensibilité olfactive des différentes espèces animales étudiées, comparées au spectre de sensibilité humaine. Cette méconnaissance pourrait faire l'objet d'un axe de recherche à recommander de manière à rendre possible la transposition de l'une en l'autre.

On distingue principalement les techniques électrophysiologiques, consistant à recueillir les influx nerveux de l'appareil olfactif au moyen d'électrodes, et les techniques de comportement conditionné. Concernant ces dernières, on sait, par exemple, très facilement apprendre à une abeille à tirer la langue lorsqu'elle se trouve en présence d'une odeur de qualité et d'intensité définie, et à ne pas la tirer pour une odeur très différente ou pour des concentrations plus faibles. Malheureusement, pourrait-on dire, s'il a été prouvé que le spectre odorant de l'abeille est très comparable à celui de l'Homme pour de nombreuses substances, il a également été montré qu'il n'en allait pas de même pour différentes substances souffrées (quasi confusion avec des alcanes de même volume moléculaire).

Parmi les techniques électrophysiologiques, on a appliqué au dépistage de pollutions de cours d'eau, des truites équipées d'électrodes bulbaires permanentes (1). S'agissant de pollution atmosphérique, l'utilisation de rongeurs (lapins?) équipés d'électrodes bulbaires chroniques multipolaires pourrait être envisagée. L'information que l'on pourrait en obtenir concernerait à la fois l'intensité odorante et un certain profil qualitatif. Il est à préciser que ce type d'équipement se met en place sous anesthésie, et n'est pas douloureux après le réveil.

Il existe d'autres techniques d'expérimentation animale, mais qui relèvent pour l'instant de la recherche pure. D'une manière générale, l'intérêt que présente l'animal par rapport à l'Homme pour la mesure des odeurs tient, dans de nombreuses circonstances, à une plus grande précision. Il peut également présenter un moindre coût.

2.1.2 LA PSYCHOPHYSIQUE

On appelle ainsi l'ensemble des techniques qui permettent de recueillir des informations sensorielles, et donc pour ce qui nous concerne, olfactives, à partir des réponses de sujets humains. Elles sont actuellement bien au point et directement applicables à des études d'environnement. En d'autres termes, la qualification de "subjectives" que l'on utilise parfois pour les désigner, est incorrecte. En fait, l'odorité est une propriété biologique, au même titre que le caractère hormonal ou vitaminique, par exemple, de certaines substances. Comme telle, elle varie selon les individus, et pour un individu donné, en fonction d'un certain nombre de paramètres tant externes (durée de la stimulation, température ambiante et vitesse d'insufflation, notamment), qu'internes (rhinites, état consécutif à une activité physique récente, âge, taux d'imprégnation hormonale sexuelle, état de faim, de fatigue, etc). A ces variations sensorielles proprement dites s'ajoute, il est vrai, au niveau de la mesure, un "bruit de fond" imputable au psychisme humain (attitude "divinatoire" et degré de motivation, principalement). L'ensemble de ces faits est pris en compte dans les protocoles expérimentaux utilisés et dans les traitements des données obtenues (2, 3). L'intervalle de confiance pour une population moyenne peut alors être estimé entre 5 et 10% de l'échelle totale ; soit, par exemple, 0.5 à 1 unité log de concentration pour les seuils olfactifs, l'écart entre les seuils des substances les plus odorantes et l'inodorité couvrant environ 10 unités log.

Quatre types de mesures sont utilisés :

2.1.2.1 Le seuil olfactif ou seuil de minimum perceptible

Il est défini comme correspondant à une probabilité de réponse positive de 0.5. Son application à l'environnement est préconisée dans deux situations :

- **A la sortie d'une source odorante** (cheminée d'usine par exemple).

A l'aide de modèles de dispersion d'atmosphères prenant en compte les paramètres météorologiques et topographiques, on peut définir un volume autour de la source au delà duquel il n'y a plus d'odeur.

- **Pour évaluer le rendement d'un procédé d'épuration.**

Le rapport du seuil de sortie au seuil d'entrée permet de comparer l'efficacité de différents procédés vis-à-vis d'une même source. En revanche il ne permet pas d'évaluer la diminution d'intensité odorante, pour les raisons développées ci-après.

Pour ces mêmes raisons, l'utilisation du concept "d'unité d'odeur", qui est un multiple de la concentration seuil, est à proscrire dans toutes les autres situations concrètes.

Il existe un certain nombre de recueils de seuils olfactifs pour des substances définies. Le plus récent et complet donne les valeurs de "seuils standard moyens" dans l'air pour 540 substances (4).

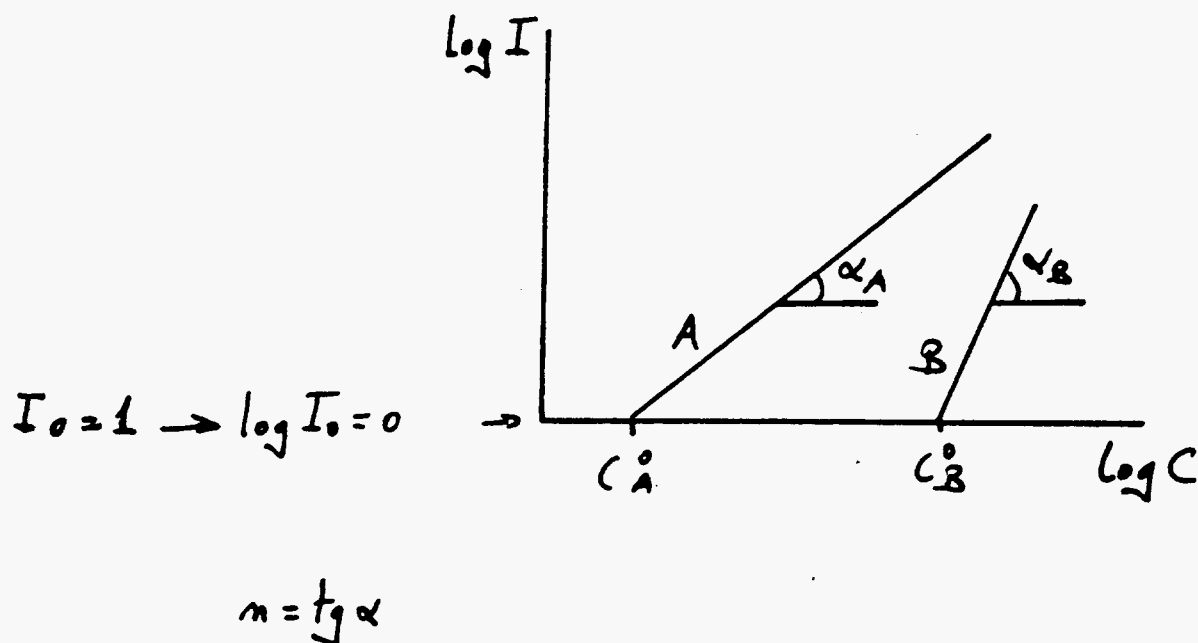
L'AFNOR a édité un cahier des charges des appareillages devant servir à des mesures de seuils olfactifs (olfactomètres) ainsi que de leur mode d'emploi (2).

2.2.2.2 L'intensité odorante

Elle croit en fonction de la concentration C , au delà de la valeur seuil C_0 , selon la loi dite de Stevens :

$$I = \left(eq \frac{C}{C_0} \right)^n$$

En olfaction l'exposant n a une valeur inférieure à 1 et varie selon les substances. On représente généralement cette fonction sous forme log-log, ainsi que ci-après :



Cet effet de pente peut être important, et doit donc être pris en considération dans nombre de situations. Par exemple, un niveau odorant sur site de 1000 "unités d'odeur" correspondra à 250 unités d'intensité odorante si l'exposant est 0,8 et à 4 seulement si l'exposant est de 0,2.

Il existe comme pour les seuils, des recueils d'exposants olfactifs standardisés moyens. Le plus complet actuellement publié porte sur 110 substances (5). Une version plus récente d'exposants pour 193 substances est en cours de publication (6).

La méthode de mesure directe d'intensités odorantes recommandée par l'AFNOR (3) est celle d'une égalisation avec des étalons précalibrés, soit de butan-1 ol, soit de pyridine, de concentrations variant selon une échelle géométrique. On choisit de préférence la pyridine lorsqu'il s'agit d'odeurs déplaisantes, mais une table de conversion permet de passer d'une échelle à l'autre, de manière à rendre comparables les données obtenues au moyen des deux méthodes. Un recoupement avec des données publiées pour des substances pures peut éventuellement être opéré en affectant au butan-1-ol un exposant égal à 0,5.

2.1.2.3 La qualité odorante

Ce terme s'entend ici dans le sens de caractérisation d'un type d'odeur ("ça sent le citron"), sans aucune connotation sur l'agrément ou le désagrément qu'elle peut provoquer. On préfère réserver pour ce dernier concept, de manière à éviter toute confusion, le terme de "caractère hédonique".

On distingue deux groupes d'approches permettant de caractériser la qualité odorante : l'ensemble des méthodes de type synthétique ("ces deux odeurs sont très - ou pas du tout - ressemblantes") et celles de type analytique ("odeur fraîche, verte, de nuance citronnée, avec un soupçon de note poivrée"). Il existe d'assez nombreuses données dans la littérature d'après l'une ou l'autre de ces méthodes d'approche. Celles de type analytique présentent l'avantage, en général, de faire appel à une expérimentation moins lourde : soit N le nombre de substances étudiées et M celui de descripteurs sémantiques ou de substances étalon ; on aura NM mesures à effectuer, alors qu'avec les méthodes de type analytique on en aurait $[N(N-1)] / 2$; tout dépend du rapport N / M .

Un des problèmes qui se pose, pas totalement élucidé, est de savoir comment le cerveau humain passe du concept de description à celui de la ressemblance. Quel est le modèle mathématique de distance qui permet le mieux de mimer le passage de l'un à l'autre ? On sait d'ores et déjà que ni la distance euclidienne ni celle de X^2 (CHI-2) ne conviennent, et que le modèle qui, à ce jour, semble le plus performant, est une distance proposée par un ingénieur d'IBM : T.T. Tanimoto.

Dans certains milieux industriels (Philip Morris, Sopad-Nestlé) la méthode analytique, dite encore des profils, est largement utilisée en appliquant notamment une norme recommandée par l'ASTM (146 descripteurs sémantiques notés chacun de 0 à 5) (7). Dans le domaine de l'environnement, en revanche, ni l'une ni l'autre de ces méthodes ne semblent appliquées pour l'instant.

2.1.2.4 L'indice de gêne.

Cette méthode, préconisée et expérimentée par E. P. Köster aux Pays-Bas, a été expérimentée en France sur le site de l'étang de Berre ; elle est en cours à Rouen et sur le site de la station d'épuration d'Achères. Elle est basée sur la contribution bénévole d'un grand nombre de riverains de l'aire géographique à étudier, qui s'engagent à humer l'air de leur rue à des dates et au cours de tranches horaires convenues à l'avance, puis à noter sur une carte postale préaffranchie le degré de gêne ressenti selon une échelle en 5 points ("pas du tout gêné", un peu gêné, etc), enfin à poster chacune des cartes au fur et à mesure. Une variante française repose sur l'utilisation du Minitel.

Cette manière de procéder présente l'avantage de ne pas décomposer ce qui, dans la nuisance olfactive, provient du caractère déplaisant des polluants et ce qui provient de leur intensité odorante, dont on sait mal comment ils se combinent pour provoquer une "gêne". C'est donc cette dernière qui est évaluée directement.

Comme dans l'ensemble des méthodes psychophysiques, mais encore plus ici en raison du nombre élevé de participants et de leur caractère bénévole, des précautions multiples d'ordre psychologique sont indispensables pour arriver à des résultats reproductibles.

2.1.3 LES "NEZ ARTIFICIELS"

Au sein d'une source odorante où les polluants sont peu nombreux (par exemple 4 à 5) et où l'on dispose de capteurs appropriés, le problème est relativement simple à résoudre : il suffit de pondérer chacune des concentrations obtenues par les valeurs de seuils et d'exposants de Stevens standardisés, pour avoir les intensités odorantes de chacun des polluants à différents niveaux de dilution de l'ensemble (nous avons vu que ces niveaux de dilution autour d'une source pouvaient, eux aussi, être modélisés). Il ne reste alors qu'à sommer les intensités odorantes selon le modèle Gamma exposé dans la partie III de ce rapport (Désodorisation).

Tout autre est le problème de l'évaluation odorante d'une atmosphère donnée. Généralement les analyseurs physico-chimiques (ou capteurs) sont trop peu sensibles à cet effet. Pour pallier à cet état de fait, on procède à des concentrations d'atmosphères (l'étape préalable de prélèvements d'atmosphères odorantes a fait l'objet d'une norme AFNOR (8)). La deuxième difficulté qui se pose alors est la profusion de constituants détectés (on parle de "forêts de pics chromatographiques") et l'incertitude où l'on se trouve quant à l'impact odorant de chacun d'eux. De surcroît, les modèles d'addition d'intensités odorantes dont il a été fait mention plus haut, n'ont pas été validés au delà de mélanges à cinq composantes. Les solutions à ce type de problématique ne peuvent être d'ordre général mais passent très certainement par des études préalables au cas par cas combinant les méthodes psychophysiques et analytiques. Ce peut être, par exemple, pour une pollution de base relativement homogène mais modulée, un flairage en sortie de chromatographe après "splittage" approprié, puis une identification des fractions jugées olfactivement efficaces, et enfin la mise en œuvre de détecteurs spécifiques de ces fractions. On peut se trouver ramené, dans certains cas, à la situation du paragraphe précédent.

D'une manière générale, il semble que les axes de recherches à recommander, dans ce domaine, portent d'abord sur la mise au point (ou l'amélioration) de capteurs à la fois spécifiques et sensibles. On peut également être amené à compléter les banques de données psychophysiques standardisées existantes. Enfin, dans un but ultérieur de mise au point de détecteurs mimant l'appareil olfactif, les études en cours sur les relations de structure-activité pourraient être encouragées (9).

BIBLIOGRAPHIE

On peut se reporter, pour une information plus approfondie concernant la mesure des odeurs, à l'ouvrage publié sous la responsabilité de G. Martin et P. Laffort (10), notamment les chapitres 2 et 3 de E.P. Köster, les chapitres 5 et 6 de P. Laffort, et le chapitre 9 de M.L. Perrin et P. Le Cloirec. Les autres références ci-après ne sont mentionnées que pour appuyer certains points de détail.

- 1 Huve J.L., 1982, Un détecteur original de pollution : la truite, *La Recherche*, 13, 108-110
- 2 AFNOR, 1986, Qualité de l'air - Méthode de mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux - Détermination du seuil de perception, Norme X43-101, 19pp.
- 3 AFNOR, 1992, Qualité de l'air - Mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux - Méthodes supraliminaires, Normes X43-103 (en préparation).
- 4 Devos M., Patte F., Rouault J., Laffort P., Van Gemert L.V., 1990, Standardized human olfactory thresholds, IRL Press, Oxford, 165pp.
- 5 Patte F., Etcheto M., Laffort P., 1975, Selected and standardized values of suprathreshold odor intensities for 110 substances, *Chem. Senses Flavor*, 1, 283-305.
- 6 Laffort p., Devos M. 1990, A standardized database of the psychophysical function exponents for odour intensity, in : Döving K.B., *Olfaction and Taste X*, Oslo, p.354.
- 7 Dravnieks A. 1985, Atlas of odor character profiles, ASTM Committee E-18 (Section E-18-04-12), Data series DS 61, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103, USA, pp 354
- 8 AFNOR, 1989, Qualité de l'air - Atmosphères odorantes - Méthodes de prélèvement, Norme expérimentale X43-104, 15 pp.
- 9 Laffort P. 1993, Structuration graphique de la qualité odorante sur la base de données moléculaires - Cas des données expérimentales du groupe d'André Holley, *C.R.Acad.Sci.*, 316, 105-111.
- 10 Martin G., Laffort P., 1991, Odeurs et désodorisation dans l'environnement, Tec-Doc Lavoisier, Paris, 452 pp.

LES METHODES DE DESODORISATION

Que ce soit dans l'air ou dans l'eau, on distingue classiquement trois groupes de méthodes de désodorisation, respectivement d'ordre physique, chimique et biologique. Le dernier nommé désigne, d'une part une transformation des composés organiques par la mise en œuvre de micro-organismes, d'autre part, l'action consistant à casser des synergies existantes entre les différents polluants ou à provoquer des inhibitions. Ces phénomènes de synergie et d'inhibition, c'est-à-dire d'une manière plus générale, d'interaction, sont bien connus en pharmacologie. Ils le sont également en olfaction par les spécialistes de ce domaine, mais jusqu'à une époque relativement récente, sans aucune possibilités prédictive. La situation actuelle est beaucoup plus satisfaisante, même si des progrès restent à accomplir. Résumons-là rapidement :

- il n'y a de possibilité prédictive que lorsqu'on exprime les intensités odorantes d'un mélange en fonction des intensités odorantes des constituants. Toutes choses étant égales par ailleurs, une paire de substances odorantes est caractérisée par une constante ($\cos \alpha$), que l'on détermine expérimentalement pour quelques cas particuliers. La généralisation de la validité du modèle (dit "en U") à d'autres concentrations que celles ayant servi à l'établissement de la constante $\cos \alpha$, a été largement démontrée pour des mélanges binaires, sommairement pour des mélanges à plusieurs composantes.

- La constante $\cos \alpha$ dépend d'une part des exposants de Stevens des constituants du mélange, et d'autre part d'un degré d'interaction intrinsèque que l'on caractérise par l'indice Γ (Gamma). On constate une interaction intrinsèque pour certaines paires de substances et pas pour d'autres, mais le nombre de valeurs de Γ actuellement connu est trop faible pour permettre de tenter une relation de structure-activité.

- La simple prise en considération de la loi de Stevens (qui lie l'intensité odorante à la concentration, ainsi que nous l'avons vu) a permis de démontrer qu'en absence d'interaction intrinsèque, des mélanges de substances à exposant fort se traduisent par des situations de forte "interaction apparente" mutuelle, variant de sens en fonction des concentrations réciproques. (Nous appelons, faute de mieux, "interaction apparente", celle que l'on observe lorsqu'on exprime une intensité odorante en fonction des concentrations des constituants). Ce dernier point est d'ores et déjà, lui aussi, applicable à l'environnement.

Les axes de recherche que l'on peut recommander dans ce domaine portent donc, d'une part sur la détermination de l'indice Γ pour un grand nombre de paires de substances et d'autre part sur la validation (et éventuellement l'affinement) des modèles en U et Γ appliqués à des mélanges à plus de deux composantes.

Bibliographie.

On peut, pour davantage de détails concernant cette problématique, se reporter au chapitre 7 de P. Laffort dans l'ouvrage déjà cité : "Odeurs et désodorisation dans l'environnement (1991) paru chez Lavoisier.

2.2 OLFACTOMETRIE DANS L'INDUSTRIE

Application à la mesure des odeurs à l'émission et évaluation dans l'environnement

Généralités

Un certain nombre de branches industrielles sont responsables de l'émission, dans les lieux de travail ou dans l'environnement, de polluants qui, même s'ils ne présentent aucun caractère toxique ou irritant, n'en sont pas moins très désagréables par leurs propriétés malodorantes.

Les odeurs sont liées à la présence de certains composés chimiques dans l'air que l'on respire : de cette évidence découle normalement l'idée d'identifier par techniques physico-chimiques les corps purs présents dans cet air et d'utiliser une table des valeurs des paramètres olfactifs établie pour les corps purs ; mais d'une part, la plupart des produits odorants le sont à des concentrations si faibles que même les analyseurs les plus performants sont souvent incapables de les déceler et, d'autre part, les propriétés des mélanges sont différentes de celles des constituants : il est possible qu'il y ait inhibition ou exacerbation d'une partie (ou de l'ensemble) des corps purs odorants par suite de réactions de ceux-ci avec d'autres composés chimiques, même non odorants.

En conclusion, dans l'état actuel des connaissances, seul un être humain peut dire si un mélange de molécules est odorant ou non.

L'olfactométrie est donc basée sur les seuls capteurs disponibles, à savoir les muqueuses olfactives des êtres humains. Il est clair que ceci pose des problèmes pratiques. En effet, la sensation olfactive qui résulte de l'interaction d'un nombre donné de molécules odorantes avec la muqueuse varie non seulement d'un individu à l'autre, mais aussi, pour un même individu, en fonction de son état physiologique et des conditions de flairage. Cependant, grâce aux travaux effectués par des chercheurs de diverses origines, la mesure des odeurs, ou olfactométrie, est fondée sur des bases scientifiques sérieuses, et elle peut être utilisée avec profit dans l'industrie.

L'olfactométrie consiste à mesurer :

- la concentration d'une atmosphère odorante au seuil de détection (terme recommandé par rapport à seuil de perception), généralement exprimé par un nombre sans dimension,
- l'intensité odorante d'une atmosphère, généralement exprimée par rapport aux niveaux d'une gamme donnée d'une échelle de référence.

Ces mesures s'effectuent par traitement statistique des réponses verbales d'un jury d'observateurs entraînés supposé constituer un échantillonnage représentatif de la population standard auquel on présente l'atmosphère odorante à étudier.

La précision des résultats, leur cohérence et leur reproductibilité dépendent essentiellement de la manière dont le jury a été sélectionné et entraîné, et des procédures de travail adoptées, notamment sur le terrain.

2.2.1 METHODE DE MESURE DE LA CONCENTRATION D'UN MELANGE ODORANT AU SEUIL DE DETECTION (OU DETERMINATION DU FACTEUR DE DILUTION AU SEUIL DE DETECTION)

2.2.1.1 Définitions

2.2.1.1.1 Gaz inodore

C'est un gaz qui est constamment jugé inodore par chacun des membres du groupe de sujets. Dans la pratique, c'est de l'air ou de l'azote éventuellement filtré sur charbon actif. A cause du phénomène d'adaptation, il est difficile de distinguer un gaz réellement inodore d'un gaz faiblement odorant auquel on s'est totalement adapté.

2.2.1.1.2 Facteur de dilution

Q_1 étant le débit de gaz inodore qui sert à diluer un débit Q_2 de gaz odorant, le facteur de dilution est donné par :

$$K = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2}$$

Il est indifférent que Q_1 et Q_2 soient exprimés en unités de masse ou de volume pourvu que celles-ci soient identiques pour les deux débits.

2.2.1.1.3 Seuil de détection

Par convention, c'est la concentration des molécules odorantes dans l'air dont la probabilité de détection est de 0,50. On distingue deux niveaux liminaires : d'une part, le seuil de détection qui correspond exactement à la définition précédente, et d'autre part, le seuil d'identification qui correspond à la possibilité de reconnaître non seulement la présence mais encore la nature du stimulus (le seuil d'identification n'est pas pris en considération dans ce texte).

2.2.1.1.4 Facteur de dilution au seuil de détection, K_{50}

C'est la valeur de la dilution qui permet de ramener la concentration du mélange odorant à la concentration qui correspond au seuil de détection.

K_{50} est généralement représenté par un nombre sans dimension (à l'étranger, K_{50} est quelquefois exprimé en unités odeurs u.o).

2.2.1.1.5 Concentration

Pour chaque mélange odorant on peut définir une concentration seuil. Pour cette concentration, la probabilité de détection du mélange odorant par un jury d'observateurs est de 0,50. Par définition, la concentration du mélange est alors égale au seuil et vaut 1. Toute autre concentration du mélange odorant est exprimée par rapport à cette concentration seuil et est représentée par un nombre qui est égal à K_{50} .

2.2.1.2 Principe de la mesure

Ce principe, donné dans la norme AFNOR NF X 43-101, est rappelé ci-après.

Le mélange odorant est présenté, après avoir été dilué par un gaz inodore approprié, à chacun des membres d'un jury d'observateurs entraînés qui indique individuellement s'il perçoit ou ne perçoit pas l'odeur du mélange. Pour chacun des sujets, on définit, sur la base d'essais successifs, une estimation du taux de dilution pour lequel la probabilité de détection de l'odeur est égale à 0,50.

2.2.1.3 Echantillonnage

C'est une phase importante du procédé de mesurage de l'odeur ; il conditionne la qualité et la fiabilité du résultat de la mesure.

Le prélèvement des atmosphères odorantes est décrit dans la norme AFNOR X 43.104 que l'on consultera pour plus de détails.

Le plus souvent, l'atmosphère odorante à analyser est prélevée dans un conteneur adéquat qui est le plus souvent un sac en matière plastique dont le volume doit être tel qu'il suffise pour l'analyse olfactive.

2.2.1.4 Appareillage

Le mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux au seuil de détection nécessite un olfactomètre. L'olfactomètre est un dispositif qui permet de contrôler la dilution du mélange odorant par le gaz inodore et de présenter le mélange dilué à un sujet. Il doit répondre à un certain nombre d'exigences vis-à-vis du sujet et du mélange odorant. Seuls les olfactomètres dynamiques sont fiables. Le taux de dilution doit pouvoir varier rapidement de 10 à 10 000. Le dispositif de couplage olfactomètre-sujet doit permettre un flairage et éviter les entrées d'air et l'adsorption ; il est réalisé en matériaux peu adsorbants et un dispositif à trois canaux est particulièrement recommandé en raison de la procédure dite "à choix forcé" décrite dans le paragraphe 1.6 (voir pour plus de détails l'appareil décrit dans la norme AFNOR X 43 - 101). Le débit de sortie conseillé est de l'ordre de 2 m³/h.

2.2.1.5. Sélection des personnes constituant le jury ; composition de celui-ci

Pour faire partie du jury, il faut être capable de classer correctement par ordre d'intensité des solutions de butan-1-ol ou de pyridine dans l'eau, les concentrations de ces solutions étant distribuées régulièrement dans une gamme de 1 à 1000.

Les sujets sont ensuite qualifiés en fonction de leurs seuils individuels de détection pour 5 produits purs (butan-1-ol, hexan-2-one, pyridine, acide propionique, ter-butyl-mercaptan). Pour la plupart de ces produits, le seuil de chaque sujet doit se situer dans la fourchette 0,1 à 10 fois le seuil moyen donné en référence. On vérifiera de temps à autre cette qualification.

On retiendra autant que possible, pour un jury donné, des sujets ayant des seuils dispersés de façon homogène. Il n'y a, en particulier, aucun intérêt à sélectionner les sujets les plus sensibles.

De très grandes différences qualitatives et quantitatives existant normalement entre les sensibilités olfactives des individus, la valeur représentative de l'échantillon de population que constitue un jury dépend directement de son effectif. Un compromis doit donc être recherché entre le coût et la validité des résultats obtenus.

Il est recommandé d'avoir recours à au moins :

- 16 sujets lorsqu'on désire une bonne précision sur la valeur de la mesure,
- 6 à 8 sujets dans la plupart des cas,
- 4 sujets dans le cas de mesures comparatives.

2.2.1.6 Mode opératoire

L'estimation de la concentration au seuil de détection se fait par présentation aléatoire d'une série préétablie de dilutions distribuées en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$ et calculées à partir d'une dilution voisine du seuil de détection. Ces dilutions sont délivrées dans l'un des trois canaux de l'olfactomètre, les deux autres canaux étant alimentés en air inodore. Le sujet doit indiquer, après flairage, lequel des trois canaux est odorant. La réponse est à choix forcé, c'est-à-dire que les réponses dubitatives ne sont pas admises : en cas d'hésitation, le sujet doit répondre au hasard.

2.2.1.7 Traitement statistique des résultats

Le traitement statistique de l'ensemble des réponses données à la série de dilutions présentées permet de déterminer le facteur de dilution individuel au seuil de détection et par là de déterminer le seuil de détection d'une population (cf. norme AFNOR NF X 43-101).

2.2.2 METHODES DE MESURE DE L'INTENSITE ODORANTE D'UNE ATMOSPHERE

2.2.2.1 Définition

L'intensité odorante d'une atmosphère est la grandeur de la sensation pour une concentration du stimulus supérieure à celle correspondant au seuil de détection. L'intensité odorante est le plus souvent une fonction croissante de la concentration du mélange odorant jusqu'à saturation.

2.2.2.2 Principe de la mesure

La mesure de l'intensité odorante s'effectue par une méthode psychophysique à l'aide d'un jury d'observateurs entraînés à qui l'on présente l'atmosphère à étudier et dont les réponses font l'objet d'un traitement statistique.

2.2.2.3 Sélection des personnes constituant le jury ; composition de celui-ci

La sélection des personnes constituant un jury pour mesure de l'intensité odorante est identique à celle décrite en 1.5. Il en est de même pour la composition de ce jury.

2.2.2.4 Mode opératoire

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation de l'intensité odorante ; une seule de ces méthodes est donnée dans la norme AFNOR X 43-103 (en cours de publication) et rappelée ici, la méthode d'équivalences olfactives ("olfactory matching"), la plus utilisée dans la pratique industrielle.

Cette méthode comporte l'utilisation d'une gamme d'intensités de référence, constituée à l'aide de plusieurs échantillons contenant des concentrations connues de corps purs judicieusement choisis en solution dans l'eau ou dilués avec de l'air propre. La mesure consiste à comparer l'intensité du stimulus à l'intensité d'un échantillon de référence ou à encadrer l'intensité du stimulus par les intensités de deux échantillons consécutifs de la gamme de référence (cf. paragraphe 3.2 un exemple de gammes de référence utilisées dans l'environnement).

2.2.2.5 Echantillonnage

On peut être conduit à effectuer la mesure de l'intensité odorante d'une atmosphère directement dans l'environnement considéré (cf. 3.2.). Lorsque l'analyse olfactive des échantillons se fait au laboratoire, la procédure d'échantillonnage décrite au paragraphe 1.3 doit être adoptée ; les atmosphères odorantes sont rapportées au laboratoire dans des sacs en matière plastique.

2.2.2.6 Traitement statistique des résultats

Le traitement statistique de l'ensemble des valeurs d'intensité données par les membres du jury, exprimées sous forme de concentration de butan-1-ol ou de pyridine dans l'eau ou dans l'air et utilisées sous forme logarithmique (on tient compte du fait que la relation stimulus-sensation est une loi de puissance) permet de calculer la moyenne géométrique de l'intensité odorante (cf. la norme AFNOR NF X 43-103).

2.2.3 APPLICATION DE L'OLFACTOMETRIE A L'INDUSTRIE

2.2.3.1 Mesures à l'émission

Les émissions de produits odorants peuvent être caractérisées par deux grandeurs, le débit d'odeur et l'intensité à la source, qui sont respectivement analogues au débit massique et à la concentration à la source dans le cas des polluants chimiques.

Le débit d'odeur d'une source est, par définition, le débit d'air de dilution qui rend la concentration des gaz odorants dans l'effluent ainsi dilué égale à la concentration seuil ; ce

débit est le produit du débit d'air pollué Q (en $m^3.s^{-1}$ dans les conditions normales) par K_{50} , facteur de dilution au seuil de perception de la source (cf. 1.2.4).

Connaissant le débit d'odeur d'une source, il est possible, à l'aide d'abaques de diffusion atmosphérique, de déterminer le secteur de détection continue de l'odeur, délimité par la distance "seuil", distance à laquelle l'odeur n'est ressentie que dans 50 % des cas par les experts.

2.2.3.2 Mesures dans l'environnement

Les mesures dans l'environnement sont destinées à permettre une évaluation aussi quantitative que possible du niveau d'odeur dans une zone donnée et par là même une estimation de l'exposition des personnes aux atmosphères odorantes.

Ce niveau d'odeur dans un environnement se mesure à l'aide des estimations d'intensités odorantes faites directement dans cet environnement par un groupe d'observateurs entraînés supposé constituer un échantillonnage représentatif de la population se déplaçant dans la zone suivant un circuit bien déterminé. Ces estimations sont effectuées par la technique dite d'équivalences olfactives (cf. paragraphe 2.4) à au moins deux reprises correspondant autant que possible à des conditions météorologiques représentatives des situations les plus fréquentes sur le site.

Cette évaluation permet de caractériser l'état initial d'un site avant implantation ou extension d'industries ou de faire un constat de l'état du site du point de vue de la pollution par les odeurs.

Le (ou les) qualificatifs(s) et l'intensité de l'odeur ne suffisent pas à déterminer le caractère hédonique de la perception (agréable ou désagréable). Ce caractère hédonique, auquel se rattache la notion de bien-être ou de gêne, fait intervenir des paramètres d'ordre psychosociologique qui ne sont pas considérés ici mais dans le paragraphe 3.3.

2.2.3.3 Evaluation de la gêne ressentie par les populations

Pour évaluer le niveau de la gêne ressentie par les populations riveraines d'un site pollué par les odeurs, on fait appel à des personnes volontaires, choisies parmi la population locale, qui donnent leur avis sur leur environnement, à un moment fixé de la journée, et pendant une période assez longue (une année en général). Les réponses individuelles, obtenues pour chacun de ces jours et heures donnés, permettent de calculer un indice de "gêne odeur" par secteur géographique qui, associé aux conditions météorologiques, permet de tracer des roses de gêne odeur et ainsi d'évaluer l'intensité et la fréquence de la gêne ressentie par les populations et de localiser les sources à l'origine de cette gêne.

REFERENCES

M.L. PERRIN, M.F. THAL, P. ZETTWOOG

Olfactométrie dans l'industrie. Application à la mesure des odeurs à l'émission et dans l'environnement

Techniques de l'Ingénieur, P445, 1-8, 1991

Norme AFNOR NF X 43-101

Qualité de l'air. Mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux. Détermination du facteur de dilution au seuil de perception

Norme AFNOR NF X 43-103

Qualité de l'air. Mesurage de l'odeur d'une atmosphère gazeuse. Méthode supraliminaires

En cours de publication

Norme AFNOR NF X 43-104

Qualité de l'air. Atmosphères odorantes. Méthodes de prélèvement

M.L. PERRIN, M. JEZEQUEL, J.L. DELPEUCH, R. NADAL

Etude de la gêne provoquée par des odeurs d'origine industrielle

8ème Congrès mondial sur l'air pur et exposition, La Haye (Pays-bas), 11-15 septembre 1989

M.L. PERRIN, M. JEZEQUEL, M.F. THAL

Standardisation de l'olfactométrie en France

Congrès APCA '88, Dallas (Texas), 21-24 juin 1988

P. LE CLOIREC, M.L. PERRIN

Métrie et échantillonnage

Odeurs et désodorisation dans l'environnement

Tec et Doc Lavoisier, 1991

2.3 ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES COMPOSES ODORANTS

INTRODUCTION

Si on se place dans l'hypothèse d'une unité industrielle responsable de "nuisances odeurs" au voisinage, la recherche de solutions ou d'amélioration de la situation passe par :

- la détermination de la ou des sources émettrices d'odeurs,
- la mesure du flux d'odeurs émis par ces sources et l'établissement d'une hiérarchie entre elles, de manière à déterminer celles qui doivent être traitées en priorité,
- une connaissance de la nature des produits odorants à éliminer, ceci étant nécessaire pour orienter vers un type de traitement adapté.

La réponse à ces différentes questions passe très souvent par une étape d'analyses physico-chimiques des composés malodorants.

Avant d'exposer les différentes possibilités d'analyses, il paraît important de donner quelques indications concernant les stratégies de prélèvement pour pouvoir répondre à ces différentes questions.

2.3.1 DETERMINATION DES SOURCES ET DE LEUR FLUX POLLUANT

Pour une même unité industrielle, les sources potentielles d'odeurs sont très diverses :

- effluents canalisés rejetés à une certaine hauteur,
- sources ponctuelles génératrices d'odeurs très intenses à leur proximité immédiate (événements, puisards,...),
- ouvrages de grandes dimensions (décanteurs, bassins d'épandage,...) émetteurs d'odeurs intrinsèquement peu intenses, mais qui en raison d'une surface d'échange avec l'atmosphère peuvent représenter des nuisances importantes,
- opérations annexes (nettoyage d'ouvrages, purges,...) voire incidents d'exploitation.

On doit insister sur l'importance d'un examen approfondi des installations et de la manière dont elles sont exploitées avant d'entamer une campagne d'analyses.

Par ailleurs, l'expérience montre qu'un diagnostic basé sur des mesures de concentration dans l'air au voisinage immédiat des ouvrages tend à surestimer l'importance des sources ponctuelles et, au contraire, à minimiser celle des sources de grande dimension. Ce type de mesures ignore généralement les opérations annexes et ne tient pas compte des sources canalisées, dont l'impact n'est sensible qu'à distance.

Il est donc indispensable d'étudier les sources au niveau du rejet à l'atmosphère.

De plus l'évaluation de l'impact d'une source vis-à-vis des riverains n'est réalisable que si on connaît le flux de produits odorants émis par cette source. Les méthodes d'analyse ne permettent de déterminer que des concentrations, qui doivent être associées à un débit d'air vicié pour déterminer ce flux. Cette opération est aisée dans le cas des sources canalisées dont le débit est facile à mesurer, mais elle est beaucoup plus complexe dans le cas des sources diffuses

(bassins, décanteurs). Dans ce dernier cas, la mesure des concentrations en produits odorants d'air prélevé au voisinage des ouvrages ne peut donner que des indications qualitatives, en raison des dilutions non maîtrisées liées aux conditions météorologiques locales. Une méthodologie particulière doit donc être utilisée pour évaluer le flux polluant émis par ces sources.

Une autre difficulté est liée à la variation dans le temps des émissions odorantes. Ces variations sont souvent très importantes, même lorsqu'elles proviennent de procédés de fabrication réputés continus. Dans certains cas la simple connaissance de ces variations permet d'en comprendre l'origine, et d'exercer une action préventive au niveau de l'exploitation.

On trouvera ci-après diverses techniques permettant de répondre au différents cas de figure.

- dans le cas où la source est canalisée (cheminée ou gaine d'extraction), il est admis que la valeur du débit d'émission est connue par l'exploitant et peut être communiquée. Le cas échéant, elle pourra être contrôlée par tube de Pitot.
- Dans le cas où la source est située à l'intérieur d'un bâtiment, lorsque le débit d'air pollué rejeté vers l'extérieur n'est pas connu, le taux de renouvellement d'air du bâtiment peut être déterminé par une technique de marquage à l'hélium.
- Dans le cas d'une source surfacique aérée artificiellement à un débit connu (bassins d'aération, dessableurs-déshuileurs, ..), on peut disposer sur sa surface un caisson permettant d'isoler une unité de surface du bassin. Ainsi, le débit émanant de la surface n'est pas modifié par le balayage du vent et peut être considéré comme égal au débit d'aération. L'air à analyser est prélevé à l'aide d'une sonde à l'intérieur du caisson.
- Dans le cas où l'émission provient d'une source surfacique calme (décanteurs, épaisseurs), le volume interne du caisson est balayé par de l'air pur dans des conditions bien définies et on effectue à la sortie du caisson le prélèvement d'air odorant sur lequel on réalise les analyses physico-chimiques décrites ci-après. Les concentrations en polluants mesurées, associées à la valeur du débit d'air de balayage, permettront de déduire le flux de polluants émis par unité de surface émettrice.

On doit signaler que cette dernière technique ne permet pas de déterminer la valeur absolue du flux polluant, car les échanges eau-atmosphère varient en fonction de la vitesse du vent et d'autres paramètres. En revanche, en opérant dans des conditions expérimentales identiques, il est possible de comparer le flux polluant émis par les différentes sources présentes sur un même site et donc d'établir une hiérarchie entre elles.

2.3.2 TECHNIQUES D'ANALYSE

L'analyse physicochimique d'un effluent gazeux malodorant est complexe, car ces effluents contiennent fréquemment plusieurs centaines de composés identifiables, dont :

- les masses molaires sont très diverses,
- les fonctions chimiques très différentes,
- les concentrations relatives très variables,
- l'intérêt sur le plan "odeur" très variable.

Ces difficultés montrent que l'on sera fréquemment conduit à utiliser des méthodes analytiques très puissantes et/ou spécifiques.

2.3.2.1 Prélèvement de l'air pollué et transfert de l'échantillon

Quel que soit le mode d'analyse ultérieure, il est nécessaire de prélever un échantillon gazeux, et de le transporter, même sur une courte distance.

Cet échantillon devra être prélevé à une période significative (cf. problème de variabilité dans le temps).

Il convient également de ne pas dénaturer l'échantillon gazeux : certains polluants (H_2S ...) sont très réactifs et se dissolvent dans les condensats. C'est pourquoi il est préférable de réaliser leur piégeage ou leur analyse directement sur site. Si on ne peut pas éviter d'effectuer un prélèvement dans une outre, on prendra la précaution d'éliminer tout risque de condensation, et on réalisera les analyses le plus rapidement possible (quelques heures), sans prétendre être quantitatif pour des composés comme le H_2S .

L'idéal est bien entendu de disposer d'un appareillage d'analyse continue spécifique sur le site; ceci est actuellement réalisable pour les produits soufrés réduits.

Dans les cas où l'analyse continue spécifique n'est pas possible, on a le choix entre :

- Un prélèvement "global" avec analyse la plus exhaustive possible en laboratoire.
- Un prélèvement "spécifique" avec analyse ultérieure par "famille" de polluants.

2.3.2.2 Analyse continue spécifique

Celle-ci est actuellement possible pour les produits soufrés réduits, composés particulièrement importants sur le plan odeurs dans de nombreux cas et dont l'analyse en différé est complexe. Elle est réalisée au moyen d'un chromatographe équipé d'un détecteur spécifique "soufre" dont il existe deux types suffisamment sensibles pour les mesures à l'émission :

- détecteur à photométrie de flamme, il existe un tel appareil automatique, séquentiel, qui peut être transporté sur le site et qui permet une analyse directe en semi-continu selon un cycle d'une durée d'environ 15 minutes, l'étalonnage de l'appareil au moyen de tubes à perméation permet la détermination quantitative de chaque espèce soufrée présente (H_2S , CH_3SH , CS_2 , COS , DMS , $DMDS$...) à des teneurs supérieures à 5 ppb.
- détecteur électrochimique Médor qui permet de quantifier les composés facilement oxydables (H_2S , mercaptans).

2.3.2.3 Analyse "exhaustive"

L'idée de réaliser un prélèvement "global" des composés organiques et d'en effectuer une analyse ultérieure à l'aide d'équipements très puissants (couplage chromatographie - spectrométrie de masse) est ancienne, et a donné lieu à beaucoup de travaux.

Cette approche est très couramment utilisée pour les études d'atmosphère en environnement urbain quand on a affaire à des composés organiques volatils classiques.

La tendance actuelle est de réaliser un piégeage/concentration des polluants contenus dans 1 à 10 l d'air sur une petite cartouche garnie d'un support chromatographique (Tenax,

Porapak...). La totalité des polluants piégés est ultérieurement désorbée thermiquement (et totalement) de manière très rapide (désorption "flash") sur une colonne chromatographique, et analysée par spectrométrie de masse.

Cette technique nécessite, outre l'équipement, un certain savoir-faire pour être maîtrisée, mais elle est très sensible (quelques mg/m³) et se prête bien à la réalisation d'analyses en série. Elle est cependant mieux adaptée à l'analyse des hydrocarbures vrais qu'à celle des produits odorants qui sont moins abondants, qui peuvent être masqués par les hydrocarbures vrais et qui ne sont pas toujours désorbables et chromatographiables dans des conditions opératoires standardisées.

Une autre possibilité est de réaliser un piégeage des polluants dans un volume d'air plus important par cryogénie (100 litres à 1 m³ d'air) qui permet de séparer l'échantillon en plusieurs fractions analysables de différentes manières, voire de réaliser des prétraitements ("clean up") avant l'analyse. Cette technique reste actuellement plus sûre et plus performante, bien que plus lourde à mettre en œuvre.

2.3.2.4 Analyses par famille, réalisées en différé

A la différence de l'analyse "exhaustive", l'analyse "par famille" part du principe que les polluants malodorants ont des fonctionnalités chimiques particulières et appartiennent, dans les cas les plus courants, et en particulier dans le cas des odeurs liées aux fermentations (agroalimentaire, stations d'épuration) aux quatre familles suivantes :

- produits soufrés réduits
- amines et ammoniac
- aldéhydes et cétones
- acides organiques.

L'intérêt de cette approche est double :

- elle permet de s'affranchir dans une large mesure des composés qui compliquent l'analyse "exhaustive" et sont peu intéressants sur le plan odeur (hydrocarbures divers),
- les premiers termes de chaque famille sont à la fois les plus abondants, les plus faciles à piéger sélectivement et quantitativement, et à analyser.

Cette approche pragmatique et plus opérationnelle doit bien sûr être maniée avec précaution. Bien adaptée à certains problèmes, elle peut être mise en défaut dans certains cas, dans l'industrie chimique par exemple. C'est pourquoi l'utilisation conjointe de méthodes d'analyses exhaustives reste fréquemment nécessaire, afin de mettre en évidence la présence éventuelle de produits organiques autres, susceptibles d'être à l'origine de nuisance olfactive.

Sur le plan pratique, on effectue une étape de piégeage, le plus souvent par absorption/concentration dans des solutions spécifiques, sur le site puis une analyse ultérieure en laboratoire des composés piégés à l'aide de techniques plus ou moins sophistiquées.

On recherche, à chaque fois, de façon spécifique les premiers termes de chaque famille et/ou les composés connus pour être les plus odorants, en s'assurant une sensibilité du même ordre que les seuils de perception par l'odorat. Le seuil de détection dans l'air analysé dépendra donc d'une part du volume prélevé, c'est à dire du temps de prélèvement, et d'autre

part des performances des techniques d'analyses mises en œuvre en laboratoire. Les résultats seront donc exprimés en valeurs moyennes sur la période de prélèvement.

On citera dans ce qui suit les techniques les plus sensibles et les plus spécifiques disponibles à l'heure actuelle, sachant qu'il existe pour chaque famille de nombreuses possibilités.

1 - Produits soufrés réduits

On a vu précédemment que l'idéal était de mettre en œuvre un analyseur en semi-continu pour l'analyse de ces composés, pour lesquels il n'existe pas de méthode chimique de piégeage et d'analyse en différé qui permette de distinguer les différents composés tout en étant aussi sensible.

Cependant, des techniques d'analyses chimiques sont souvent utilisées pour des déterminations plus globales :

- piégeage par barbotage et précipitation de H₂S et des mercaptans dans une solution de chlorure mercurique, et dosage par méthode gravimétrique,
- piégeage par barbotage dans des solutions d'acétate de cadmium ou de sulfate de cadmium et dosage par photométrie ...

2 - Amines et ammoniac

Le piégeage de ces composés s'effectue par barbotage en milieu acide. Le dosage en solution est réalisé en laboratoire par chromatographie gazeuse couplée à un détecteur NPD (Nitrogen Phosphor Detector) pour les amines aliphatiques et aromatiques, et par chromatographie d'échange d'ions et détection par conductimétrie pour l'ammoniac.

3 - Aldéhydes et cétones

Le piégeage des aldéhydes et des cétones s'effectue par barbotage dans une solution de dinitrophénylhydrazine (DNPH) en milieu acide. L'analyse est réalisée en laboratoire par chromatographie liquide et détection U.V.

4 - Acides organiques

La détermination des acides organiques dans l'air pollué est effectuée par piégeage de ces composés dans une solution basique, puis analyse en laboratoire par chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (FID).

CONCLUSION

On a parfois tendance à mettre en concurrence les deux approches possibles pour répondre aux problèmes d'odeurs : l'olfactométrie et les analyses physico-chimiques. Ces deux approches sont en réalité très complémentaires :

- s'il s'agit de quantifier les risques de nuisance, l'olfactométrie donnera une réponse plus directe et plus globale que les analyses physico-chimiques,
- à contrario celles-ci permettent souvent de quantifier et de visualiser les fluctuations de rejets de produits odorants et de comprendre les phénomènes plus aisément que l'olfactométrie. Elles permettent de surcroît de donner des indications sur les traitements qui devront être mis en œuvre pour limiter les nuisances.

Cependant, pour estimer correctement les flux de produits odorants émis par chaque catégorie de sources présentes sur un même site, et définir leur contribution relative à une éventuelle gêne au voisinage, il est absolument nécessaire de mettre en œuvre une procédure de prélèvements et d'analyses rigoureuse.

L'expérience montre que, lors de cette étape de diagnostic analytique, les enseignements les plus intéressants sont fournis par les analyses effectuées en continu directement sur le site, non seulement parce qu'elles permettent d'appréhender les variations des émissions dans le temps et les pics de pollutions, mais aussi parce qu'elles apportent des éléments indispensables pour orienter en continu la campagne d'essais, en particulier au niveau des conditions de fonctionnement des installations, afin de mieux comprendre les processus de formation des polluants malodorants.

Il reste, à l'heure actuelle, des travaux de recherche à réaliser à ce niveau, afin de développer des techniques analytiques permettant des mesures spécifiques, directes en continu pour les autres composés que les composés soufrés réduits.

Ainsi, des protocoles de prélèvement d'air spécifiques associés à des méthodes d'analyses physicochimiques très sensibles permettent :

- la détermination de la nature des composés malodorants,
- l'identification et quantification des différentes sources d'émissions,
- l'optimisation du fonctionnement de certaines installations en termes d'émissions dans l'environnement,
- l'orientation d'une stratégie de traitement ultérieur des effluents malodorants.

3 LES PROCEDES DE TRAITEMENTS

3.1 INTRODUCTION

La nuisance et parfois la toxicité produites par des émissions gazeuses odorantes amènent à prévoir un traitement avant rejet dans l'atmosphère.

Il existe actuellement des techniques physico-chimiques de transfert du polluant dans une phase liquide (absorption) ou à la surface d'un solide (adsorption), des procédés de transformations biologique ou chimique (oxydation, dégradation thermiques).

Ces processus d'épuration sont basés sur les propriétés caractéristiques des molécules odorantes : solubilité, acidité, basicité, polarité, adsorbabilité, biodégradabilité...

Ce chapitre présente des procédés d'épuration classiquement mis en œuvre dans le cas de la désodorisation. Pour chaque technique utilisée, les principes généraux, les mécanismes mis en jeu, les éléments de dimensionnement sont donnés ainsi que des exemples industriels réels.

3 2 LA COMBUSTION (1)(2)(3)

Le traitement par combustion est généralement appelé "incinération". Il s'agit d'un processus d'oxydation contrôlée utilisable dans le cas qui nous intéresse pour la destruction des composés odorants contenus dans des effluents gazeux industriels

Dans ce procédé, les composés contenus dans le gaz à traiter réagissent à haute température avec l'oxygène pour former du CO_2 et de l' H_2O , ce processus étant généralement exothermique.

L'obtention de gaz non polluants à l'issue d'une combustion est soumise à la condition de ne pas introduire dans le processus certains éléments tels que le fluor, le soufre, le chlore et plus généralement tout élément susceptible de donner des gaz toxiques par oxydation. Il faut néanmoins noter que la technique d'incinération conserve son intérêt lorsque les produits de l'oxydation peuvent être traités plus facilement que les produits de départ.

De ce fait, seul un combustible tel que le gaz naturel, pratiquement exempt d'éléments polluants comme le soufre, peut être utilisé dans ce type de traitement (Tableau 1).

NATURE DU COMBUSTIBLE	Teneurs contractuelles maximales		Teneurs pratiques observées		
	mg/m ³ N	mg/th	mg/m ³ N	mg/th	
GAZ NATURELS	Lacq	30 (50 instant.)	3	5 à 10	0,5 à 1
	Groningue	150	15	1 à 8	0,1 à 0,8
	Sahara	30 (50 instant.)	3	1	0,1
PROPANE		100 (50 mg/kg)	5	10 à 40	0,5 à 2
GAZ MANUFACTURES	de cokerie de crackage (type Paris)			100 à 200	25 à 50
				40	10
FUEL-OIL DOMESTIQUE		0,7% (7000mg/kg)	700	0,5% (5000mg/kg)	500
FUEL LOURD N°2			4000		1000 à 3500

Tableau 1 : Teneurs en soufre total des combustibles courants (3)

Les performances finales d'une combustion sont principalement régies par trois paramètres : la température, le temps de séjour et la turbulence (les trois "T").

Les temps de séjour des gaz à traiter (à des températures supérieures de 40°C ou plus aux températures d'ignition) doivent être tels qu'ils permettent d'obtenir des vitesses d'oxydation intéressantes et une évacuation complète de la chaleur des produits de combustion. Par ailleurs, un régime turbulent doit être maintenu dans l'incinérateur afin d'obtenir un bon mélange des produits de combustion du gaz d'alimentation avec l'effluent à traiter, donc une bonne homogénéité des éléments de la combustion (composés à éliminer et oxygène). La température d'ignition d'un composé est la température minimale à laquelle ce composé réagit avec l'oxygène. En deçà de cette température, si l'apport thermique est interrompu, la combustion ralentit puis s'arrête.

Habituellement, les paramètres de combustion d'un incinérateur sont établis empiriquement, leur estimation ne fait appel à aucun calcul. Lors du dimensionnement d'un incinérateur, le temps de séjour et la turbulence sont généralement fixés et seuls le débit d'air et la température peuvent être significativement contrôlés.

C'est le type de composés présents dans le gaz à traiter qui fixe la température de combustion en fonction de la vitesse d'élimination désirée. Des températures de combustion plus élevées ou plus basses (qui impliqueront de faire varier le temps de séjour en conséquence) peuvent éventuellement être utilisées, dans une fourchette néanmoins étroite, la température de combustion devant, en particulier, être toujours supérieure à la température d'ignition. Ceci signifie que l'on peut dimensionner un incinérateur de façon à minimiser le temps de séjour, à la condition d'utiliser une température de combustion plus élevée. Il faut néanmoins noter que les gains réalisés en réduisant le temps de séjour, donc la taille de l'incinérateur, sont généralement insuffisants pour contrebalancer le surcoût énergétique lié à l'adoption d'une température de combustion supérieure.

La réaction d'oxydation complète, généralement exothermique, que constitue la combustion s'écrit dans le cas des hydrocarbures :



Le chiffrage de l'efficacité du procédé fait appel à des rapports de quantités mesurables, telle la teneur en hydrocarbures polluants (HC). La définition la plus évidente de l'efficacité serait donc :

$$e_1 = \frac{(HC)_e - (HC)_s}{(HC)_e} * 100 \quad (1)$$

Les indices "e" et "s" indiquent que les concentrations ont été mesurées à l'entrée ou à la sortie de l'incinérateur.

Il est nécessaire de tenir compte des produits pouvant éventuellement résulter d'une mauvaise oxydation, comme l'oxyde de carbone, ce qui amène à définir l'efficacité sous la forme :

$$e_2 = \frac{(HC)_e - [(HC)_s + (CO)_s - (CO)_e]}{(HC)_e} * 100 \quad (2)$$

Cette relation est utilisée par la législation américaine (code 66 de Los Angeles) qui stipule que l'efficacité d'un incinérateur doit être supérieure à 90%. Dans cette formule, $(CO)_s - (CO)_e$ représente l'accroissement de la concentration de CO dû au mauvais fonctionnement de l'incinérateur. Il peut arriver que $(CO)_e$ soit important; l'incinérateur, jouant alors plus que son rôle, diminue aussi la concentration en CO. La quantité $[(CO)_s - (CO)_e]$ est alors négative, et l'application brutale de la formule est fautive. Si $(CO)_s < (CO)_e$ il ne faut plus tenir compte du CO, ce qui revient à utiliser la formule (1).

La formule (2) permet néanmoins de vérifier que l'installation ne se comporte pas comme un générateur de CO du fait d'un mauvais fonctionnement du brûleur ou de l'utilisation d'un combustible inadéquat.

Généralement, les composés odorants sont présents à des concentrations très faibles dans les fumées. Cette importante dilution n'empêche cependant pas de percevoir l'odeur, les seuils de perception olfactive étant souvent très bas. Il est donc nécessaire, lorsque l'on s'intéresse à l'élimination de l'odeur, que l'efficacité de l'incinérateur soit telle que l'on tombe en dessous des seuils de perception olfactive.

3.2.1 L'INCINERATION THERMIQUE (3-8)

Ce mode d'incinération requiert des températures de l'ordre de 700°C :

- élimination des odeurs délétères : 500 à 820°C
- oxydation des hydrocarbures : 500 à 650°C
- oxydation du CO : 650 à 750°C

Le mélange est porté à la température requise par un brûleur qui peut utiliser comme air comburant les fumées si elles contiennent suffisamment d'oxygène (en pratique, il ne faut jamais tomber en dessous de 18% d'oxygène). Le temps de réaction est de 0,5 à 1 seconde, d'où la nécessité de réaliser des chambres de combustion correctement dimensionnées.

Une installation d'incinération thermique comprend :

- une arrivée des fumées polluantes,
- un brûleur à gaz et son alimentation,
- un dispositif d'homogénéisation,
- une chambre de réaction,
- un ou plusieurs récupérateurs de chaleur,
- un ventilateur,
- un dispositif de contrôle et régulation,
- des organes de sécurité.

- Le brûleur

Le brûleur à gaz est spécifique de la technique d'incinération employée. Le débit et la température des fumées variant dans le temps, il est indispensable qu'il ait une grande souplesse de fonctionnement pour bien fonctionner à tous les régimes.

Il existe deux types principaux de brûleurs :

- les brûleurs type "veine d'air" (Figure 1)
- les brûleurs type "à mélange au nez" (Figure 2)

Le premier cité est caractérisé par la simplicité de sa construction et par sa facilité à prendre toutes les formes par juxtaposition d'éléments standard. La combustion est répartie sur toute la section de passage des fumées à traiter et l'homogénéité de la température, facile à obtenir, est pratiquement parfaite. La vitesse de passage des fumées doit être de l'ordre de 8 m/s au droit du brûleur.

Les brûleurs à mélange au nez offrent une source de chaleur ponctuelle. Il est donc nécessaire d'avoir recours à un dispositif d'homogénéisation ou à une température plus élevée au niveau du brûleur permettant d'obtenir une température convenable dans l'ensemble de la masse gazeuse.

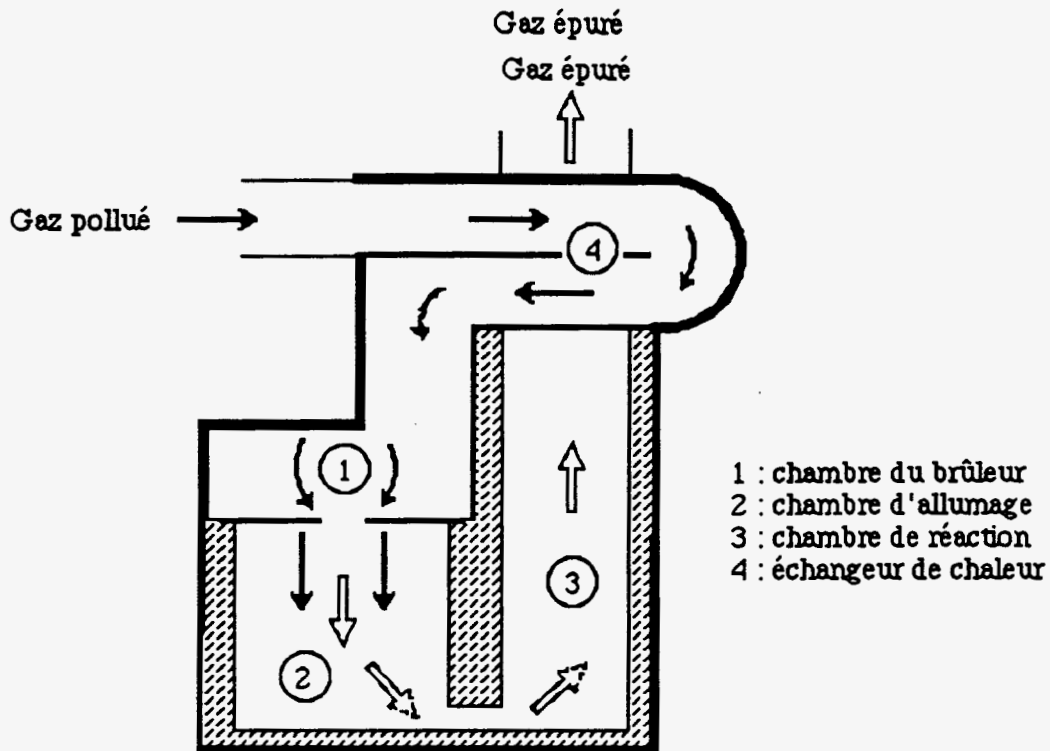


Figure 1 : Installation de combustion thermique équipée d'un brûleur de veine d'air et d'un récupérateur de chaleur (d'après (2))

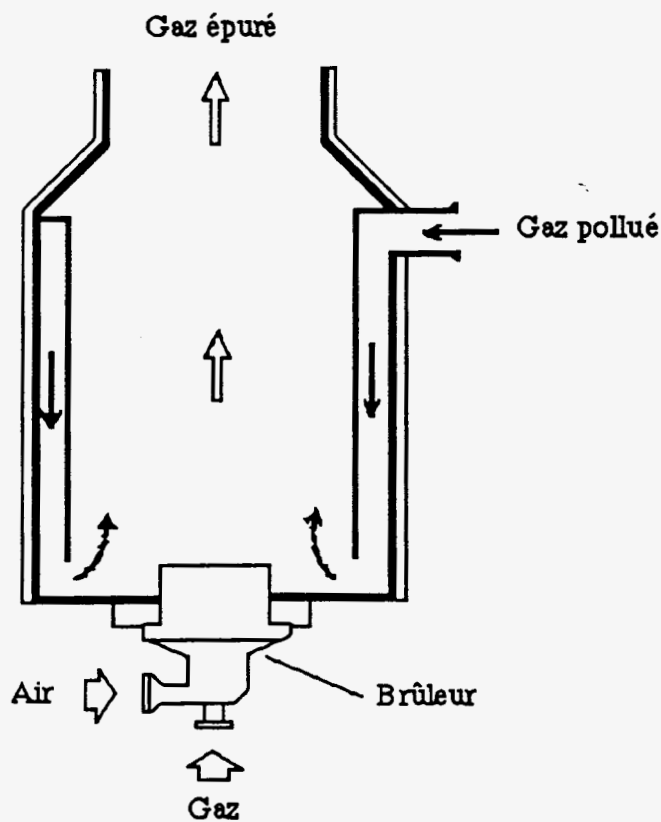


Figure 2 : Installation de combustion thermique avec récupérateur de chaleur annulaire équipée d'un brûleur à mélange au nez (d'après (2))

- La chambre de réaction

Le temps de séjour étant de l'ordre de 0,5 à 1 seconde et la vitesse des fumées de l'ordre de 10 m/s, les chambres de réaction ont des longueurs de 5 à 8 mètres. Elles sont réalisées en maçonnerie ou en acier réfractaire si la température le permet.

La combustion thermique permet généralement une épuration satisfaisante des gaz mais ne convient pas dans tous les cas à l'élimination des odeurs. Par exemple, dans le cas de la présence en quantité importante d'acide chlorhydrique, fluorhydrique ou de dioxyde de soufre dans les fumées.

La combustion thermique sans récupération de chaleur est en général appliquée à l'incinération de faibles débits de gaz malodorants. Lorsque les débits sont plus importants, la récupération de chaleur s'impose. La chaleur récupérée peut être utilisée, dans l'hypothèse où l'usine n'a pas de besoins thermiques particuliers, au préchauffage des gaz pollués. Dans le cas contraire, beaucoup plus fréquent, la chaleur récupérée sert à la production de vapeur d'eau surchauffée ainsi qu'au chauffage des locaux.

- Les récupérateurs de chaleur

On peut distinguer trois types de récupérateurs de chaleur :

- l'échangeur tubulaire :

Les fumées sortant de l'étuve sont introduites dans des faisceaux tubulaires en forme de U. Les fumées épurées chaudes circulent perpendiculairement au faisceau. L'augmentation de température est de l'ordre de 200°C. Dans certains échangeurs tubulaires la circulation des gaz se fait à contre-courant.

- l'échangeur annulaire :

Il s'agit d'une double enveloppe entourant la chambre de combustion et à travers laquelle les fumées circulent en sens inverse des gaz de combustion.

L'échange ainsi réalisé permet une augmentation de température de 100 à 150°C.

- la chaudière de récupération :

Elle est comparable à une chaudière traditionnelle, mais plus volumineuse, car les températures obtenues, plus basses, imposent des surfaces de chauffe plus importantes. Elle est constituée de nappes de tubes ailetés dans lesquels circule de l'eau.

La combustion thermique permet l'incinération à la fois des molécules odorantes et des particules solides, elle est donc souvent utilisée lorsque la teneur en particules solides interdit l'utilisation du charbon actif ou pour l'élimination de gaz non solubles ne pouvant être traités dans un laveur ou neutralisés chimiquement.

Les avantages de l'incinération thermique sont sa simplicité de mise en œuvre et ses coûts d'investissement relativement peu importants en regard de ses performances élevées.

Son inconvénient principal réside dans le fait que pour les faibles concentrations un combustible additionnel doit être ajouté pour maintenir la combustion. Les coûts opérationnels élevés qui en résultent peuvent, à l'heure actuelle, être minimisés en utilisant des échangeurs de chaleurs en céramique à très haute efficacité.

Le coût d'investissement de base (matériel) pour un incinérateur thermique peut être calculé à l'aide des formules suivantes (Florin néerlandais)(8) :

$$C = 280\ 000 + 5,36 * Q \quad Q < 37000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C = 340\ 000 + 3,48 * Q \quad Q > 37000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dans ces formules, Q représente le débit des gaz à traiter (m^3/h).

Pour déterminer le coût total d'investissement, on admet qu'il faut ajouter un montant équivalent au coût d'investissement de base pour la construction et l'installation. Le coût spécifique est calculé sur la base d'un amortissement de l'investissement total sur 10 ans. Les coûts de maintenance et d'assurance représentent respectivement 6% et 1,5% du coût d'investissement de base.

Le coût opérationnel prend en compte le gaz et l'électricité. La consommation d'électricité d'un ventilateur est estimée à 1 kWh pour 1000 m^3 de gaz traités. La relation ci-dessous permet de déterminer la quantité de gaz (m^3/h) nécessaire pour l'épuration d'un débit Q (m^3/h) de gaz pollué à une concentration de C g/m^3 :

$$Q (\text{gaz}) = (134 - 3,6 * C) * Q$$

Cette formule est basée sur une chaleur de combustion des composés à traiter de 26 000 kJ/kg et une récupération de 50% de la chaleur.

3.2.2 L'INCINERATION CATALYTIQUE (3-8)

Les principes de la combustion sont essentiellement les mêmes que ceux décrits précédemment pour l'incinération thermique. La principale différence réside dans le fait que l'incinération catalytique est essentiellement un processus de combustion sans flamme. Le catalyseur sur lequel on fait passer les gaz préchauffés par un brûleur permet d'amorcer la réaction d'oxydation à un niveau de température beaucoup moins élevé (300 à 450°C).

Une installation de combustion catalytique est identique à une installation de combustion thermique à l'exception du remplacement de la chambre de réaction par une chambre catalytique.

Les brûleurs utilisés sont identiques à ceux décrits précédemment. L'emploi du gaz est rendu obligatoire par les risques d'empoisonnement du catalyseur liés au dérèglement éventuel d'un brûleur alimenté au fuel.

La chambre catalytique a pour rôle essentiel d'assurer un contact intime entre les éléments polluants, l'oxygène et le catalyseur. Sa structure est telle qu'elle assure :

- une température homogène sur toute la section de la veine gazeuse,
- l'homogénéité des vitesses des molécules, de telle sorte que les temps de contact avec le catalyseur soient identiques.

Les vitesses sont généralement de l'ordre de 1 à 2 m/s.

Les catalyseurs utilisés sont constitués par un support plus ou moins imprégné de métaux précieux (platine) ou d'oxydes métalliques (oxydes de chrome ou de cuivre).

- Les catalyseurs sur support inerte (alumine ou silice) se présentent sous forme de billes ou de pellets. Ce type de catalyseur permet des épurations très poussées : le rapport du volume de fumées traitées au volume de catalyseur est compris entre 5000 et 50000.

- Les catalyseurs sur support céramique permettent des formes très variées offrant une surface de contact très grande. Le support est revêtu d'une fine couche d'alumine imprégnée de métaux précieux. Le rapport défini ci-dessus est compris entre 60000 et 100000.

- Les catalyseurs sur support métallique sont constitués par un alliage métallique de haute résistance thermique sur lequel on a procédé à un dépôt électrolytique de métal précieux. Ils se présentent généralement sous la forme de frisure placée entre deux écrans.

L'inconvénient majeur de la combustion catalytique réside dans le risque d'érosion ou de contamination du catalyseur qui se traduit par une baisse progressive du rendement :

- Les poussières éventuellement contenues dans les gaz à épurer peuvent être à l'origine d'une érosion de la surface du catalyseur, ce qui restreint l'utilisation de l'incinération catalytique au traitement de gaz ne contenant pas de concentrations significatives de matières particulaires (organiques ou inorganiques) non vaporisables.
- Le noir de carbone et divers oxydes métalliques peuvent produire un enrobage mécanique du catalyseur.
- Les halogènes ainsi que le dioxyde de soufre et l'hydrogène sulfuré peuvent être à l'origine d'une contamination chimique superficielle, mais non irréversible, ce qui rend cette technique non utilisable avec les composés organiques halogénés.
- Enfin, des éléments tels que le phosphore et le bismuth, par les combinaisons stables qu'ils peuvent donner avec certains éléments actifs du catalyseur, peuvent provoquer une contamination profonde et irréversible.

Dans le cas de la combustion catalytique, le problème de la récupération de la chaleur se traite dans les mêmes termes que pour la combustion thermique, les divers types de récupérateurs étant identiques à ceux décrits plus haut. Là encore, si le problème ne se pose pas pour les petits débits, la récupération de la chaleur s'avère toujours rentable dès que le débit atteint 10 000 m³/h.

Historiquement, la raison principale de l'utilisation d'incinérateurs catalytiques était la réduction de la consommation de combustible. A l'heure actuelle, l'application de l'incinération, tant thermique que catalytique, sans récupération de chaleur étant très rare, les gains associés à l'utilisation de l'incinération catalytique sont moins significatifs. De plus l'économie en combustible est partiellement effacée par l'augmentation des coûts de maintenance (nettoyage périodique et remplacement des catalyseurs).

Le coût d'investissement de base (Florin néerlandais) pour un incinérateur catalytique peut être calculé à l'aide des deux équations suivantes (8) :

$$C = 240\ 000 + 25 * Q \quad Q < 34000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C = 360\ 000 + 11,2 * Q \quad Q > 34000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Comme précédemment, le coût total d'investissement est obtenu en ajoutant un montant équivalent au coût d'investissement de base. Le coût du catalyseur est donné par :

$$C (\text{catalyseur}) = 11,2 * Q^{0,945}$$

Les coûts spécifiques sont calculés sur la base d'une durée de vie de 10 ans pour l'incinérateur, et de 3 ans pour le catalyseur. Les coûts de maintenance et d'assurance représentent, comme dans le cas de l'incinération thermique, respectivement 6% et 1,5% du coût d'investissement de base.

La consommation d'électricité est estimée à 1,5 kWh; celle de gaz est calculée à l'aide de l'équation ci-dessous (50% de la chaleur récupérée, chaleur de combustion des composés à éliminer de 26 000 kJ/kg, composés présents à une concentration de C g/m³).

$$Q (\text{gaz}) = (90,67 - 3,6 * C) * Q$$

3.2.3 DOMAINES D'APPLICATION

La liste des industries concernées par la technique d'épuration des fumées par combustion est importante. Elle inclut à priori toutes les industries utilisatrices de solvants, sous réserves qu'ils ne soient pas mélangés avec des composés susceptibles de donner des polluants après oxydation (soufre, fluor...).

Strehl et Millard (3) mentionnent quatre domaines d'application dans lesquels l'évaporation de solvants est à l'origine d'une pollution de l'air et dont les émissions peuvent être efficacement combattues par combustion thermique ou catalytique :

- Emaillage synthétique et séchage des vernis, peintures et encres dans la fabrication de :
 - carrosseries d'automobiles,
 - emballages métalliques,
 - feuillards en métaux ferreux et non ferreux,
 - revêtement de pièces métalliques diverses, stratifiés industriels ou décoratifs,
 - revêtements en chlorure de polyvinyle,
 - fils émaillés,
 - textiles imprégnés,
 - impressions offset, typo...
- Autres opérations de séchage et de fabrication :
 - séchage d'eau d'épandage,
 - cuisson des graisses,
 - torréfaction des cafés,
 - fumage de viande,
 - cuisson de conserves,
 - usinage de caoutchouc,
 - fabrication de vernis,
 - fabrication de garnitures de freins,
 - fabrication de papier d'émeri...
- Procédés de fabrication de produits chimiques :
 - anhydride maléique et phtalique, amines, acide nitrique, oxyde d'éthylène,
- Epuration des gaz :
 - désoxygénation de l'air au laboratoire et dans l'industrie, générateurs de gaz inertes, formation de gaz inertes dans les moteurs à gaz, recombinaison dans les réacteurs nucléaires...

3.2.4 CONCLUSION

La combustion thermique est une technique qui donne de très bons résultats sous réserve que l'installation soit correctement conçue. L'obtention d'une oxydation complète nécessite des températures élevées et un temps de séjour des gaz suffisamment long dans la chambre de combustion, ce qui conditionne le choix du type de brûleur et la forme de la chambre.

Au niveau du combustible, il est préférable d'utiliser le gaz naturel du fait de la propreté de sa combustion et de sa grande souplesse d'utilisation. Le fuel présente l'inconvénient d'être susceptible, en cas de dysfonctionnement du brûleur, d'entraîner l'émission d'imbrûlés et de noir de carbone, et par ailleurs, d'avoir une combustion moins propre.

Il faut enfin noter que dans le cas où les gaz à traiter contiennent de fortes concentrations d'éléments tels que le fluor, le chlore ou le soufre, un traitement complémentaire sera nécessaire, les gaz obtenus après oxydation ne pouvant être considérés comme non polluants.

La combustion catalytique permet d'obtenir le même type de résultat que l'incinération thermique, mais à un niveau de température inférieur. L'application de cette technique est néanmoins limitée par la présence éventuelle dans les gaz à traiter de poisons du catalyseur.

Le choix entre ces deux modes de mise en œuvre de la combustion est, en outre, généralement dicté par le pouvoir calorifique du gaz à traiter, les supports des catalyseurs ne pouvant supporter des températures trop élevées.

3.3 LES PROCÉDES GAZ / SOLIDE : L'ADSORPTION (16)

Le transfert d'une molécule dans un vecteur liquide ou gazeux est un phénomène très répandu dans la nature. On peut citer par exemple l'ammoniac, sur les cheveux ou les vêtements. Partant de ce phénomène de rétention d'un produit sur un support, appelé adsorbant, un certain nombre de matériaux ont été mis en œuvre pour l'élimination de molécules volatiles et en particulier pour la désodorisation. Si le charbon actif est de loin l'adsorbant le plus utilisé industriellement, on voit apparaître sur le marché des garnissages naturels ou synthétiques ayant des performances intéressantes.

Après une approche générale sur les transferts gaz/solide, les différents matériaux adsorbants et leur mise en œuvre seront présentés. Enfin, des exemples d'applications dans des cas réels seront donnés.

3.3.1 L'ADSORPTION : ASPECTS GÉNÉRAUX

3.3.1.1 Transfert et adsorption dans un matériau poreux

La figure 5 regroupe un modèle simulant le transfert, le transport et l'adsorption d'une molécule sur un matériau poreux. L'ensemble de ces phénomènes comprend les phases suivantes (9) :

- 1 - Approche de la molécule volatile dans l'air vers le matériau poreux. Dans le cas de la désodorisation, cette phase correspond au passage de l'air à traiter au travers d'un lit granulaire.
- 2 - Transfert de masse au travers de la couche limite entourant le matériau. Cette couche est une zone à haute concentration en adsorbat. Son épaisseur est fonction de la turbulence dans le filtre et du nombre de Reynolds rapporté au diamètre des grains.
- 3 - Diffusion dans le volume poreux. La molécule va se déplacer dans les pores de l'adsorbant. Une détermination du coefficient de diffusion montre que celui-ci est proche de la valeur trouvée dans l'air.
- 4 - Adsorption en surface. Le produit odorant va venir se fixer à la surface du matériau par des interactions physiques ou chimiques. Celles-ci seront développées dans le paragraphe suivant. Le phénomène est généralement exothermique.
- 5 - Possible diffusion en surface de l'adsorbant. Après sa fixation en surface la molécule piégée peut éventuellement se déplacer. Ce concept de diffusion de surface est relativement nouveau pour les matériaux adsorbants. Il a été beaucoup étudié dans le cas de traitement de liquides. Le coefficient de diffusion est beaucoup plus faible que celui trouvé précédemment, d'un facteur 10 000 environ.
- 6 - Conduction thermique dans la particule poreuse. La réaction d'adsorption étant exothermique, le dégagement de chaleur est évacué dans un premier temps via le matériau. Les émissions à traiter sont généralement diluées et donc les transferts de chaleur sont généralement faibles. Il convient cependant de noter que dans le cas d'événements de stockage où les concentrations sont très élevées, ce phénomène doit être pris en compte afin d'éviter une inflammation de l'adsorbant.
- 7 - Conduction thermique dans la couche limite puis dans le fluide. Cette phase correspond au transfert de chaleur du matériau vers l'air.

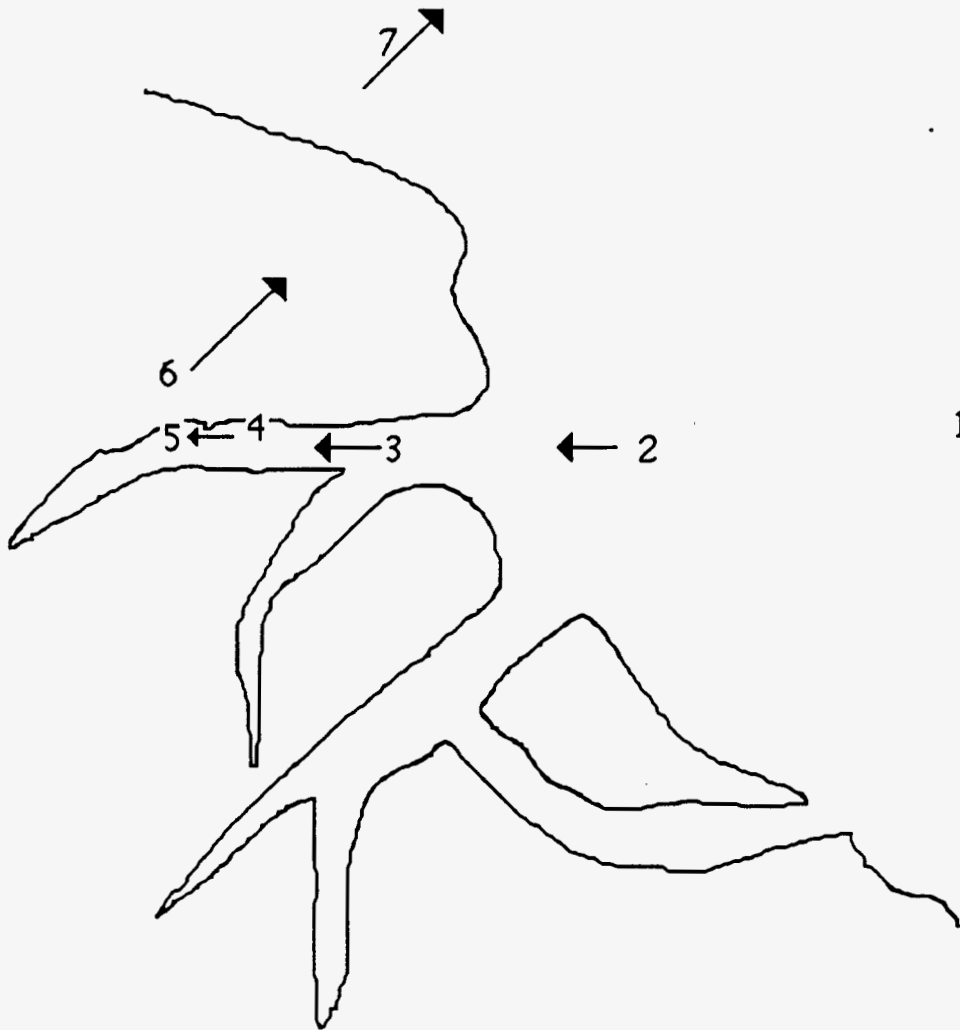


Figure 5 : Représentation schématique des phénomènes de transferts, de transports et d'interactions dans une structure poreuse.

3.3.1.2 L'adsorption

L'adsorption correspond à une interaction entre la molécule adsorbable et la surface d'un solide. Ce phénomène est accompagné d'une orientation des molécules en surface comme diverses études par RMN du solide ont pu le montrer (10)(11). Les interactions induites solides / adsorbat peuvent être classées en deux grandes catégories :

- **La physisorption**

Entre la surface et la molécule adsorbable il peut exister des attractions répulsions basées sur un système de forces électrostatiques :

- les interactions ioniques suivant le modèle de Gouy-Chapman-Stern
- Des forces de Van der Waals englobant trois formes distinctes d'interactions :
 - interactions entre deux dipôles permanents (Forces de Keesom)

- . interactions entre un dipole permanent et un dipole induit (Forces de Debye)
- . forces de dispersion (Forces de London)

Ces liaisons molécule-surface sont de faible énergie et l'on admet généralement une gamme de valeurs entre 0 et 40 kJ/mol. Ces données sont d'une grande importance dans le cas d'une régénération thermique de l'adsorbant qui sera présentée au paragraphe 4.3.3.

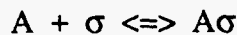
• **La chimisorption**

Dans le cas de formation de liaisons du type covalente entre la surface et l'adsorbant on parle alors de chimisorption. Ces interactions peuvent voir le jour lorsque le matériau possède des fonctions de surface, c'est le cas par exemple du charbon actif ou de l'alumine activée. Ces liaisons sont de plus forte énergie, supérieure à 40 kJ/mol. Dans des applications spécifiques, il est souvent intéressant d'obtenir ce type d'interactions. Dans ce cas, il est nécessaire de favoriser la formation de fonctions de surface sur un matériau par des traitements physiques ou chimiques. Dans la suite de ce chapitre, des caractéristiques d'adsorbants seront décrites et en particulier les fonctions de surface seront abordées.

3.3.1.3 Approche mathématique des interactions solide / molécule : exemples d'applications

La mise en contact d'un solide et de l'air chargé en molécules odorantes adsorbables induit un transfert du polluant de la phase gazeuse vers la phase solide. Si l'on travaille dans une enceinte à volume et pression constante, l'évolution du polluant en fonction du temps est présentée schématiquement sur la figure 6. Cette courbe comprend deux zones correspondant à la phase d'adsorption et la phase d'équilibre.

Une approche simple consiste à considérer la phase d'adsorption comme une réaction du type :



avec

A : molécule adsorbable

σ : surface de l'adsorbant

k_1 : constante d'adsorption ($L^3M^{-1}T^{-1}$)

k_2 : constante de désorption (T^{-1})

L'équation cinétique s'écrit alors :

$$\frac{dq}{dt} = k_1 C (q_m - q) - k_2 q \quad (1)$$

t : temps (T)

q : quantité de polluant par unité de masse d'adsorbant (MM^{-1})

q_m : capacité maximum d'adsorption (MM^{-1})

C : concentration dans le fluide (ML^{-3})

C_e : concentration à l'équilibre (ML^{-3})

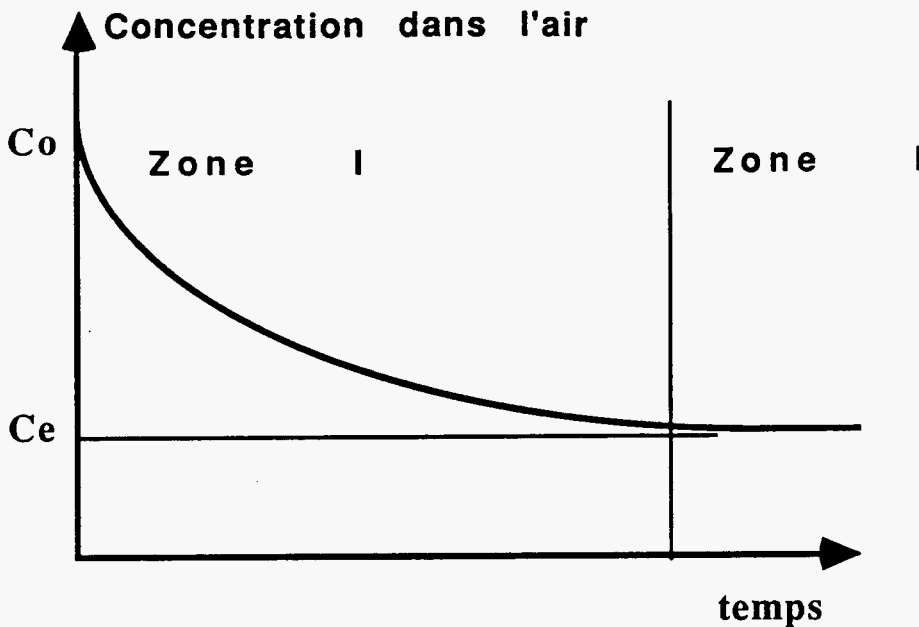


Figure 6 : Evolution de la concentration d'un polluant adsorbable sur solide poreux en fonction du temps. On note deux zones : l'adsorption (I) et l'équilibre (II).

Cette relation, connue sous le nom d'Adams Bohart Thomas comprend trois paramètres caractéristiques d'un couple adsorbant/adsorbat :

$$\left. \begin{matrix} k_1, \\ k_2, \\ q_m. \end{matrix} \right| \text{ qui peuvent être déterminés expérimentalement.}$$

L'adsorption a une cinétique du deuxième ordre alors que la désorption est du premier ordre.

Il convient de noter l'importance de ces paramètres dans la comparaison des performances de matériaux poreux.

La phase d'équilibre correspond à une vitesse nulle ($dq/dt = 0$) d'où l'équation (1) devient :

$$q_e = \frac{b q_m C_e}{1 + b C_e} \tag{2}$$

avec :

- q_e : quantité de polluant par unité de masse d'adsorbant à l'équilibre (MM^{-1})
- C_e : concentration dans le fluide à l'équilibre (ML^{-3})
- b : $\frac{k_1}{k_2}$ (L^3M^{-1})

Cette équation de Langmuir permet d'accéder facilement aux paramètres b et q_m . Afin de décrire les isothermes d'adsorption il est habituel d'utiliser l'équation de Freundlich :

$$q_e = K C_e^{1/n} \tag{3}$$

avec K et $1/n$ paramètres caractéristiques du couple polluant-matériau, fonctions de la température.

Afin d'illustrer cette approche, nous nous proposons de présenter des exemples chiffrés d'utilisation de ces équations.

Le tableau 2 présente les capacités d'adsorption de quelques molécules odorantes sur du charbon actif.

Origine du charbon	CCl ₄	Perchloréthylène	Trichloréthylène	Toluène	Chlorobenzène
NC 1	725	715	720	470	620
NC 2	810	880	785	500	640
NC 3	755	830	730	440	515
Tourbe	690	730	670	400	500
Bois	1000	1150	990	600	760

Tableau 2 : Capacités d'adsorption (q_m) de charbons actifs d'origine diverses. NC : noix de coco (Données fournies par la Société Pica, Levallois Perret)

On remarque des adsorptions élevées pour tous les solvants testés. Cette capacité d'adsorption est malgré tout fonction d'autres paramètres. Ainsi l'adsorption est inversement proportionnelle à la température et à l'humidité de l'air à traiter (*Tableau 3*). Par contre, une augmentation de la surface macroscopique des grains par réduction de leur taille est bénéfique pour les vitesses de transfert.

Composé	Concentration initiale (mg/m ³)	Humidité relative (%)		
		25	60	90
Acétaldéhyde	80	0,23	0,17	0,13
Triméthylamine	100	10	4	1,5
Méthylmercaptan	100	19	9	3,5
Hexane	200	10	9	5

Tableau 3 : Evolution de l'adsorption en fonction de l'humidité relative dans l'air pour diverses molécules odorantes.

3.3.2 LES MATERIAUX ADSORBANTS, CARACTERISTIQUES ET PERFORMANCES

Parmi les supports adsorbants utilisés dans la désodorisation, le charbon actif est de loin le matériau le plus utilisé. Cependant, des études ont été effectuées sur des supports poreux synthétiques ou naturels afin de déterminer leur capacité à piéger des molécules odorantes. Quel que soit l'adsorbant celui-ci est mis en œuvre industriellement sous la forme de filtre. Nous reviendrons dans la suite de ce paragraphe sur le procédé lors de la présentation des exemples industriels de désodorisation.

3.3.2.1 Le charbon actif

- **Fabrication**

Le charbon actif est obtenu à partir de la carbonisation et de l'activation de produits naturels organiques ou minéraux. comme la tourbe, le bois, les coques de fruits.

Dans le cas des procédés dit physiques, le matériau brut est carbonisé à 600-700 °C durant 6 heures puis activé à 800-1000°C durant 24 à 72 heures en présence d'un oxydant du type vapeur d'eau ou CO₂. Cette dernière opération permet de créer le volume poreux donnant ses qualités d'adsorbant au charbon actif. Le rendement global de l'opération est d'environ 10 %.

A la différence du procédé physique qui se déroule en deux étapes, l'activation dite chimique s'effectue en une seule phase avec un rendement global de l'ordre de 40 %. La carbonisation-activation se fait à 400-600°C pendant 5 à 24 heures en présence de sels métalliques comme ZnCl₂ ou d'acide phosphorique. Les opérations finales de tamisage, de conditionnement abaissent les rendements de moitié.

Dans le cas de matériaux à utilisations spécifiques, une imprégnation du charbon actif par des composés minéraux ou organiques est réalisée.

- **Caractéristiques**

La qualité d'un adsorbant dépend de ses caractéristiques physico-chimiques. Le choix d'un support poreux est basé sur des critères intrinsèques du matériau. Après une rapide définition des caractéristiques du charbon actif liées à ses performances et à sa mise en œuvre, des exemples de matériaux commerciaux seront données.

- L'aire massique ou surface spécifique est une des données les plus importantes puisqu'elle est à relier à la capacité d'adsorption d'un matériau, la molécule adsorbable venant en surface du matériau.

Les charbons actifs développent des surfaces spécifiques de 1000 à 2000 m²/g, par comparaison un grain de sable a une surface d'environ 5 m²/g.

- Le volume poreux et le rayon des pores sont déterminés à l'aide de porosimètres à mercure. Ces valeurs sont à comparer avec la ou les tailles des molécules que l'on veut piéger. La figure 7 présente une répartition poreuse pour deux types de charbon actif mésoporeux, microporeux et macroporeux dont les caractéristiques sont donnée sur le tableau 4.

On définit une répartition arbitraire des pores en trois catégories : les micropores ($r < 20 \text{ \AA}$), les mésopores ($20 < r < 500 \text{ \AA}$) et les macropores ($r > 500 \text{ \AA}$).

- Les fonctions de surface sont des radicaux oxygénés liés à la structure carbonée du charbon provenant soit d'une carbonisation incomplète soit d'une oxydation du matériau. On rencontre des fonctions du type acide carboxylique, lactone, phénolique, carbonyle ou basique du type pyrone (11)
- La densité apparente permet d'évaluer la masse de matériau à mettre en oeuvre dans un volume de filtre dimensionné. Avec la capacité d'adsorption du charbon, on a ainsi accès à la durée de vie du filtre.
- La taille des grains conditionnera la vitesse d'adsorption et la perte de charge dans le lit filtrant. Dans le cas d'un filtre industriel de 1 à 2 m de hauteur, une taille de grains de 1 à 2 mm est conseillée.
- La dureté permet d'apprécier la production de fines lors des manipulations ou lors des possibles attritions des grains dans le filtre. En outre, il convient de mettre en oeuvre des matériaux durs lorsque le filtre à une hauteur importante (de 1 à quelques mètres) afin d'éviter un tassement du garnissage et donc des pertes de charge croissantes..

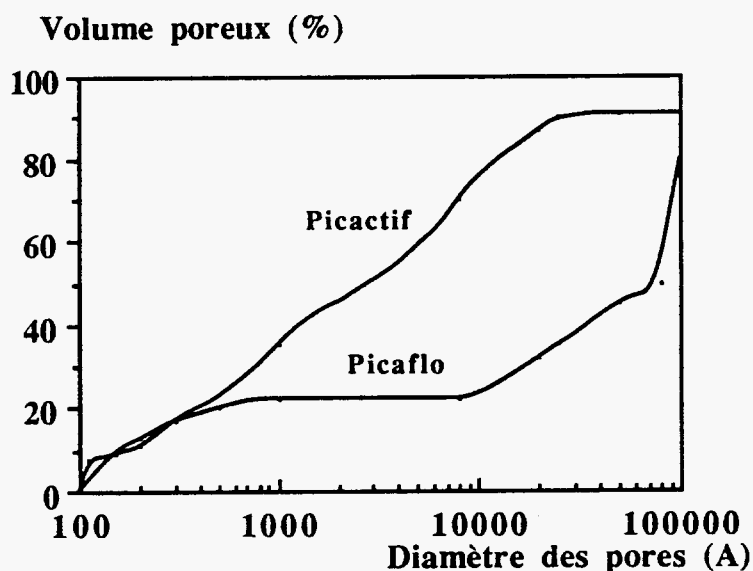


Figure 7 : Répartition poreuse de deux charbons actifs commerciaux (Société Pica)

Picactif : micro, mésoporeux

Picaflo : macroporeux

Afin d'illustrer ces quelques grandeurs caractéristiques d'un charbon actif, des exemples sont proposés sur le tableau 4.

Paramètres	Charbon 1 activé	Charbon 1 non activé	Charbon 2 activé
Origine	Noix de coco	Noix de coco	bois
Nom commercial	Picactif		Picaflo
Densité apparente	0,52	0,5	0,23
Taille (mm)	1 - 1,5 2 - 5	1 - 1,5 2 - 5	1 - 1,5 2 - 5
Porosité	microporeux	non poreux	macroporeux
Aire massique (m ² /g)	1200	< 5	1000
Indice d'iode	140		110
Facteur de mélasses	1000		250
Fonctions de surface (meq/g) :			
carboxylique	0		0,60
lactone	0		0,04
phénol	0,45		1,31
carbonyle	0		0
Analyse élémentaire (%) :			
C	93,9	80,8	73
H	0,6	3	3
N	0,50	0,50	0,3
O	5,0	15,7	23,7

Tableau 4 : Caractéristiques de charbons actifs commerciaux (Données fournies par la Société Pica Levallois Perret)

Nous n'avons pour l'instant parlé que de grains de charbon actif. Récemment, est apparu sur le marché une nouvelle présentation sous la forme de fibres tissées ou non appelées respectivement toile ou feutre de charbon actif.

Les caractéristiques de ces matériaux sont sensiblement les mêmes que celles des grains avec une aire massique légèrement supérieure, de l'ordre de 1500 m²/g. Sa principale qualité est, à poids égal, une surface macroscopique développée bien supérieure, et donc des vitesses d'adsorption 10 à 20 fois plus élevées que celles des grains (12). A partir de ce "nouveau" matériau, une approche originale des adsorbants est envisageable (13).

- **Mise en œuvre industrielle**

Dans le cas de la filtration industrielle, le procédé le plus généralement retenu est un lit fixe épais. La figure 8 schématise une mise en œuvre industrielle à flux ascendant avec possibilité de régénération. Cependant, le flux est le plus souvent descendant du fait des vitesses de passage importantes (500 à 3000 m/h) pouvant entraîner une fluidisation du lit et par conséquent une perte d'efficacité d'épuration. Des études de développement sont actuellement en cours sur des solutions à flux tangentiels turbulents dans des réacteurs garnis de fibres de charbon actifs, nouvelle présentation d'adsorbant qui semble très prometteuse (13).

- **Elimination de solvants odorants**

Dans ce cas on recherche le piégeage des molécules odorantes avec régénération du matériau poreux et récupération du solvant désorbé. On obtient comme il est montré sur le tableau 2 des capacités d'adsorption très élevées avec cependant des différences entre les charbons actifs, les essais ayant été effectués avec la même taille de grains. Ce type de procédé de traitement est applicable aux émissions gazeuses des activités liées aux traitements de surface (phosphatation, peinture) aux pressings ou aux imprimeries. Un exemple industriel chiffré sera présenté dans la suite de ce chapitre.

La désorption s'effectue généralement avec de la vapeur, un gaz chaud ou par effet Joule. Nous reviendrons sur ces dispositifs de régénération dans un paragraphe suivant.

- **Elimination de molécules odorantes sans récupération**

Ce type de procédé s'applique bien à de l'air très dilué où la molécule odorante est à l'état de traces ou lorsque la régénération n'est pas réalisable techniquement. Dans ce cas, on cherche à fixer la plus grande quantité de polluants. Afin d'obtenir des sélectivités ou des capacités plus importantes on a recouru à des imprégnations du matériau afin d'obtenir de la chimisorption au détriment de la physisorption qui elle est favorisée dans le cas précédent. Le tableau 5 présente quelques capacités d'adsorption d'H₂S et de NH₃.

Matériau	Capacité d'adsorption (mg/g)	
	H ₂ S	NH ₃
charbon neuf	8 - 12	5 - 15
charbon imprégné	20 - 30	40 - 80
Fibres activées neuves	15 - 20	40 - 80

Tableau 5 : adsorption d'H₂S et de NH₃ sur divers charbons actifs (Essais réalisés en réacteur discontinu)

L'exemple présenté avec H₂S est très particulier.

En effet l'étude du matériau adsorbé montre que la molécule soufrée est oxydée en S⁰ ou en SO₄²⁻, le charbon actif jouant le rôle d'un catalyseur (14). Ces capacités présentées ne sont pas applicables en système dynamique où l'on retrouve des capacités très supérieures, de l'ordre de 100 à 300 % voir plus. Nous verrons par la suite qu'une possible colonisation bactérienne du support poreux, dans certain cas, permet d'obtenir des performances très intéressantes.

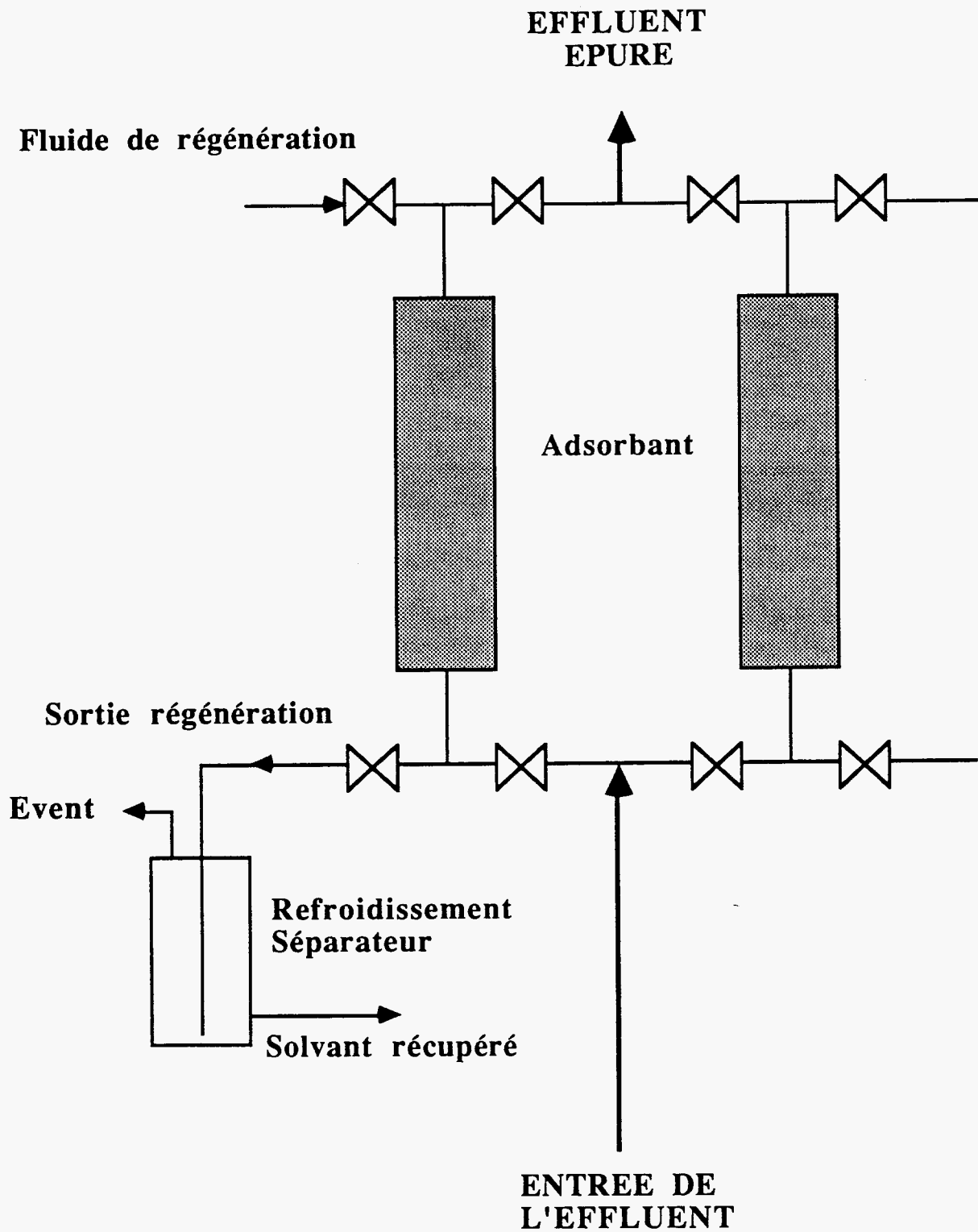


Figure 8 : Schéma de principe d'un adsorbant à flux ascendant marchant en alternance : adsorption / régénération.

3.3.2.2 Des adsorbants naturels

Des exemples d'applications de matériaux adsorbants naturels sont proposés dans ce paragraphe. Les aspects mécanisme, cinétique d'adsorption ainsi que l'approche des caractéristiques de ces solides sont souvent similaires à ceux présentés pour le charbon actif. Le tableau 6 présente quelques supports poreux dont la capacité à piéger les odeurs est bien connue.

Adsorbant	Aire massique (m ² /g)	Porosité
Charbon actif	800 - 1500	microporeux
Gel de silice	300 - 800	micro, mésoporeux
Zéolite		microporeux
Alumine activée	100 - 300	micro, mésoporeux

Tableau 6 : Caractéristiques de quelques adsorbants naturels (15)

- Les sols

Les sols ont des capacités d'adsorption relativement faibles. Ainsi Nishida (17) trouve 2 à 8 10⁻³ mg / g de sol pour le diméthylsulfure et de 20 à 30 mg/g de sol pour NH₃. Cette adsorption est à comparer à celle sur charbon actif d'un point de vue mécanisme. En effet, on retrouve la formation de S⁰ à partir d'H₂S, le sol jouant ici un rôle de catalyseur d'oxydation.

En système dynamique, un essai effectué sur colonne de 70 cm de hauteur à une vitesse de 28 m/s montre une efficacité de 78 à 99 % pour H₂S et de 84 % pour NH₃ (18).

- La tourbe

Ce matériau, très bon marché, est surtout utilisé comme support bactérien pour les biofiltres. Cependant son pouvoir adsorbant et ses qualités physico-chimiques peuvent être utilisés pour piéger des molécules odorantes. La tourbe a une réaction acide du fait de ses fonctions de surface et donc peut réagir avec les molécules basiques telles que l'ammoniac, les amines par un mécanisme de neutralisation. Des capacités d'élimination pour NH₃ ont été proposées : 75 mg/g lorsque la concentration à l'équilibre est élevée (200 mg/m³) et 0,6 mg/g pour une concentration dans l'air à l'équilibre de 10 mg/m³ (19).

- Le compost

Comme la tourbe, ce matériau est utilisable comme support bactérien dans les biofiltres. Des essais effectués sur des gaz de fermentation contenant des molécules soufrées et azotées montrent une réduction de l'odeur de 98,7 % avec un ordre décroissant d'adsorption suivant : ammoniac, méthylmercaptop, hydrogène sulfuré, diméthylsulfure. Les capacités sont faibles, du même ordre de grandeur de celles trouvées pour la tourbe.

- Les zéolites

D'une utilisation plus récente, les zéolites peuvent être des matériaux intéressants pour l'élimination de produits odorants. Il faut considérer des rayons de pores compris entre 3 et 7,5 nm et donc seules les petites molécules pourront être piégées dans les cages de structure. Les mécanismes d'interaction sont dus soit à des phénomènes de physisorption, soit à des échanges d'ions. Les capacités d'adsorption trouvées sont de l'ordre de 6 - 7 mg NH₃/g de

clinoptilolite. En système dynamique, pour des vitesses de 600 à 1000 m/h et une hauteur de couche de l'ordre de 20 cm l'effluent passe d'une concentration d'entrée de 4 mg NH₃/m³ à 2 mg NH₃/m³ en sortie (20).

3.3.2.3 Des adsorbants de synthèse

Bien que peu utilisés en procédé de désodorisation, les adsorbants synthétiques font l'objet d'études importantes avec comme application l'analyse. Quelques colonnes garnies par des adsorbants ou des résines échangeuses d'ions ont malgré tout été testées. Le tableau 7 regroupe quelques caractéristiques d'adsorbants employés en analyse ou mis en œuvre dans des systèmes de filtration.

Les résines adsorbantes du type XAD ont été testées en système dynamique dans le cas d'adsorption de phénol à des teneurs de l'ordre de 1,8 mg/m³. L'efficacité obtenue était de 100 %, la régénération s'effectuant avec du méthanol (21)

Des résines cationiques fortes ont été mises en œuvre pour piéger un mélange d'H₂S, de NH₃ et de méthylmercaptan ainsi que des amines. La résine peut être chargée par des ions argent ou palladium dans le cas de l'élimination d'isopropanol (22).

3.3.3 LA REGENERATION

Lors du traitement des solvants il convient de régénérer le matériau adsorbant in situ. Par contre, dans les cas de traitement sans récupération des molécules piégées, la régénération s'effectue chez le fabricant. Dans ces deux cas de figure, la régénération est soit thermique (procédure la plus courante), soit chimique (utilisable dans quelques mises en œuvre spécifiques) ou encore biologique (à l'étude encore actuellement dans le cas de la désodorisation). Ces régénérations s'appliquent presque exclusivement au traitement du charbon actif.

• La régénération thermique

La régénération à la vapeur d'eau est la solution la plus couramment utilisée dans le cas du traitement des solvants. Si elle est facile à mettre en œuvre sur un site possédant un circuit vapeur, elle pose quelques problèmes de décomposition possible des solvants (trichloro-1,1,1 éthylène), ou de solubilisation. Le solvant passe alors dans la phase aqueuse qu'il convient de traiter. En outre, quelques problèmes de corrosion peuvent apparaître.

La régénération par un gaz chaud (air ou gaz inerte) permet des opérations à haute température. Elle permet d'éviter les problèmes de décomposition.

Un procédé mixte CO₂ / vapeur d'eau permet de travailler dans toutes les gammes de température, mais ne permet pas la récupération de l'adsorbat.

D'une approche nouvelle, la régénération par effet Joule semble être intéressante d'un point de vue énergétique, mais aussi d'un point de vue conception et fonctionnement. Elle est mise en œuvre sur des grains (23) ou sur des toiles de charbon actif (13). Elle s'appuie sur le fait que le matériau se comporte comme une résistance et peut donc être chauffé par passage d'un courant. La régénération s'effectue in situ, facilement automatisable, elle ne demande pas d'installations annexes importantes.

Adsorbant	Aire massique (m ² /g)	Temp. max d'utilisation (°C)	Porosité	Polymère
Carbowax	14	500	microporeux	
Tenax	19	375	macroporeux	ODPPP
Chromosorb				
101	<50	275	macroporeux	STY - DVB
102	300 - 400	250	mésoporeux	STY - DVB
103	15 - 25	275	macroporeux	STY
104	100 - 200	250	macroporeux	Acrylate
105	600 - 700	250	mésoporeux	Aromatique
106	700 - 800	225	mésoporeux	STY
107	400 - 500	225	mésoporeux	Acrylate
108	100 - 200	225	macroporeux	Acrylate
Porapack				
P	50 - 100	250	macroporeux	STY - EVB
Q	500 - 600	250	mésoporeux	EVB - DVB
R	550 - 750	250	mésoporeux	NVP
T	250 - 350	190	mésoporeux	EGDMA
N	225 - 350	190	mésoporeux	CVP
Amberlite				
XAD1	700 - 400	250	mésoporeux	STY - DVB
XAD4	500		mésoporeux	STY - DVB
XAD7	320		mésoporeux	Acrylate

Tableau 7 : Caractéristiques de quelques adsorbants synthétiques (15)

ODPP : Oxyde de Diphenyl p-phénylène
 CVP : C-Vinylpyrolidène
 STY : Styrène
 DVB : Divinylbenzène
 EVB : Ethylvinylbenzène
 EGBMA : Ethylène glycol diméthylacrilate
 NVP : N - vinylpyrolidène

- **La régénération chimique**

Cette opération ne peut se concevoir que dans des cas très spécifiques où un seul produit ou une famille chimique de molécules sont adsorbés. Ainsi, des amino-alcools sont désorbés par de l'acide chlorhydrique, des composés acides du type H₂S sont éliminés de la surface par un lavage basique (NaOH 0,5% à 25% durant 0,5 à 2 heures à une vitesse de 2 m/h et à une température inférieure à 90°C). Des solvants sont aussi utilisables. Par exemple des charbons actifs saturés par H₂S transformé en S° peuvent être régénérés par du CS₂ (24), l'acétate d'éthyle ou le formaldéhyde sont employés dans le cas de charbons actifs saturés par de l'acide acétique. Enfin, des oxydants tels que l'oxygène pur à 5 bars et 100°C, le persulfate de sodium ou le peroxyde d'hydrogène peuvent aussi être utilisés. Cependant le charbon actif est un matériau réducteur et l'emploi d'oxydants doit être abordé avec une grande prudence (25).

- **La régénération biologique**

Le nettoyage de la porosité peut être laissé aux soins de bactéries. Dans le cas de molécules adsorbées biodégradables, un contact biomasse- matériau permet en respectant l'équilibre nutritionnel des bactéries d'obtenir une régénération (26). L'opération s'effectue en lit immergé avec recirculation d'une suspension bactérienne et ajout de nutriments : éventuellement une source de carbone, d'azote, de phosphore et des oligo-éléments. Après cette phase, il convient de décrocher la masse bactérienne du support par lavage à l'eau avant une éventuelle hydrolyse enzymatique.

3.3.4 DIMENSIONNEMENT ET MODELISATION

Dans ce paragraphe, nous donnons seulement les grandes lignes du dimensionnement et de la modélisation des filtres utilisés en adsorption des molécules odorantes. Pour plus de détails on pourra se reporter aux publications citées en référence.

3.3.4.1 Eléments de dimensionnement

Nous utilisons une approche simplissime basée sur des valeurs de dimensionnement généralement admises et sur un savoir faire industriel. Les dimensions du filtre adsorbant à mettre en œuvre sont fonction de trois paramètres indépendants :

- le débit d'air à traiter
- la qualité des polluants à éliminer
- la concentration de ces polluants

- **La surface du filtre**

La relation débit (Q), vitesse (U₀) et surface de passage est donnée par l'équation suivante :

$$Q = S U_0 \quad (4)$$

Les vitesses utilisées fonction des concentrations en polluants sont dans une gamme de 200 à 2000 m/h avec cependant, une valeur moyenne de l'ordre de 600 m/h. En système dynamique, il convient de noter que la capacité d'adsorption d'un polluant est inversement proportionnelle à la vitesse.

• La hauteur de couche filtrante

Le temps de contact adsorbant / air est de 0,1 à 5 secondes fonction de la concentration en polluant mais aussi du degré d'efficacité du procédé. La hauteur (H) du filtre est donnée par les relations :

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{H}{U_0} \tag{5}$$

avec

- θ : Temps de séjour moyen de l'air (T)
- V : Volume du lit (L³)

• Les pertes de charge (27)

Des abaques comme celles présentées sur la figure 9 sont utilisables pour déterminer la perte de charge dans un lit filtrant et donc la puissance des compresseurs ou ventilateurs. Cette perte de charge est fonction à la fois de paramètres caractéristiques du garnissage (taille des grains, degré de vide ...), mais aussi de conditions opératoires (vitesse du fluide). Il est possible d'utiliser la relation de Carman Kozeny ou l'équation de Leva présentée ci-dessous :

$$\frac{\Delta P}{H} = 2 f \frac{U_0^2 (1-\epsilon)^{3-n}}{d \phi^{3-n} \epsilon^3} \tag{6}$$

Pertes de charge (cm eau/cm lit)

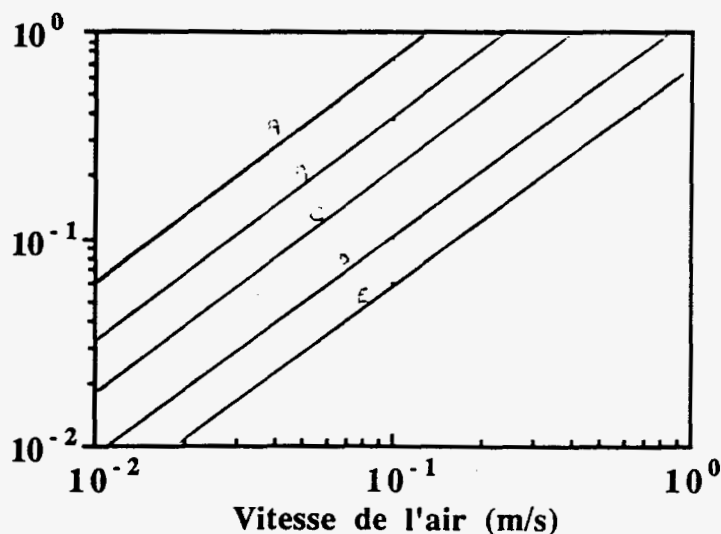


Figure 9 : Pertes de charge dans des filtres garnis de grains de divers charbons actifs. A, B, C, D, E, sont des charbons actifs de tailles croissantes (Données fournies par la société Pica, Levallois-Perret)

n et f sont fonction du nombre de Reynolds $Re = \frac{d U_0 \rho}{\mu}$

si $Re < 10$ $n = 1$ et $f = 100/Re$
 si $Re > 10$ n et f sont données par des abaques (28)

avec :

ΔP : Différence de pression en entrée et sortie du filtre ($ML^{-1}T^{-2}$)
 H : Hauteur de garnissage (L)
 d : Diamètre moyen du garnissage (L)
 ε : Degré de vide du garnissage
 ϕ : Facteur de forme des grains ($\phi = 1$ pour des sphères)
 ρ : Masse volumique du fluide (ML^{-3})
 μ : Viscosité du fluide ($ML^{-1}T^{-1}$)

• Approche de Modélisation

Du fait du mélange complexe que représente l'odeur il est difficile de modéliser les filtres par une approche classique (courbes d'équilibres, équation de transfert ...). Ne seront présentés dans ce paragraphe que les concepts de modélisation, on pourra se reporter aux références bibliographiques pour aborder plus finement ces problèmes.(16)(27)(28)(29)

La modélisation de l'adsorption dans un lit filtrant adsorbant s'appuie sur plusieurs concepts définis comme suit :

- Ecoulement intergranulaire du gaz
- Le transfert de la molécule dans le grain de matière poreux. Problème de transfert dans les macropores, de diffusion dans la porosité ou en surface du matériau.
- L'adsorption modélisée par les équations de Freundlich ou Langmuir présentées précédemment
- Le transfert de chaleur qui peut être négligé dans le cas de système très dilué.

Pour une approche plus complète, on pourra se référer aux travaux de Kast et Otten (9).

3.3.5 DES EXEMPLES INDUSTRIELS DE LA DESODORISATION PAR ADSORPTION

Afin d'illustrer l'adsorption dans le cas spécifique de la désodorisation, trois applications industrielles sont présentées dans des domaines différents : l'élimination de solvants avec récupération, la désodorisation dans un traitement d'ordures ménagères et enfin le cas d'une de l'émission gazeuse d'une station d'épuration.

3.3.5.1 Cas de l'air de ventilation d'un biostabilisateur d'ordures ménagères (30)

L'air à épurer provient d'un biostabilisateur d'ordures ménagères. Le tableau 8 donne les produits malodorants présents ainsi que leur concentration moyenne.

Composés	Concentration (mg/m ³)
Ammoniac	< 0,1
Soufrés	0
Triméthylamine	3
Propylamine et diéthylamine	32
Ethylamine	4
Acétaldéhyde	2,5
Alcools, acétone	24
Butyraldéhyde	3
Acides organiques	< 0,1

Tableau 8 : Caractéristiques des molécules odorantes dans l'air à traiter

Le débit est de 10000 m³/h, l'air peut être chargé de matières en suspension et est sursaturé en eau, sa température est de 20 °C.

Le procédé retenu comprend un préfiltre afin d'éliminer les particules solides évitant ainsi de colmater le filtre à charbon actif. Les dimensions et les paramètres opératoires de ce dernier sont les suivants :

- Adsorbant : Charbon actif Pica
- Nombre d'adsorbeurs : 1
- Volume d'air traité : 70000 m³/h
- Diamètre d'un adsorbeur : 3 m
- Vitesse de filtration : 1000 m/h
- Hauteur de couche : 2,5 m
- Temps de séjour : 2,9 s
- Poids de charbon par adsorbeur : 8000 kg
- Autonomie : supérieure à 2 ans à ce jour

Du fait de la complexité du mélange à traiter ce problème a fait l'objet d'une étude préliminaire sur des unités pilotes qui a permis de dimensionner l'installation (30).

3.3.5.2 Cas d'un effluent gazeux de station d'épuration (31)(32)

Le problème posé dans cette application est l'épuration de l'air de ventilation d'un épaisseur de boue (P2) et de l'arrivée des eaux brutes (P1). L'air contient une forte proportion d'H₂S. L'installation a les caractéristiques suivantes :

- Adsorbant : Charbon actif Norit
- Nombre d'adsorbeurs : 2 (P1 et P2)
- Volume d'air traité/adsorbeur : 1250 m³/h
- Diamètre d'un adsorbeur : 1,65 m
- Vitesse de filtration : 0,225 m/s soit 810 m/h
- Hauteur totale : 3,4 m
- Temps de séjour : 6,5 s
- Poids de charbon /adsorbeur : 200 kg (Norit RFZ3) 680 kg (Norit RB3)
- Réchauffage des gaz : + 10 °C

Les résultats obtenus sur 5 ans sont présentés sur le tableau 9.

H ₂ S mg/m ³	1985		1986		1988		1989	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Entrée	11,3	5,3	9,3	31,4	1,9	6,7	17,6	94,2
Sortie	0,05	0,07	0,1	0,1	0,03	0,05	0,1	0,1
Rendement	99,5	98,7	98,9	99,6	98,4	99,2	99,5	99,9

Tableau 9 : Performances d'un filtre de charbon actif utilisé en traitement de gaz de ventilation sur une station d'eau usée urbaine.

De très bonnes performances sont obtenues avec ce dispositif. Cependant cette élimination d'H₂S ne peut être justifiée seulement par des phénomènes d'adsorption. Il convient alors d'envisager un mécanisme biologique oxydant H₂S en S⁰ ou en SO₄²⁻ (31).

3.4 LE TRANSFERT GAZ-LIQUIDE : L'ABSORPTION

L'élimination des molécules odorantes présentes dans l'air par leur transfert dans une phase liquide fait partie des opérations très utilisées en désodorisation d'effluents gazeux industriels. Des solutions aqueuses ou organiques sont alors utilisées dans des systèmes triphasiques. Ces unités comportent un garnissage sur lequel ruisselle la solution de lavage,

l'air à traiter passant à co ou contre-courant. Il convient de noter que les molécules doivent être solubles, ce qui n'est pas toujours le cas pour les produits organiques odorants volatils. Afin d'améliorer le processus physique d'absorption on utilise des solutions acides, basiques ou oxydantes favorisant une réaction chimique et augmentant ainsi le transfert apparent des composés à piéger.

Après une approche générale sur les transferts gaz/liquide, et en particulier les mécanismes d'absorption, les différentes solutions de lavage et leur mise en œuvre industrielle seront présentées. Le dimensionnement dans le cas le plus classique, c'est à dire pour des colonnes garnies, sera montré.

3.4.1 L'ABSORPTION : ASPECTS GENERAUX

3.4.1.1 Les conditions d'équilibre entre un gaz et un liquide

Cette notion d'équilibre gaz-liquide est à relier à la solubilité. Dans le cas de solutions diluées, c'est la plupart du temps le cas en désodorisation, l'équation d'équilibre pour un composé "i" entre une phase liquide et une phase gazeuse peut être approchée par la relation de Henry :

$$P_{ei} = H_i C_{ei} \quad (1)$$

avec :

- P_{ei} : Pression partielle du composé "i" à l'équilibre avec la solution (atm)
 C_{ei} : Concentration du composé "i" dans la solution à l'équilibre (mol/m³)
 H_i : Constante de Henry (atm.m³/mol)

Cette relation peut s'écrire sous d'autres formes suivant les paramètres utilisés pour définir la concentration de "i" dans chacune des phases :

$$P_{ei} = H'_i x_{ei} \quad \text{ou} \quad y_{ei} = H''_i x_{ei} \quad (2)$$

avec :

- x_{ei} : fraction molaire du composé i dans le liquide à l'équilibre
 y_{ei} : fraction molaire du composé i dans la phase gazeuse à l'équilibre
 H'_i : Constante de Henry (atm)
 H''_i : Constante de Henry (sans dimension)

La courbe d'équilibre est ici représentée par une droite. La constante de Henry est caractéristique d'un couple gaz-liquide. Elle est inversement proportionnelle à la température et est aussi fonction de la force ionique de la solution (33) (34).

3.4.1.2 Approche des mécanismes d'absorption (27)

• Cas d'un transfert simple

Il existe différentes approches des mécanismes d'absorption. Citons la théorie des deux films, de la pénétration, de renouvellement de l'interface ou la théorie de la pénétration de film.

Bien qu'étant la plus ancienne, la théorie des deux films est la plus utilisée (35) car elle apporte des résultats satisfaisants comparativement aux approches plus complexes. On suppose un transfert de matière par convection, les gradients de concentration négligeables (excepté au voisinage de l'interface entre les phases), la couche limite immobile. La figure 10 présente schématiquement cette théorie du double film. En s'appuyant sur la loi de Fick, l'équation de transfert d'un polluant gazeux odorant "i" du côté gaz et du côté liquide s'écrit:

$$N_i = \frac{D_G (P - P^*)}{\delta_G RT} = \frac{D_L (C^* - C)}{\delta_L} \quad (3)$$

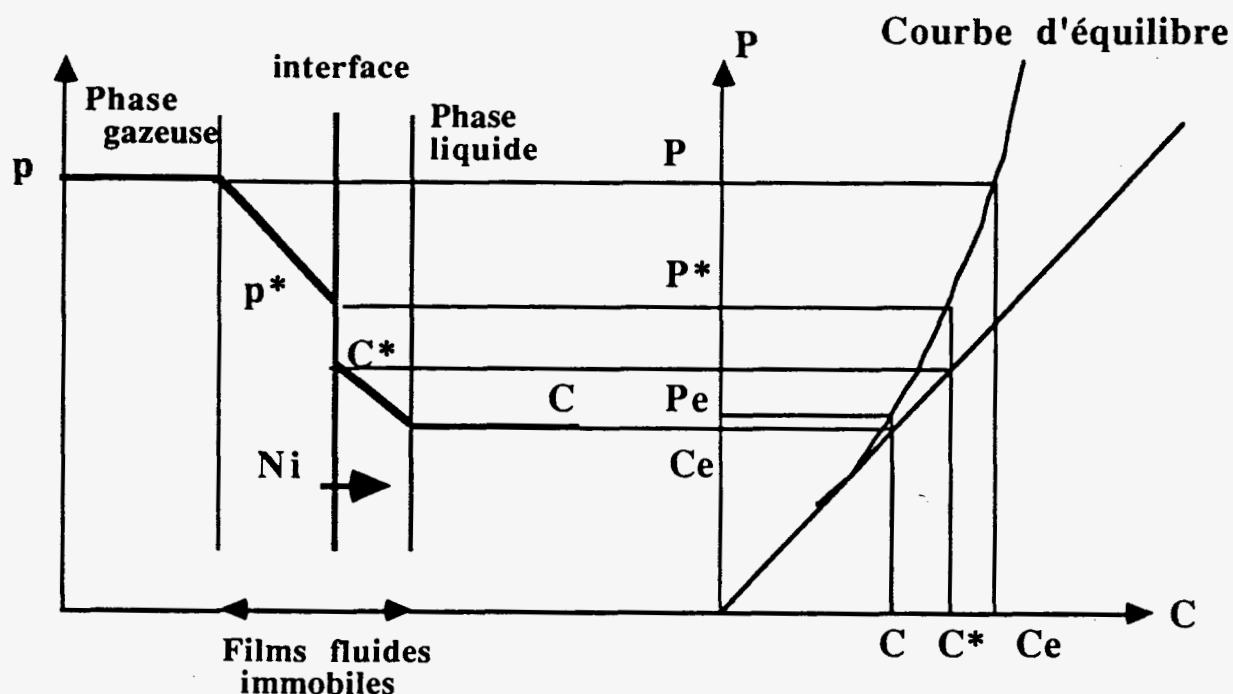


Figure 10 : Profil de concentration à l'interface entre le gaz et le liquide d'après le modèle du double film et écarts à l'équilibre au cours du transfert (Adapté de 36)

avec :

D : Coefficient de diffusion

δ : Epaisseur des films à l'interface

P : Pression partielle de la molécule odorante "i" dans la phase gazeuse

P* : Pression partielle de la molécule "i" dans le gaz à l'interface

- C : Concentration de la molécule "i" au coeur du liquide
 C* : Concentration de la molécule "i" à l'interface côté liquide

indice

- G : Phase gazeuse
 L : Phase liquide

L'équation (3) s'écrit :

$$N_i = \frac{k_G}{RT} (P - P^*) = k_L (C^* - C) \quad (4)$$

avec :

- k : Coefficients de transfert de film

Dans le cas de solutions diluées on admet que la courbe d'équilibre gaz liquide peut être assimilée à une droite dont l'équation est donnée par la relation de Henry (1)(2). En outre, l'approche expérimentale de P* et de C* n'est pas possible, par contre Ce et Pe peuvent être déterminés. La combinaison des équations (1)(2) et (4) permet d'obtenir les flux transférés par unité de surface d'échange :

$$N_i = K_G (P - P_e) = K_L (C_e - C) \quad (4 \text{ bis})$$

avec :

- K : Coefficients globaux de transfert

Les coefficients K et k sont reliés par les égalités suivantes :

$$\frac{1}{K_G} = \frac{RT}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad \text{et} \quad \frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{RT}{Hk_G} \quad (5)$$

Ceci revient à écrire que la résistance totale au transfert est égale à la résistance au transfert du côté liquide et du côté gaz.

Dans le cas d'un réacteur, la quantité de polluant "i" transférée est obtenue par intégration de l'équation (5) sur le volume total de la colonne en tenant compte des variations de pression et de concentration à la côte considérée :

$$dN_i = K_G a dV (P - P_e) = K_L a dV (C_e - C) \quad (6)$$

avec :

- a : Surface volumique de transfert
 V : Volume du réacteur

• Cas d'un transfert avec réaction chimique

Afin d'accélérer le transfert de la phase gazeuse vers la phase aqueuse on utilise très souvent non pas une solution absorbante simple mais un liquide réagissant avec les polluants odorants, par exemple des solutions oxydantes. Il paraît alors évident que, si le transfert est plus rapide, les dimensions des installations de lavage de gaz seront alors réduites. De même, une réaction chimique va permettre de transformer les polluants odorants en produits inodores et atoxiques.

L'utilisation de ces solutions réactives peut modifier considérablement les profils de concentrations à l'interface en terme d'accélération du processus de transfert. Si l'on suppose une cinétique de réaction d'ordre 1 ou d'ordre global 2 entre la molécule odorante et la solution réactive, l'équation (6) du flux transféré côté liquide s'écrit :

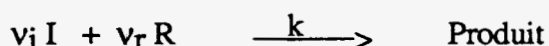
$$dN_i = K_L a E dV (C_e - C) \quad (7)$$

avec :

E : Coefficient d'accélération

E est déterminé à partir de nombres sans dimension qui sont explicités par les relations (8) à (11).

On suppose une réaction irréversible du premier ordre de la forme :



avec :

I : Molécule odorante

k : Constante cinétique de la réaction irréversible

R : Réactif de la solution de lavage

v : Coefficient stoechiométrique

indices :

i : Molécule odorante

r : réactif présent dans la solution de lavage

On définit quatre nombres sans dimension permettant d'accéder à E :

- Le nombre de Hatta :

$$Ha_2 = \frac{v_i k C_r D_r L}{k_L^2} \quad (8)$$

- Le rapport N_2 , appelé rapport de concentration/diffusion :

$$N_2 = \frac{v_i D_{iL} C_r}{v_r D_{rL} C_i^*} \quad (9)$$

- Le rapport R, appelé rapport de réaction/transfert :

$$R = \frac{k b C_r}{k_L a} \quad (10)$$

- Le rapport N3

$$N_3 = \frac{C_i}{C_i^*} \quad (11)$$

La détermination de E s'effectue à partir d'abaques. La figure 11 présente l'abaque de Van Krevelen et Hoftijzer (37) dans le cas spécifique où $N_3 = 0$. Il convient cependant de noter que des valeurs proches des valeurs réelles de E sont obtenues dans le cas de N_3 non nul. Afin de mieux apprécier les profils de concentration dans les différentes phases en fonction des nombres sans dimension, Le Sauze (36) a présenté un résumé des possibilités reproduit dans le tableau 10.

Dans le cas spécifique de la désodorisation plusieurs cas sont à envisager suivant les réactifs utilisés. Pour les lavages acides ou basiques on se trouve généralement dans le cas où la réaction est instantanée. Pour les lavages avec une solution oxydante, la vitesse d'oxydation est fonction de la concentration du réactif et de la constante de vitesse de la réaction molécule odorante-oxydant. Dans le cas d'un traitement par de l'eau de javel, cas où la solution est basique et oxydante, on aura des réactions compétitives, le facteur limitant étant bien sûr la réaction la plus lente.

3.4.2 MISE EN ŒUVRE DES LAVAGES DE GAZ (27)(54)

Les technologies mises en œuvre pour effectuer des lavages de gaz font appel à des contacteurs gaz-liquide :

- les colonnes à bulles
- les contacteurs à agitation mécanique
- les colonnes à plateaux
- les tours vides ou atomiseurs
- les colonnes à garnissage
- les venturi-scrubbers, éjecteurs

Du fait des débits à traiter et des faibles concentrations de molécules malodorantes, les tours vides, les colonnes à garnissage et les venturi-scrubbers sont parmi les plus utilisés en désodorisation. En s'appuyant sur l'ouvrage de Trambouze et al. (27) les procédés seront présentés qualitativement et des éléments de dimensionnement seront donnés pour les colonnes garnies.

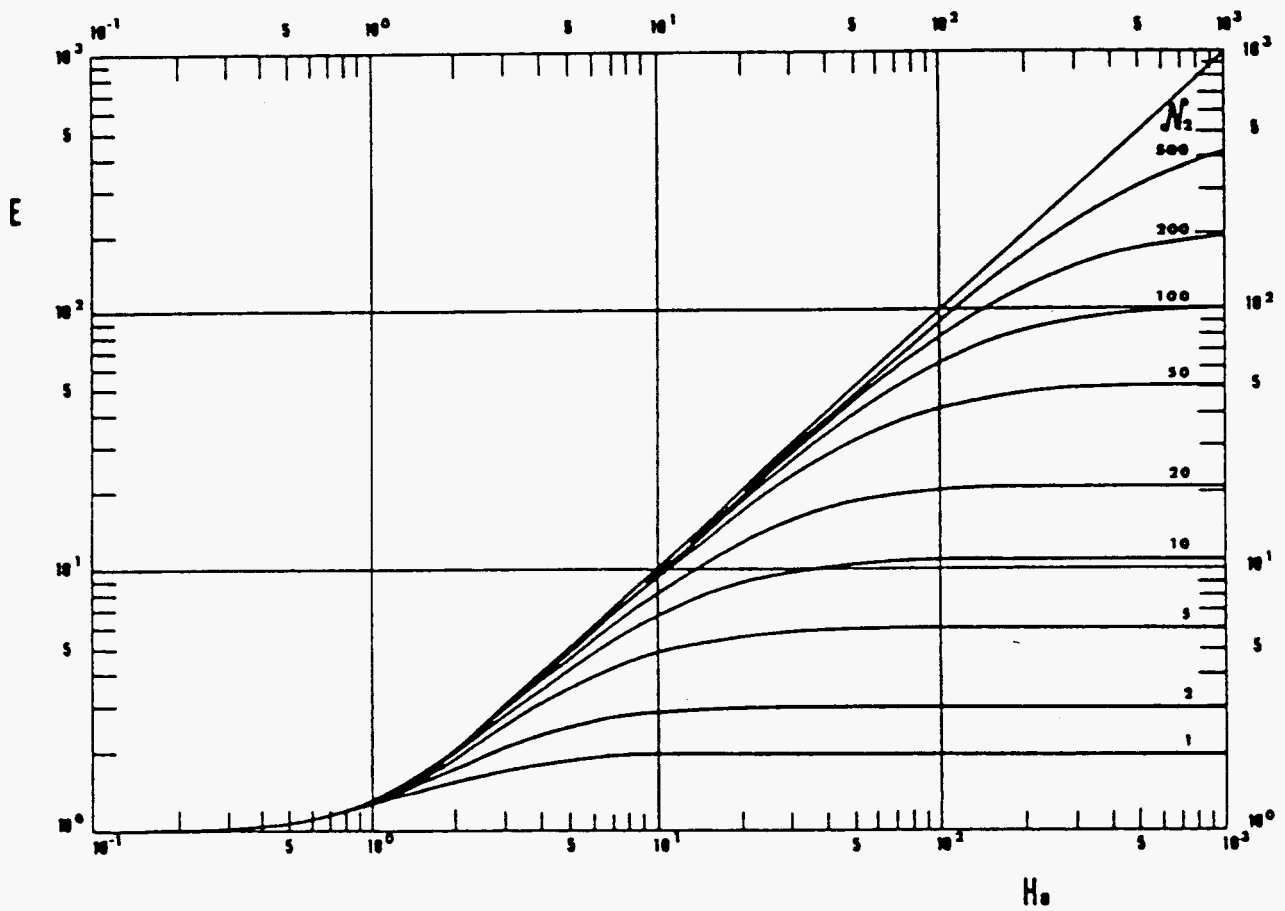


Figure 11 : Abaque de Van Krevelen et Hofstijzer

Réaction chimique	Critères	Profil des concentrations	Valeur de C	Valeur de E	Equation de transfert	Facteurs à privilégier
Rapide	$Ha > 5$ $Ha/N^2 < 10$		C = 0	$E = f(Ha, N^2)$ Abaque de Van Krevelen	$N = kL \cdot a \cdot E \cdot C'$	Aire interfaciale
Rapide de Pseudo 1er ordre	$Ha > 5$ $[P] > C'$		C = 0	E = Ha	$N = kL \cdot a \cdot Ha \cdot C'$	Aire interfaciale
Instantanée	$Ha > 5$ $Ha/N^2 > 10$		C = 0	$E = 1 + N^2$	$N = kL \cdot a \cdot E \cdot C'$	Aire interfaciale Turbulence
De surface	$Ha > 5$ $Ha/N^2 < 10$ $[P] > kL \frac{D_0}{CG}$		C = 0	.	$N = kG \cdot a \cdot CG$	Aire interfaciale Turbulence

Tableau 10 : Profils de concentrations dans la phase liquide et équations de transfert suivant la vitesse de la réaction

Réaction chimique	Critères	Profil des concentrations	Valeur de C	Valeur de E	Equation de transfert	Facteurs à privilégier
Très lente	$Ha < 0,3$ $R < 0,1$		$C \neq C^*$	$E = 1$	$N = kl \cdot a \cdot (C^* \cdot C)$ $N = k \cdot C^* \cdot [P] \cdot \beta$	Volume du liquide
Lente	$Ha < 0,3$ $0,1 < R < 10$		$0 < C < C^*$	$E = 1$	$N = kl \cdot a \cdot (C^* \cdot C)$	Volume du liquide
Lente	$Ha < 0,3$ $R > 10$		$C \neq 0$	$E = 1$	$N = kl \cdot a \cdot C^*$	Volume du liquide
Modérément rapide	$0,3 < Ha < 5$		$0 < C < C^*$	$E = f(Ha, N^2)$ Abaque de Van Krevelen	$N = kl \cdot a \cdot E(C^* \cdot C)$	Volume du liquide Aire interfaciale

Tableau 10 : Profils de concentrations dans la phase liquide et équations de transfert suivant la vitesse de la réaction (suite)

3.4.2.1 Les tours vides ou atomiseurs (38)

Les tours vides représentent les systèmes les plus simples des contacteurs gaz-liquide. Le liquide sous la forme de gouttes pulvérisées au centre ou en périphérie de la colonne tombent à contre-courant du gaz. La figure 12 schématise ce type de procédé. Il existe aussi sur le marché des systèmes alliant la tour vide et le système venturi (38).

Pour une bonne efficacité, les gouttes doivent avoir des diamètres compris entre 0,1 et 1 mm, afin de ne pas être entraînées par le courant gazeux. On pourra se référer à la méthodologie de calcul utilisée pour les lits fluidisés pour calculer ces conditions opératoires (39). La vitesse du gaz est généralement comprise entre 0,5 et 2 m/s. Les pertes de charge dans un tel système sont faibles et sont estimées à 20 mbars environ.

Quelques ordres de grandeur des coefficients de transfert (k_G et k_L) et de la surface de transfert A ont été donnés par Mehta et Sharma (48) :

$$30 < A < 70 \quad (A \text{ en } m^2/m^3)$$

$$1,5 \cdot 10^{-4} < k_L < 3,0 \cdot 10^{-4} \quad (k_L \text{ en } m/s)$$

$$10^{-2} < k_G RT < 2,5 \cdot 10^{-2} \quad (k_G \text{ en } m/s)$$

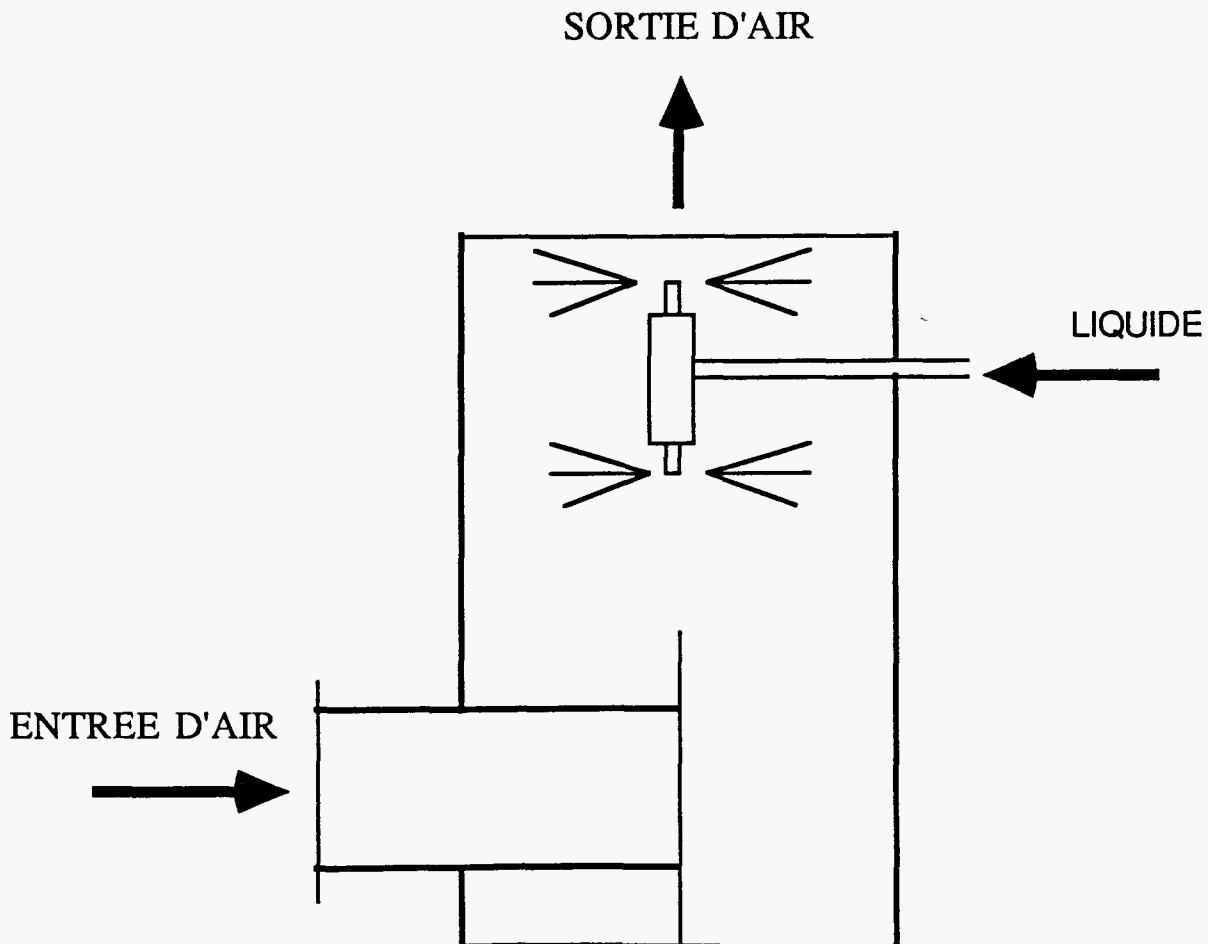


Figure 12 : Schéma de principe d'un contacteur gaz-liquide du type tour vide avec des pulvérisateurs axiaux (Document AIE adapté de (38))

3.4.2.2 Les colonnes à garnissage

• Présentation générale

Le contacteur gaz-liquide à garnissage, le plus utilisé en désodorisation est présenté sur la figure 13.

Il comprend une colonne avec un plateau support qui possède une double utilité : support du garnissage et distribution des fluides en bas de colonne.

Cette plaque doit avoir un degré de vide au moins égal au garnissage afin de ne pas risquer un engorgement à ce niveau.

Les garnissages sont de différents types, on les trouve soit sous la forme de plaques (mélangeurs statiques) soit sous la forme de petits modules comme le montre la figure 14. Ils peuvent être rangés ou mis en vrac.

Le tableau 11 présente quelques caractéristiques de ces garnissages. Le choix du garnissage est guidé par le calcul des pertes de charge, de la surface de transfert interphasique obtenue et de son prix. En outre, afin de minimiser les chemins préférentiels et les effets de bord, on admet que le rapport diamètre de la colonne (D) sur le diamètre du garnissage (d) se situe dans la fourchette $10 < D/d < 60$.

La distribution du liquide de lavage doit être la plus uniforme possible : on admet en général 50 points d'alimentation par mètre carré de section de colonne.

La sortie du gaz peut se faire par un dévésiculeur afin d'éliminer les gouttes de liquide qui pourraient être entraînées par le flux gazeux.

• Hydrodynamique d'une colonne à garnissage

L'étude et l'approche hydrodynamique d'une colonne à garnissage permettent d'accéder aux informations de dimensionnement et de conditions opératoires suivantes :

- Le diamètre de la colonne par le calcul de la vitesse d'engorgement et la vitesse de travail,
- La perte de charge dans le système permettant de prévoir les puissances de ventilation à mettre en œuvre pour un bon fonctionnement de la colonne,
- Le taux de mouillage,
- Le taux de rétention du liquide dans la colonne.

L'évolution de la perte de charge dans une colonne garnie peut être schématisée par la figure 15 On note trois zones :

- Zone I : la vitesse du gaz est faible; on obtient un film liquide mince et non déformé par le courant gazeux.
- Zone II : Cette partie de la courbe est appelée zone de charge, le gaz crée des turbulences en surface du liquide.
- Zone III : L'écoulement des deux fluides est bloqué, la perte de charge devient infinie.

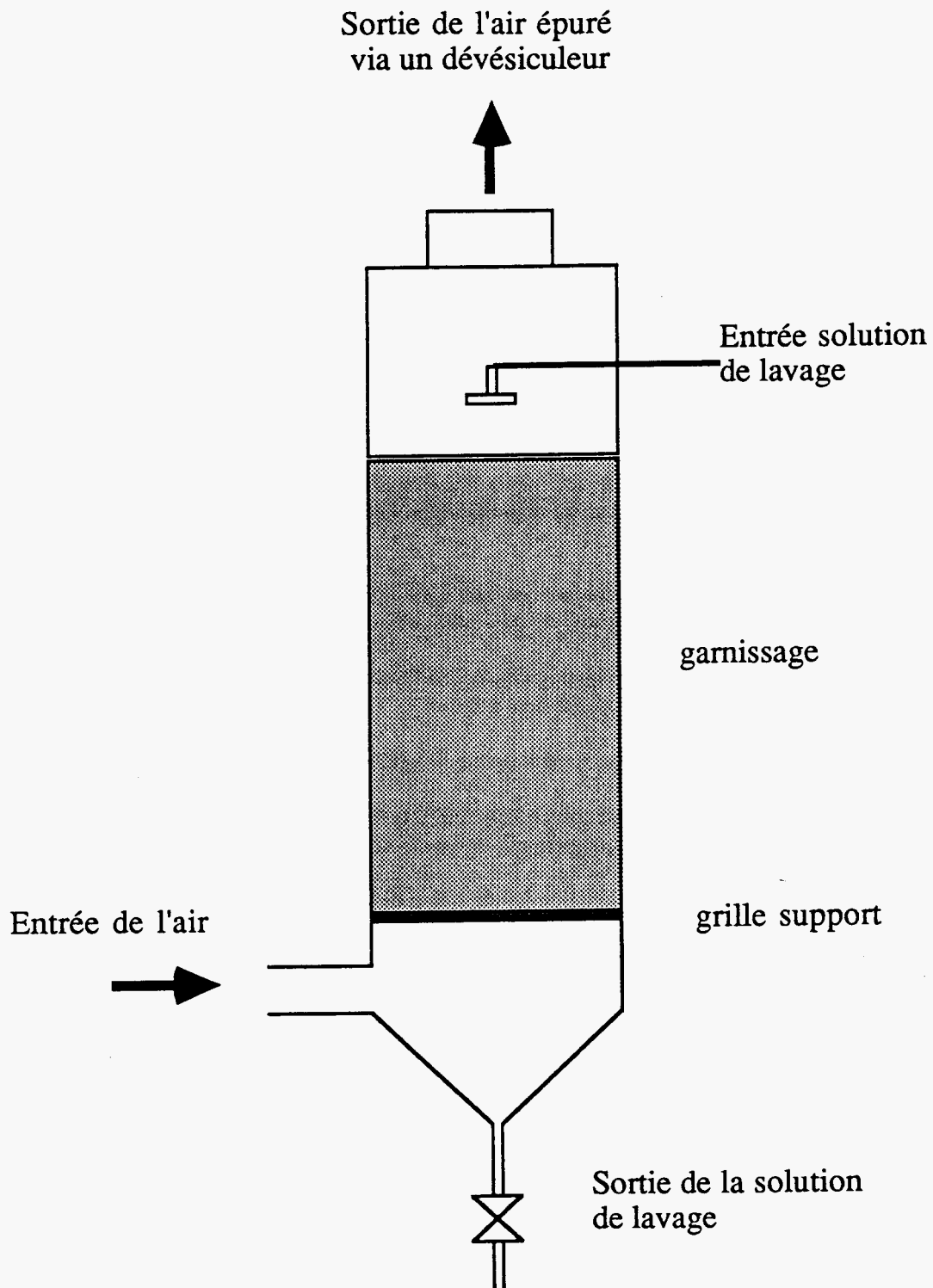


Figure 13 : Schéma de principe d'un contacteur gaz-liquide du type colonne garnie à contre-courant ascendant

		D_p (mm)	Nombre d'éléments (par litre)	Surface spécifique μ_p (m ² /m ³)	Fraction vide (1- ϵ_p) de lit	Facteur de garnissage F_p (m ² /m ³)
Raschig céramique	1/4"	6.3	3 000.00	800	0.70	3 300
	1/2"	13.0	370.00	370	0.64	1 700
	3/4"	19.0	100.00	240	0.72	840
	1"	25.0	48.00	200	0.73	525
	1"1/2	38.0	15.00	130	0.68	310
	2"	51.0	6.00	95	0.75	210
	3"	76.0	1.90	70	0.75	120
Raschig métal	1/4"	6.3	3 000.00	800	0.82	
	1/2"	13.0	370.00	400	0.91	
	3/4"	19.0	100.00	290	0.93	
	1"	25.0	48.00	210	0.93	380
	1"1/2	38.0	15.00	140	0.94	
	2"	51.0	6.00	100	0.94	190
	3"	76.0	1.90	70	0.94	105
Anneaux de Pall métal	1/2"	13.0	200.00	370	0.93	150
	1"	25.0	50.00	240	0.94	80
	1"1/2	38.0	19.00	145	0.95	55
	2"	51.0	6.00	105	0.95	
	3"	76.0	1.60	78	0.95	
Selles de Berl céramique	1/4"	6.3	4 600.00	1 000	0.62	3 000
	1/2"	13.0	620.00	480	0.65	1 250
	3/4"	19.0	195.00	300	0.67	560
	1"	25.0	80.00	250	0.70	360
	1"1/2	38.0	22.00	150	0.75	210
	2"	51.0	8.80	110	0.77	150
	3"	76.0	1.87	92	0.77	
Selles intalox céramique	1/4"	6.3	5 000.00	985	0.62	2 000
	1/2"	13.0	630.00	480	0.73	870
	3/4"	19.0	210.00	300	0.73	430
	1"	25.0	85.00	250	0.75	320
	1"1/2	38.0	23.00	160	0.74	170
	2"	51.0	8.80	110	0.75	115
	3"	76.0	1.87	92	0.77	70
Anneaux de Pall céramique	1"	25.0	46.00	220	0.73	
	1"1/2	38.0	18.50	165	0.76	
	2"	51.0	6.00	120	0.77	
	3"	76.0	2.20	105	0.68	
Miniring plastique	1"	25.0				90
	2"	51.0				57
	3"	76.0				40
Miniring métal	1"	25.0				113
	2"	51.0				73
	3"	76.0				46
Miniring céramique	2"	51.0				190
	3"	76.0				80
Tellerette	1"	-	390.00	250	-	-

Tableau 11 : Caractéristiques des garnissages utilisés dans les colonnes garnies



Figure 14 : Présentation de quelques garnissages utilisés dans le remplissage des contacteurs gaz-liquide du type colonnes garnies.

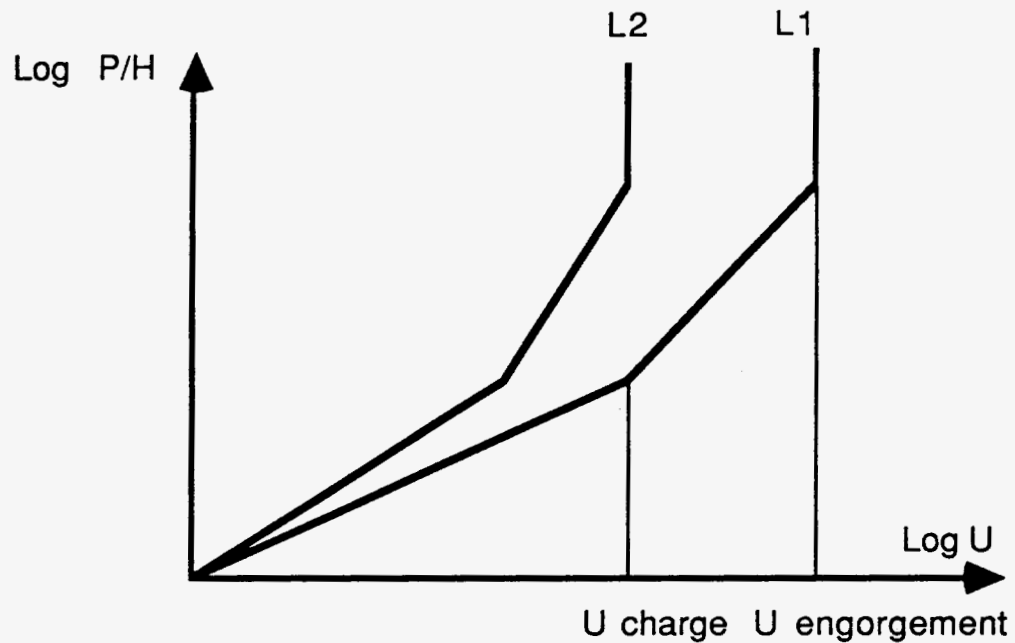


Figure 15 : Evolutions des pertes de charge dans une colonne garnie. L1 et L2 sont deux débits de liquide d'arrosage différents.

Le calcul de la perte de charge et de la vitesse d'engorgement est approché par des relations proposées par Leva et reprises par Wuithier :

$$\Pi_1 = \frac{F_p \rho_G \rho_w}{g \rho_L \rho_L} (\mu_L/\mu_G)^{0,2} U_{oG}^2 \quad (12)$$

$$\Pi_2 = \frac{U_{oL}}{U_{oG}} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \quad (13)$$

avec :

F_p : Facteur de garnissage

ρ : Masse volumique

μ : Viscosité

indices:

G : Gaz

L : Liquide

w : Eau à 20°C

e : Engorgement

La vitesse d'engorgement $U_G = U_{Ge}$ est donnée par la relation suivante :

$$\ln \Pi_{1e} = 0,1117 - 4,012 \Pi_{2e}^{1/4} \quad (14)$$

La détermination de la vitesse d'engorgement pour un débit liquide donné permet d'accéder à la vitesse de travail qui est donné par la relation :

$$U_{Gt} = B U_{Ge} \quad (15)$$

avec :

U_{Gt} : Vitesse de travail

U_{Ge} : Vitesse d'engorgement

B : Constante comprise entre 0,6 et 0,7

A partir de cette vitesse de travail il est aisé de calculer alors, pour un débit gazeux donné, la section de la colonne à utiliser :

$$Q_G = S U_{Gt} \quad (16)$$

avec :

Q_G : Débit gazeux

S : Section de passage

Un algorithme regroupant l'ensemble de ces calculs de dimensionnement est proposé en fin de paragraphe.

La perte de charge est donnée par les relations suivantes :

$$\frac{\Delta P}{H} = 98 (\Pi_1/\Pi_{1e}) (A_1 + A_2 \Pi_1/\Pi_{1e}) \quad (17)$$

$$A_1 = 21,79 - 36,19 \Pi_2^{1/4} + 16,60 \Pi_2^{1/2} \quad (18)$$

$$A_2 = 7,06 - 10,30 \Pi_2^{1/4} - 10,36 \Pi_2^{1/2} \quad (19)$$

La vitesse minimale d'arrosage est aussi un paramètre opératoire important pour le bon fonctionnement d'une colonne triphasique. Morris et Jackson (40) proposent de prendre :

$$Q_{Lm} = \frac{U_L}{A_P} > 0,08 \quad (20)$$

avec :

Q_{Lm} : Débit liquide minimale (m^2/h)

U_L : Vitesse superficielle du liquide (m/h)

A_P : Aire géométrique du garnissage (*Tableau 11*)

Cependant, il semble que des valeurs plus faibles soient utilisables et la relation (21) est alors utilisable (41) :

$$Q_{Lm} = \frac{U_L}{A_P} > 3,5 \cdot 10^{-3} (\sigma_w / \sigma_c)^2 \quad (21)$$

avec :

σ_w : tension superficielle de l'eau

σ_c : Tension superficielle critique du matériau (*Tableau 12*)

Matériaux	σ_c (mN/m)
Céramique non émaillé	61
Carbone	56
Métal oxydé ou traité	75
PVC	40 - 25 pour l'équation (21)
Métal poli	35 - 25 pour l'équation (21)
Polyéthylène - Polypropylène	33

Tableau 12 : Tensions superficielles critiques pour des matériaux de garnissage (adapté de (27))

La rétention liquide ou Hold-up peut être calculée par la relation proposée par Farid et Gunn (42) :

$$HLD = 2,57 (Re_L)^{0,43} (d^3 g \rho_L / \mu_L)^{-0,37} (A_P d)^{0,85} \quad (22)$$

avec :

Re_L : Nombre de Reynolds modifié pour le liquide ($d U_L \rho_L / \mu_L$)

d : Diamètre nominal du garnissage

HLD : Taux de rétention du liquide ou Hold-up

• Unité de transfert et hauteur de colonne

Après cette première approche hydrodynamique permettant de calculer la section de la tour de lavage et des conditions de bon fonctionnement, il convient de déterminer la hauteur de garnissage nécessaire pour obtenir les performances d'épuration de l'air malodorant désirées. Nous ne donnerons ici que des éléments simples de dimensionnement. On considère que les concentrations de polluants sont faibles, ce qui est le cas dans l'épuration des gaz malodorants. La loi de Henry précédemment explicitée est utilisable. Pour une approche plus approfondie on se référera aux ouvrages et publications cités (27)(28)(43)(44).

En s'appuyant sur la théorie du double film, le transfert de masse dans un système gaz-liquide s'écrit (cf équation (6)) :

$$dN_i = K_G a A dz (P - P_e) = K_L a A dz (C_e - C) \quad (23)$$

avec :

A : Surface de la colonne

z : Hauteur d'un élément de colonne

En supposant que le transfert n'a pas d'influence sur les débits massiques totaux, on écrit que dans le gaz, la variation de masse de polluant est égale à la quantité transférée, soit :

$$A U_{mL} dx = k_L a A dz(C_e - C) \quad (24)$$

avec :

x : Concentration molaire dans le liquide

U_{mL} : Vitesse molaire du liquide

Soit, après séparation des variables et intégration entre la côte 0 et la côte Z (hauteur de la colonne) :

$$Z = \frac{U_{mL}}{K_L a C_T} \int_{x_s}^{x_i} \frac{dx}{x_e - x} \quad (25)$$

avec :

x_i : Concentration molaire en entrée dans la phase liquide

x_s : Concentration molaire en sortie dans la phase liquide

C_T : Concentration totale

Le raisonnement tenu pour la phase liquide peut tenu pour la phase gazeuse. On peut donc utiliser les concentrations aux interfaces C^* et P^* . On obtient alors les relations suivantes :

$$Z = \frac{UmG}{K_G a P} \int_{y_s}^{y_i} \frac{dy}{y - y_e} \quad (26)$$

$$Z = \frac{UmL}{k_L a CT} \int_{x_i}^{x_s} \frac{dx}{x^* - x} \quad (27)$$

$$Z = \frac{UmG}{k_G a P} \int_{y_s}^{y_i} \frac{dy}{y - y^*} \quad (28)$$

avec :

P : Pression totale

y_i : Concentration molaire en entrée dans la phase gazeuse

y_s : Concentration molaire en sortie dans la phase gazeuse

y* : Concentration molaire dans le film gazeux

x* : Concentration molaire dans le film liquide

La relation (25) peut s'écrire sous la forme générale :

$$Z = NTU \cdot HTU \quad (29)$$

avec :

NTU : Nombre d'unité de transfert

HTU : Hauteur d'une unité de transfert

Pour les relations (25) à (28) on obtient donc respectivement :

$$Z = (NTU)_{OL} \cdot (HTU)_{OL} \quad (30)$$

$$Z = (NTU)_{OG} \cdot (HTU)_{OG} \quad (31)$$

$$Z = (NTU)_L \cdot (HTU)_L \quad (32)$$

$$Z = (NTU)_G \cdot (HTU)_G \quad (33)$$

avec les indices :

OL : globale côté liquide

OG : globale côté gaz

L : film côté liquide

G : film côté gaz

Les équations suivantes relient ces divers paramètres (on suppose que la loi de Henry est applicable) :

$$(HTU)_{OL} = (HTU)_L + \frac{U_{mG}}{H'' U_{mL}} (HTU)_G \quad (34)$$

$$(HTU)_{OG} = (HTU)_G + \frac{H'' U_{mL}}{U_{mL}} (HTU)_L \quad (35)$$

Les paramètres devant être déterminés pour effectuer le calcul de Z sont les différents coefficients et la surface de transfert permettant d'accéder à la hauteur d'une unité de transfert (HTU) et le nombre d'unité de transfert (NTU).

Calcul des coefficients et de la surface de transfert

Les relations proposées par Onda (45) et Puranick (46) après les travaux de Danckwerts (47) et reprises par Trambouze et al. (27) sont valables à 20 % près :

$$k_G / A_p D_G = 5,23 (A_p d)^{-2} (U_G \rho_G / \mu_G A_p)^{0,7} (\mu_G / \rho_G D_G)^{0,5} \quad (36)$$

$$k_L / A_p D_L = 0,005 (A_p d)^{0,4} (U_L \rho_L / \mu_L A_p)^{1,33} (U_L^2 A_p / g)^{-0,33} (\mu_L / \rho_L D_L)^{0,5} \quad (37)$$

$$A_i = A_p (1 - \exp(-1,45 (\sigma c \sigma)^{0,75} (U_L^2 \rho_L / \mu_L \sigma)^{0,2} (U_L^2 A_p / g)^{-0,05} (U_L \rho_L / \mu_L A_p)^{0,1})) \quad (38)$$

avec

A_i : Aire interfaciale (m^2/m^3 de lit)

D_L, D_G : Coefficients de diffusion du polluant dans le liquide et dans le gaz

σ : Tension superficielle

Les valeurs des coefficients de transfert et de la surface de transfert permettent aisément d'accéder à la valeur de la hauteur d'une unité de transfert.

Approche du nombre d'unités de transfert

Plusieurs approches sont possibles pour calculer le nombre d'unités de transfert :

- Pour un calcul rapide on écrit par exemple :

$$(HTU)_{OL} = \frac{x_s - x_i}{(x_e - x)_{moyen}} \quad (39)$$

avec

$$(x_e - x)_{\text{moyen}} = \frac{(x_{es} - x_s) - (x_{ei} - x_i)}{\text{Ln} \frac{x_{es} - x_s}{x_{ei} - x_i}} \quad (40)$$

- Par approche graphique, on écrit le bilan matière entrée-sortie sur l'absorbeur,
 - à co-courant :

$$Q_{mG} (y_i - y) = - Q_{mL} (x_i - x) \quad (41)$$

avec $x = x_s$ et $y = y_s$ pour la totalité de la colonne.

- à contre-courant :

$$Q_{mG} (y_i - y) = Q_{mL} (x_s - x) \quad (42)$$

avec $x = x_i$ et $y = y_s$ pour la totalité de la colonne.

Dans ces deux cas on obtient un système de courbes opératoires et d'équilibre (Figure 16). On peut alors déterminer la valeur de l'intégrale du NTU (équations (25) à (28)).

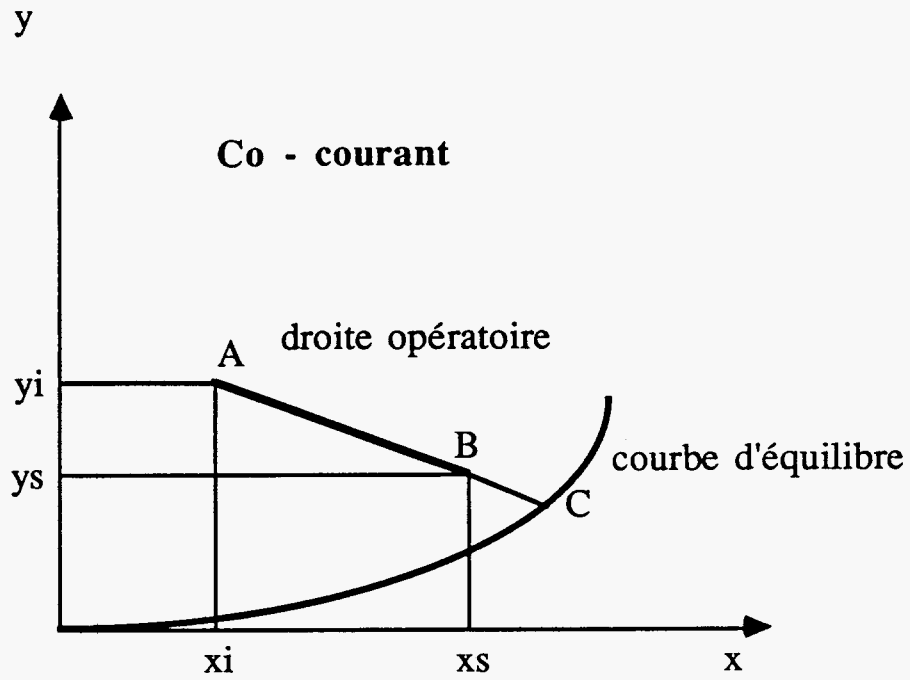
Une autre approche est de raisonner sur un élément de colonne de hauteur dz , de procéder pas à pas en intégrant le facteur d'accélération E qui dépend de la concentration.

En désodorisation les solutions sont diluées et la loi de Henry s'applique. La figure 16 est modifiée, puisque la courbe d'équilibre est ici assimilée à une droite. En outre si l'on suppose que l'on travaille en système ouvert avec une solution de lavage initialement exempte de polluants ($x_i = 0$), on obtient les relations suivantes dans le cas d'un réacteur travaillant à contre-courant en partant du sommet de la tour :

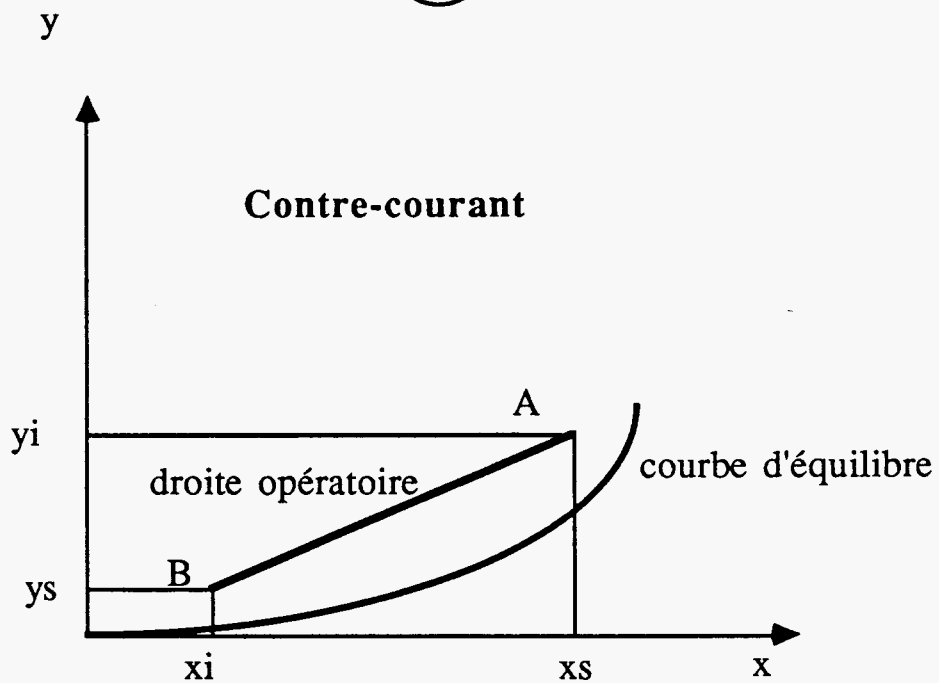
$$Q_{mG} (y_i - y) = Q_{mL} x \quad (43)$$

$$y_e = \frac{H'' Q_{mG} (y_i - y)}{Q_{mL}} \quad (44)$$

$$(\text{NTU})_{\text{OG}} = \int_{y_s}^{y_i} \frac{dy}{(y - y_e)} \quad (46)$$



I



II

Figure 16 : Ligne opératoire et courbes d'équilibres de laveurs à co et contre-courant.

Soit, après intégration :

$$(NTU)_{OG} = \frac{1}{1 - H'' Q_{mG}/Q_{mL}} \ln(1 - H'' Q_{mG}/Q_{mL})(y_i/y_s) + H'' Q_{mG}/Q_{mL} \quad (47)$$

• Approche globale du dimensionnement

Afin de résumer l'ensemble de cette approche dimensionnelle des colonnes à garnissage un algorithme de calcul est présenté sur la figure 17. Il rassemble des séquences de calculs et de tests permettant d'accéder pour un problème particulier et pour des performances à priori choisies aux :

- Choix du garnissage
- Diamètre de la colonne
- Hauteur de la colonne

Cette approche peut être utilisée avec des modifications (garnissages pour les colonnes, dimensions des venturis ...) pour toute technologie présentée ici.

3.4.2.3 Les Venturi-scrubbers et les éjecteurs

Depuis quelques années, de nouvelles technologies ont vu le jour. Déjà utilisés pour le dépolluage des gaz, les venturi-scrubbers et les éjecteurs ont été mis en œuvre pour la désodorisation des effluents gazeux. La figure 18 présente deux schémas de principe de ces procédés. L'appareil est constitué d'un système convergent-divergent traversé par le gaz à traiter. La solution de lavage est injectée soit avant le col du venturi, soit dans le col de l'injecteur. Il existe aussi des appareils multi-cellules liant à la fois l'aspect garnissage et le principe du venturi (53).

La perte de charge est estimée à 5.10^3 Pa. Elle est évaluée par la relation suivante (système SI) :

$$\Delta P_G = U_{GC}^2 (1000 Q_L/Q_G) \quad (48)$$

avec :

ΔP_G : Perte de charge

U_{GC} : Vitesse du gaz au col

Q_L : Débit du liquide

Q_G : Débit de gaz

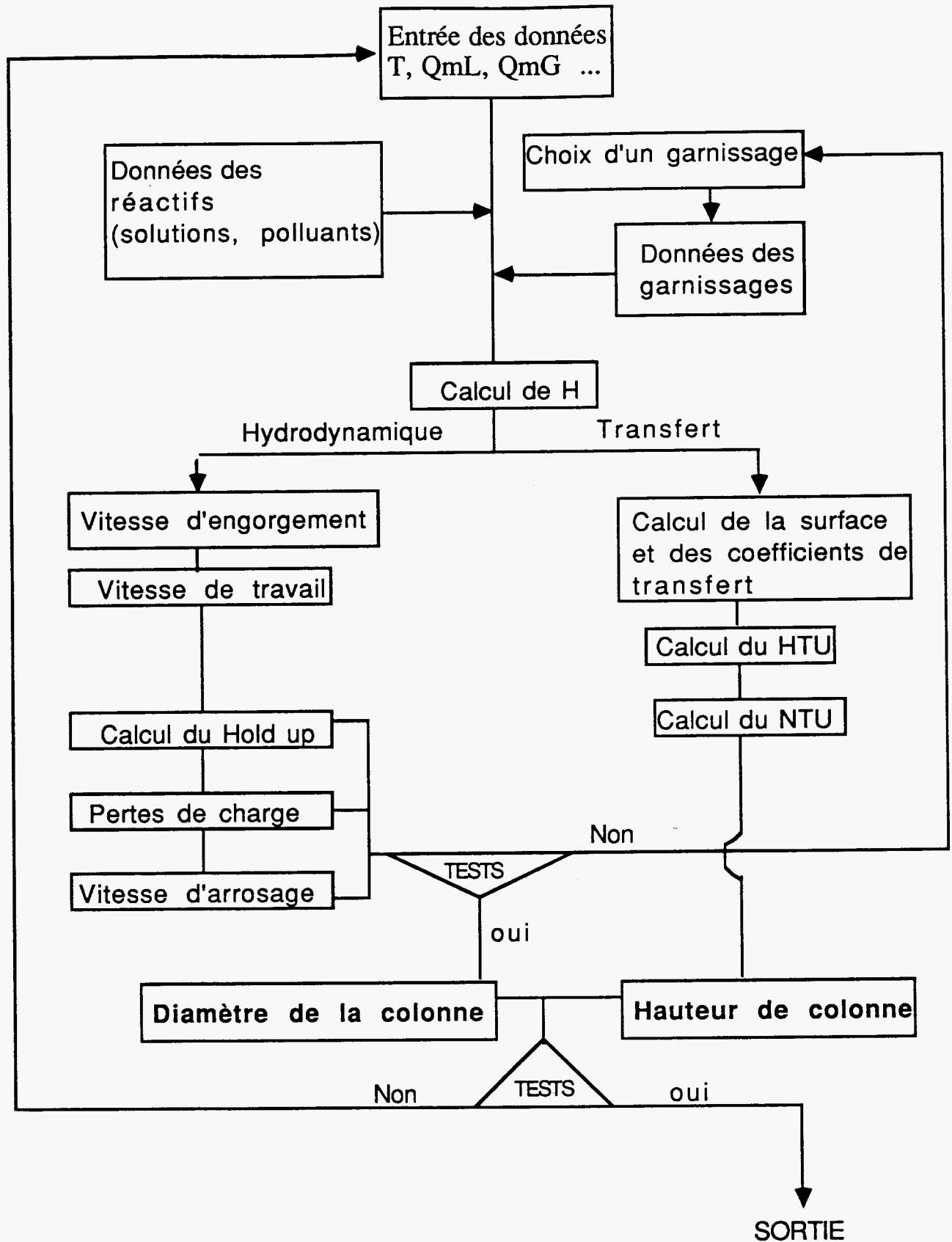


Figure 17 : Approche générale du dimensionnement d'une colonne à garnissage

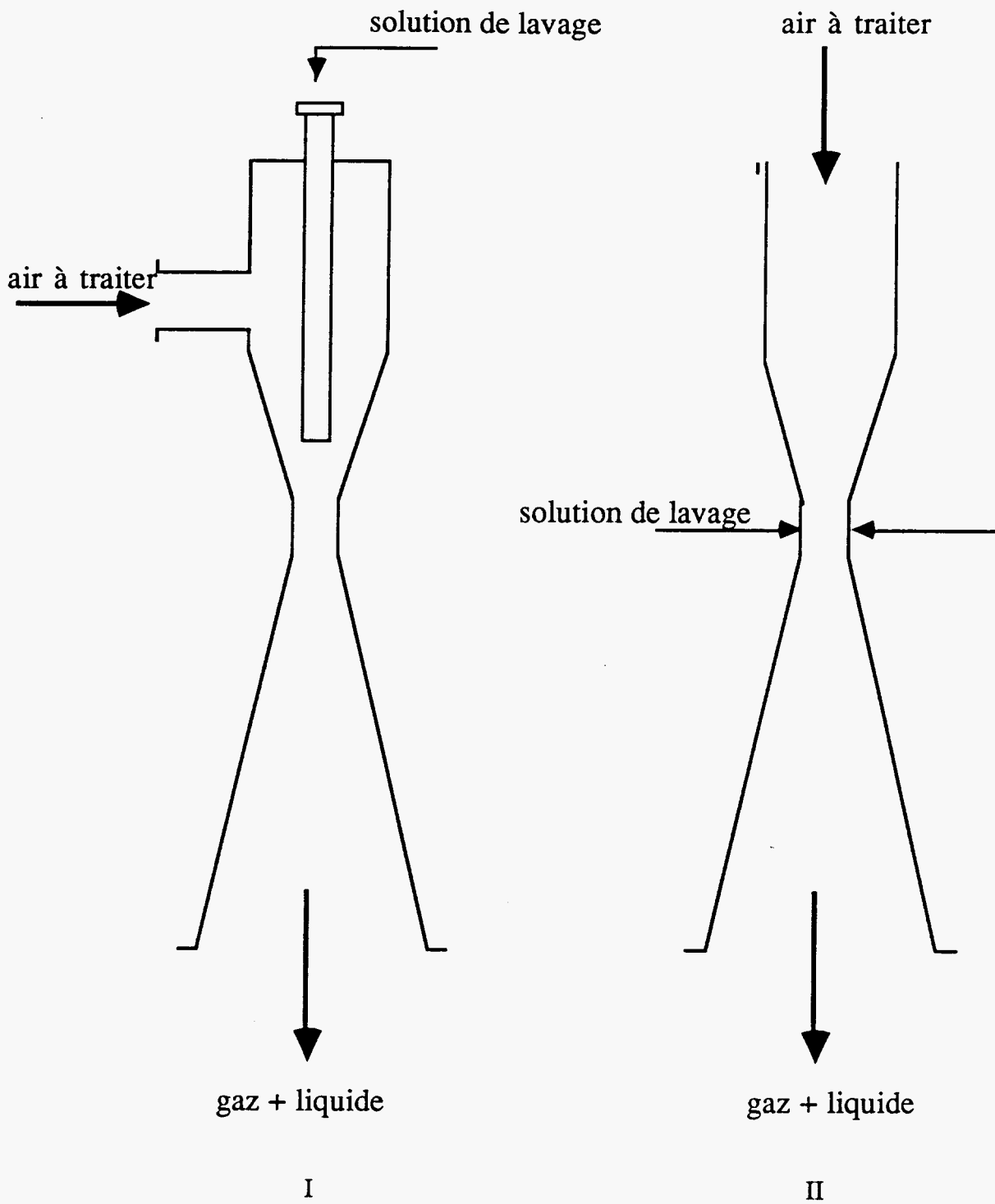


Figure 18 : Schéma de principe des deux types de venturi-scrubbers.

I : Ejecteur
 II : Venturi

Les coefficients de transfert peuvent être évalués. k_L est de l'ordre de 7.104 m/s et est quasiment indépendant des débits de gaz et de liquide. k_G est compris entre 10^{-2} et 3.10^{-2} m/s. La surface de transfert est comprise entre 150 et 300 m^2/m^3 . Des relations sont disponibles pour calculer ces coefficients de transfert :

Pour k_G :

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc^{0,31} \quad (50)$$

avec

Sh : Nombre de Sherwood, $Sh = k_G d_B / D_G$

Re : Nombre de Reynolds, $Re = d_B U_G \rho_G / \mu_G$

Sc : Nombre de Schmitd, $Sc = \mu_G / \rho_G D_G$

d_B : Diamètre moyen des bulles

Ce diamètre moyen des bulles est défini par la corrélation suivante (49) :

$$d_B = 0,585 (\sigma / U_{rc} \sigma_C) + 0,017 (\mu_L / \sigma \rho_L)^{0,45} (1000 Q_L / Q_G)^{1,5} \quad (51)$$

La surface de transfert est égale à :

$$A = 6 (Q_L / Q_G + Q_L) / d_B \quad (52)$$

3.4.2.4 Comparaison des paramètres de transfert

Dans le choix d'une technique de lavage de gaz pour un cas particulier de désodorisation, il est souvent utile de comparer les paramètres de transfert. Le tableau 13 regroupe des valeurs des coefficients de transfert côté gaz et liquide ainsi que les surfaces de transfert obtenues avec les procédés décrits dans ce paragraphe.

Contacteur		$k_G \cdot 10^2$ (m/s)	$k_L \cdot 10^4$ (m/s)	A (m^2/m^3)	$V_L / (V_L + V_G)$
Colonne à Garnissage	co-courant	0,1 - 5	0,4 - 2	10 - 350	0,02 - 0,25
	contre-courant	0,3 - 8	0,4 - 6	10 - 1700	0,02 - 0,95
Colonnes à pulvérisation		1,5 - 5	0,7 - 1,5	10 - 100	0,02 - 0,2
Contacteur éjecteur				100 - 2000	
Contacteur venturi		5 - 25	5 - 10	160 - 2500	0,05 - 0,30

Tableau 13 : Paramètres de transfert pour quelques contacteurs gaz-liquide (Adapté de (50))

3.4.3 LES REACTIFS DE LAVAGE DES GAZ ODORANTS (51)

Du fait de la complexité des effluents odorants, il est nécessaire dans la pratique de mettre en série un certain nombre de laveurs permettant d'absorber et/ou d'oxyder les molécules malodorantes. Le choix des réactifs de lavage s'appuie sur les propriétés physico-chimiques des molécules à éliminer. On peut rappeler que l'odeur est due principalement aux produits suivants :

- molécules acides (H_2S , mercaptans ...)
- molécules basiques (NH_3 , amines ...)
- molécules oxydables (chaines oxygénées comme les aldéhydes, cétones, mais aussi les composés soufrés, aminés ...)

Ce classement simpliste permet d'élaborer un système de lavage de gaz. En effet le traitement peut comprendre :

- un lavage basique par de la soude par exemple afin de transférer les molécules acides
- un lavage basique par de l'acide sulfurique par exemple pour l'élimination des molécules basiques. Il convient de noter que cet acide est aussi un oxydant.
- un lavage oxydant par de l'hypochlorite de sodium (l'eau de javel), de l'eau ozonée, du permanganate de potassium ou de l'eau oxygénée. L'eau de javel peut être soit injectée sous forme de solution soit fabriquée in situ par électrolyse d'une solution concentrée de NaCl. Il convient de noter que deux phénomènes sont à considérer dans le cas de l'emploi d'eau de javel. En effet, ce réactif est à la fois un oxydant mais est aussi très basique.

Dans le cas spécifique de la destruction de l'ammoniac et des amines, des chloramines sont formées puis oxydées jusque la formation d'azote gazeux avec production de chlorures. Pour les molécules soufrées il y a formation d'ions sulfates et de chlorures (52). L'ozone peut être utilisé à sec mais il a été montré (36) que l'utilisation d'eau ozonée permettait d'obtenir de meilleures performances de traitement.

$KMnO_4$ est très peu toxique. Son emploi est recommandé dans le cas d'effluents gazeux chargés en composés organiques du type aldéhydes, cétones, acides ... Son domaine de pH d'utilisation est de 8 à 9,5 et sa concentration de 1 à 4% en poids. La réaction se traduit par un virage au brun. L'eau oxygénée est peu utilisée dans le traitement des odeurs. Cependant, son utilisation est possible pour le traitement des solutions aqueuses après transfert dans celles-ci des polluants malodorants (51).

Il est possible aussi d'utiliser des solvants organiques lourds pour traiter des gaz contenant des composés odorants. Ainsi, des éthylène-glycols plus ou moins condensés ont été mis en œuvre pour piéger des molécules chlorées.

Le laveur doit être ici dimensionné avec soin. En effet, la viscosité des réactifs est importante et peut perturber l'écoulement gaz-liquide. Après avoir été saturés, les glycols sont régénérés par chauffage, les solvants désorbés pouvant être récupérés (54)(55).

Les solutions de lavage circulent généralement en système bouclé avec adjonction en continu de solutions neuves et soutirage des solutions usagées.

Il est souvent utile, pour ne pas avoir d'interférences entre les différentes tours de lavage, de prévoir des dévésiculeurs permettant la coalescence de microgouttelettes de réactifs. Certains préconisent même intermédiairement un lavage à l'eau.

3.4.4 MISE EN ŒUVRE DES LAVEURS

La figure 19 présente un schéma de principe du lavage de gaz par contacteur du type tour à garnissage mis en œuvre industriellement en désodorisation.

Un prétraitement des gaz est souvent nécessaire. Ainsi il convient de travailler à des températures ambiantes favorisant la solubilité, d'où l'obligation de refroidir les effluents gazeux et de condenser l'humidité sursaturante. Cette eau récupérée contient des molécules odorantes, par exemple de l'ammoniac, et doit être envoyée à la station d'épuration. De plus, les poussières peuvent encrasser les tours garnies. Une pulvérisation par de l'eau permet d'abattre ces poussières. Un débit de 1 m³ d'eau pour 1000 m³ de gaz est suggéré. Cette eau solubiliserait aussi certains produits odorants.

Une série de tours de lavage est à mettre en œuvre dans le cas de la désodorisation. Elle comprend un lavage acide, et un lavage basique qui peut être aussi oxydant.

En sortie de l'air traité, un dévésiculeur est utile afin d'éliminer l'entraînement de gouttes de réactifs avec le flux gazeux.

Il convient de prendre en compte, lors de la mise en œuvre de ces lavages, le problème de corrosion. En effet, l'utilisation d'oxydants ou de solutions acides pose le problème de la stabilité des contenants. Les laveurs doivent donc être en matériaux plastiques, céramiques ou acier inoxydable.

Le contrôle des réactifs s'effectue par mesure de pH, d'oxydo-réduction, ou de mesure directe des oxydants utilisés.

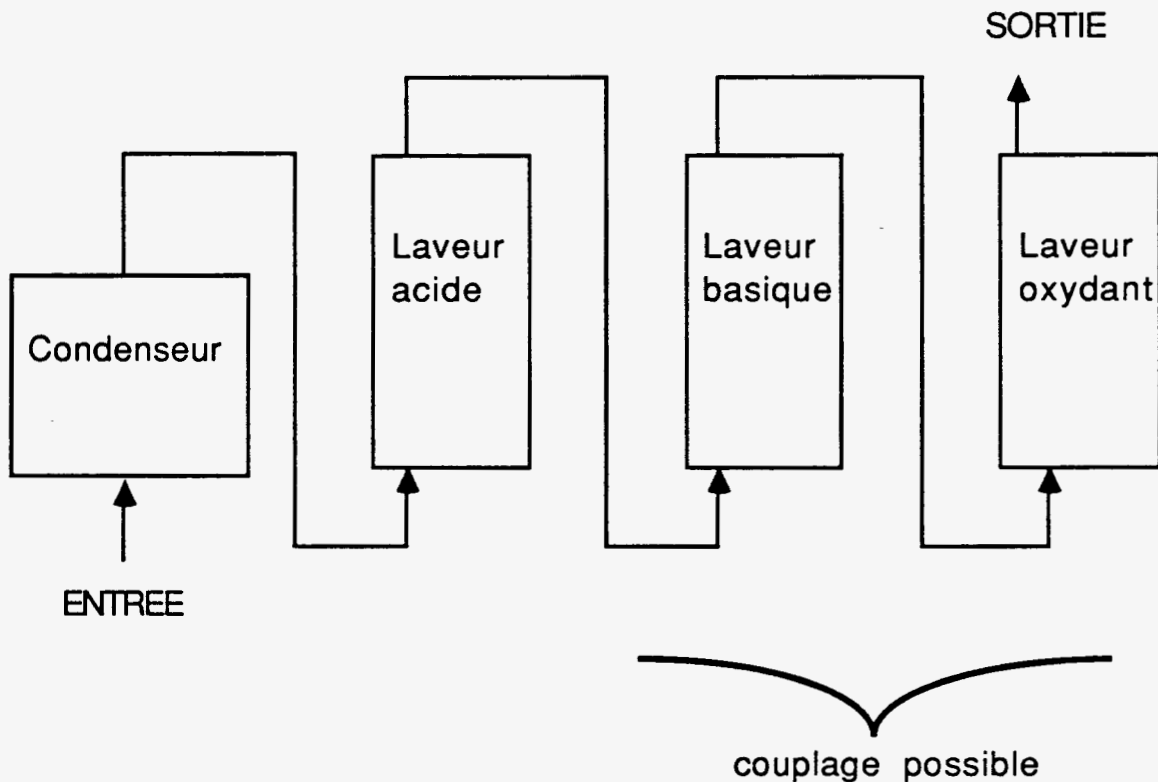


Figure 19 : Schéma de principe de mise en œuvre de tour de lavage garnie en désodorisation.

3.4.5 RAPPEL DU SYMBOLISME UTILISE

A	:	Section de la colonne (L^2)
A_i	:	Aire interfaciale (L^{-1})
A_p	:	Surface spécifique du garnissage (L^{-1})
C	:	Concentration (ML^{-3})
C^*	:	Concentration dans le liquide à l'interface (ML^{-3})
C_e	:	Concentration à l'équilibre (ML^{-3})
C_T	:	Concentration totale (ML^{-3})
d	:	Diamètre nominal du garnissage (L)
d_B	:	Diamètre moyen des bulles (L)
D	:	Diamètre de la colonne (L)
D_L, D_G	:	Coefficients de diffusion du polluant dans le liquide et dans le gaz (L^2T^{-1})
E	:	Coefficient d'accélération
F	:	Facteur de garnissage (L^{-1})
g	:	Accélération de la pesanteur (L^2T^{-2})
H, H', H''	:	Constante de Henry
H_a	:	Nombre de Hatta
HTU	:	Hauteur d'une unité de transfert
K, k	:	Coefficients de transfert (LT^{-1})
N	:	Quantité transférée (M)
NTU	:	Nombre d'une unité de transfert
P	:	Pression (MLT^{-1})
P^*	:	Pression partielle à l'interface (MLT^{-1})
Q_v	:	Débit volumique (L^3T^{-1})
Q_m	:	Débit molaire (ML^{-3})
R	:	Constante des gaz parfait

Re	:	Nombre de Reynolds	$Re = d_B U_G \rho_G / \mu_G$
Sc	:	Nombre de Schmitd	$Sc = \mu_G / \rho_G D_G$
Sh	:	Nombre de Sherwood	$Sh = k_G d_B / D_G$
T	:	Température	
t	:	Temps (T)	
U	:	Vitesse (LT^{-1})	
V	:	Volume du réacteur (L^3)	
x	:	Fraction molaire dans le liquide	
y	:	Fraction molaire dans le gaz	
z	:	Cote dans le réacteur (L)	
Z	:	Hauteur de garnissage (L)	
δ	:	Epaisseur du film (L)	
ϵ	:	Fraction de vide	
μ	:	Viscosité ($ML^{-1}T^{-1}$)	
ρ	:	Masse volumique (ML^{-3})	
σ	:	Tension superficielle (MT^{-2})	
σ_c	:	Tension superficielle critique (MT^{-2})	

Indices :

e	:	Equilibre
G	:	Gaz
i	:	Polluant
L	:	Liquide
m	:	Massique
OL	:	Globale côté liquide
OG	:	Globale côté gaz
s	:	Sortie

3.5 L'OXYDATION PAR VOIE SECHE (56)

Dans un but de destruction par oxydation les molécules odorantes présentes dans les effluents gazeux industriels, l'ozone peut être utilisé. A la différence des laveurs où l'oxydant est tout d'abord transféré dans une solution aqueuse qui est elle-même injectée dans le contacteur, l'oxydation par voie sèche met en jeu des réactions chimiques entre les molécules malodorantes et l'oxydation se fait directement dans le gaz.

La fabrication de l'ozone est très répandue en traitement d'eau (57). Elle consiste en une ionisation de l'oxygène de l'air dans un champ électrique de très haut voltage (10 000 à 20 000 Volts) L'air admis dans le réacteur pour la production d'ozone doit être exempt de poussières et d'humidité. L'air contenant l'ozone produit à une concentration de 10 à 20 g/m³ est alors utilisable et peut être injecté directement dans l'air malodorant à traiter.

La mise en œuvre du traitement peut être effectuée par introduction de l'ozone dans la gaine principale comme le montre la figure 20. Quelques précautions sont cependant nécessaires :

- Le temps d'oxydation doit être de l'ordre de 4 à 5 secondes ce qui implique une longueur de canalisation après captation non négligeable.
- Il conviendra d'avoir un mélange homogène entre l'air malodorant et l'ozone. En effet du fait de la densité élevée de l'ozone ($d = 1,657$ soit $\rho = 2,143 \text{ kg/m}^3$), il convient de provoquer des turbulences dans le circuit gazeux, sans quoi l'air et l'ozone formeront des veines gazeuses parallèles sans se mélanger. On pourra par exemple utiliser des mélangeurs statiques disposés dans les tuyaux d'alimentation du réacteur d'oxydation (58) (59).
- L'air à traiter doit être relativement sec, son humidité relative ne doit pas dépasser 60 %.
- Le système doit être traité contre la corrosion.
- Un asservissement de la demande d'ozone à la captation de l'air malodorant est impératif pour des raisons de sécurité.

Ce type de désodorisation n'est pas très répandu et pour des raisons d'efficacité, on préfère transférer l'ozone dans l'eau (dans une colonne à bulle par exemple) et effectuer la désodorisation dans un contacteur gaz-liquide par cette eau ozonée.

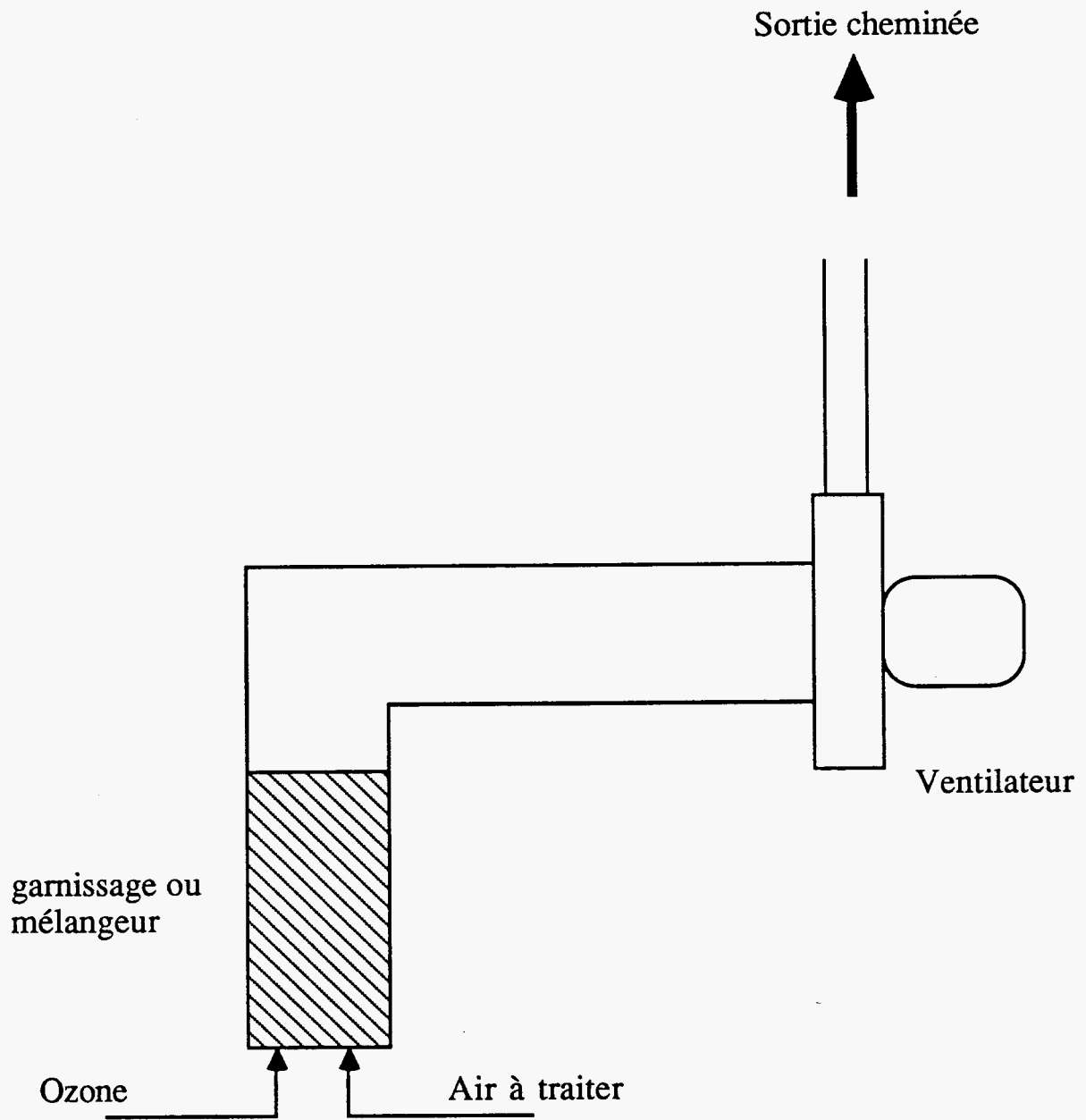


Figure 20: Schéma de principe de la mise en œuvre de l'oxydation de l'air malodorant par l'ozone (voie sèche).

3.6 LE MASQUAGE ET LA DISPERSION

3.6.1 LE MASQUAGE

Ce procédé utilise la propriété de l'odorat de perdre sa sensibilité à une odeur lorsqu'elle est mélangée avec une autre odeur plus intense.

Les agents masquants sont habituellement utilisés pour compléter un traitement : on masque la mauvaise odeur résiduelle par une autre de caractère agréable. Les cellules olfactives sont alors saturées par les molécules chimiques d'odeur agréable et l'on obtient, par conséquent, un masquage des produits malodorants. On peut citer différentes possibilités d'utilisation des agents masquants :

- introduction d'aérosols dans les gaines d'évacuation des gaz malodorants
- addition dans le liquide de lavage
- constitution d'un écran avec des jets d'air chargés d'aérosols pour isoler la source malodorante du voisinage (mur odorant)

Il convient d'être très prudent quant à l'emploi des agents masquants en désodorisation industrielle. En effet, une mauvaise odeur émise pourra être très bien masquée localement, mais lors de la dispersion du flux gazeux dans l'atmosphère, les molécules odorantes pourront être alors "régénérées" et la nuisance olfactive sera alors de nouveau ressentie. En outre, il faut aussi considérer les possibilités de réactions chimiques entre les molécules odorantes et l'agent masquant dans l'atmosphère sous l'effet par exemple des UV générant des produits indésirables. Trop peu d'études sur ce sujet sont à ce jour à notre disposition pour ne pas se poser un certain nombre de questions sur le masquage.

3.6.2 LA DISPERSION (60)

La dispersion n'est pas à proprement parler un procédé de traitement des odeurs. On ne peut en effet, sans une certaine ironie, parler d'épuration par dilution. Cependant du fait des seuils olfactifs des molécules odorantes il est possible d'éliminer la nuisance olfactive par dispersion dans l'atmosphère. Cette approche encore couramment employée fait appel tout simplement à des conduits de cheminées permettant la dispersion du flux gazeux malodorant.

Une cheminée est un conduit qui répand des gaz ou des fumées dans l'atmosphère à une certaine hauteur, de telle sorte qu'ils subissent une dispersion que l'on espère suffisante avant de revenir au sol. En d'autres termes, une cheminée est le système qui, à partir d'une certaine concentration d'odeur à l'émission, permet d'atteindre dans l'environnement (immersion) des concentrations ne générant pas de nuisances olfactives. La valeur et la répartition de celles-ci dépendent d'un grand nombre de facteurs, principalement météorologiques.

- Quels sont ces facteurs météorologiques ?
- Comment calcule-t-on en fonction de ces paramètres la hauteur d'une cheminée ?
- Quelle est la signification des résultats qu'on peut espérer atteindre ?

Telles sont trois questions qu'il faut se poser face à ce type de problème, étant entendu que l'objectif de ce paragraphe est de se limiter à une approche très globale du problème.

3.6.2.1 Dispersion et facteurs météorologiques

L'état de stabilité ou d'instabilité de l'atmosphère est lié au régime de température en fonction de l'altitude ; il résulte des différences de pression (entre endroits différents) créées par les conditions thermiques, la genèse des vents.

On imagine aisément qu'il y a des liens directs entre l'état de l'atmosphère (instabilité, équilibre neutre, stabilité voire inversion lorsque la température augmente avec l'altitude) et la dispersion des polluants.

L'état d'instabilité de l'atmosphère (atmosphère turbulente) est évidemment favorable à la diminution de la pollution de l'air.

L'émission de polluants gazeux dans une atmosphère au repos donne lieu à une dispersion due à la diffusion moléculaire dans l'air. Ce processus est actuellement bien compris et modélisable. La dispersion s'avère dans ce cas particulièrement inefficace dans la mesure où l'on constate que c'est lors de faibles vitesses des vents que le nombre des plaintes est le plus important. Cependant, dans la plupart des cas, l'atmosphère n'est pas au repos et la dispersion est régie par des phénomènes de turbulence.

L'efficacité donc, du mélange des polluants et de l'air dans une direction verticale est influencée par le caractère plus ou moins stable de l'atmosphère. La dispersion selon un axe vertical et l'élévation des gaz pollués par rapport à la hauteur réelle de l'émission sont fonction de cette instabilité. En conséquence de quoi, la hauteur et la forme du panache de fumée ou gaz variera : looping, fanning, fumigation (ou enfumage).

La façon dont les polluants émis par une cheminée de hauteur h se répartissent est évaluée par rapport à des approximations :

- la hauteur moyenne du panache (ou hauteur effective) est supérieure à la hauteur de la cheminée $H = h + \Delta h$, où Δh dépend de l'énergie cinétique et de la masse thermique des gaz ainsi bien entendu que de la vitesse des vents. Il existe de nombreuses formules empiriques, généralement du type

$\Delta h = K Q_h^b / u^a$ où Q_h est l'émission calorifique des fumées vis-à-vis de l'ambiance en cal/s ; u , la vitesse du vent ; K , a , b , sont des constantes empiriques

- l'assimilation du panache à un cône. Ceci permet de calculer aisément la concentration des polluants au moment où ils atteignent le sol. Il suffit en effet de diviser la quantité de polluants émis par unité de temps (Nm^3/s) par le volume moyen du tronc du cône qui se développe en une seconde, c'est à dire approximativement :

$$\pi \cdot H^2 u \text{ (vitesse du vent en m/s)}$$

On obtient donc :

$C_v = Q_v / \pi \cdot H^2 \cdot u$ où C_v est la concentration volumétrique au sol, Q_v le débit volumique de l'émission de polluants en Nm^3/s , u la vitesse du vent en m/s, et H la hauteur effective en m.

Cette formule exprime donc que la concentration des polluants au sol (immission) est directement proportionnelle au volume émis, et inversement proportionnelle à la vitesse du vent et au carré de la hauteur d'émission.

Nombreux sont les auteurs qui se sont efforcés de donner une forme mathématique aux phénomènes observés ou pressentis ; on assimile généralement le panache à une parabole, et l'on admet que les diffusions verticales et horizontales provoquent des distributions gaussiennes des concentrations. On peut donc développer une équation générale de dispersion dans les trois dimensions tenant compte d'une série de paramètres météorologiques tels la vitesse du vent, l'exposant météorologique (nombre sans dimension) et des coefficients (C_x et C_y) liés aux écarts-types de la distribution des concentrations. Cette équation a pour formule générale :

$$C_x = \frac{2 Q_p * 10^6}{\pi C_y C_z u x^{(2-n)}} \exp. \left(- \frac{H^2}{C_z^2 * x^{(2-n)}} \right)$$

avec :

- C_x : concentration au sol en mg/m^3
 Q_p : émission de polluants en poids kg/s
 u : vitesse du vent en m/s
 H : hauteur effective de la source en m
 C_z et C_y : coefficients de diffusion verticale et horizontale perpendiculaire au vent.
 n : exposant météorologique variant de 0 (très forte turbulence) à 1 (très grande stabilité)
 x : distance à la source

Dans cette formule interviennent des coefficients dont les valeurs sont fournies par les auteurs spécialisés sous forme de tables en fonction des classes de turbulence/stabilité. Il y a malheureusement de grandes discordances dans les valeurs recommandées aussi renvoyons nous le lecteur à un travail de synthèse (61). En pratique et en vue de simplifier les calculs, on peut ne s'intéresser qu'à la valeur maximum de la concentration selon l'axe des x , sous le vent et à l'endroit (la distance x_{max}) où l'on risque de l'obtenir en faisant :

$$\frac{d C_x}{dx} = 0$$

on obtient :

$$C_{x_{\text{max}}} = \frac{2 Q_p * 10^6}{\pi u e H^2} * \frac{C_z}{C_y}$$

$$x_{\text{max}} = \frac{H}{C_z} \exp. \left(\frac{2}{2-n} \right)$$

Il existe donc plusieurs méthodes de caractérisation du type d'atmosphère ainsi que plusieurs modèles de dispersion plus ou moins complexes utilisés afin de quantifier la dispersion des gaz odorants.

A titre d'exemple nous citerons les travaux de Kretzschmar & Mertens (62) qui ont analysé des rejets continus de gaz odorants en se basant sur le modèle bi-gaussien et en utilisant les mesures météorologiques locales relatives avec des temps moyens de 30 minutes. En divisant cette émission en plusieurs tranches successives relatives (temps moyens de 10 secondes jusqu'à une minute), le modèle peut simuler un rejet continu en représentant les

trajectoires de ces tranches à l'aide des vecteurs des vents. Les résultats sont mis à jour en continu, la zone contaminée est visualisée sur vidéo tandis que le niveau de la contamination, obtenu par un modèle tri-gaussien, peut être présenté soit sous forme de données soit sous forme de graphique.

Les rejets discontinus, qui correspondent plutôt à des accidents, sont étudiés aussi par les modèles de trajectoires de tranches en utilisant les vecteurs des vent locaux relatifs avec des temps moyens de moins de 1 minute.

Ces modèles peuvent aussi être appliqués pour déterminer le débit d'émission à partir des concentrations mesurées au niveau du sol.

D'autres auteurs (63) ont développé un modèle de diffusion des polluants odorants en prenant en compte le caractère instantané de la perception de l'odeur par le nez humain.

Il apparait dans son principe plus adapté aux problèmes de dispersion des émissions odorantes que les modèles gaussiens qui se basent sur des moyennes horaires des concentrations en polluants.

De plus le terme "fréquence d'odeur Φ " est introduit, il se définit comme la fraction du temps dans une heure où une concentration supérieure à la concentration seuil est observée. Φ est calculé par le modèle de Högström ; si Φ dépasse une certaine valeur limite, l'heure dans son ensemble est considérée comme causant une nuisance olfactive. Cette méthode donne des résultats très différents de la méthode classique (63).

3.6.2.2 Approche du calcul de cheminées

Lorsque l'on dispose de formules donnant la concentration maximale $C_{x_{\max}}$ en fonction de la hauteur effective H d'un panache, on peut inversement calculer la hauteur H nécessaire pour que la concentration maximale au sol ne dépasse pas un niveau donné, par exemple en utilisant la formule simplifiée de Sutton ou la formule empirique utilisée par la législation française et belge ou bien celle prescrite par l'administration allemande (60).

* Formule de Sutton simplifiée

$$C_{x_{\max}} = \frac{235\ 000\ Q_p}{u\ H^2}$$

ou

$$H = \sqrt{\frac{235\ 000\ Q_p}{u\ C_{x_{\max}}}}$$

Pour $u = 5\text{m/s}$ on trouve :

$$H = \sqrt{\frac{47\ 000\ Q_p}{C_{x_{\max}}}}$$

qui correspond à une formule fréquemment utilisée en Grande-Bretagne

* Formule empirique utilisée par la législation française et belge

$$h = \sqrt{\frac{340\ Q}{C_{\max}}} * \sqrt[3]{\frac{1}{R\Delta T}}$$

- h : hauteur en m de la cheminée
- Q : polluants en kg/h
- C_{max} : concentration en SO₂ admise en mg/m³
- R : débit gazeux en m³/h
- ΔT : différence de température vis-à-vis de l'ambiance en °C

Encore une fois, même pour les formules élaborées plus récemment, leur valeur pratique reste très controversée. En particulier, il faut tenir compte des limites étroites dans lesquelles elles sont considérées comme valables. Néanmoins, même si ces modèles restent approximatifs, ils permettent une meilleure maîtrise de la dynamique des phénomènes en tenant compte du relief, des obstacles au sol et de la multiplicité des sources.

3.6.2.3 Interprétation des résultats

Pour interpréter la situation réelle avec une approximation suffisante, il faut tenir compte des éléments suivants :

- direction des vents,
- les types d'atmosphères ou de conditions météorologiques : on s'efforcera d'obtenir auprès de stations météorologiques locales des statistiques plus représentatives de la région considérée,
- l'influence des obstacles : des simulations sur modèles ont conduit à des formules empiriques fonction de la distance et de la hauteur de l'obstacle.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) **Benoit O., Pannier G.** (1982), Les polluants atmosphériques et les odeurs. Nature, mesure, méthodes d'élimination, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC n°117.
- 2) **Lambotte J.** (1974), Nature et mesure des odeurs, Conférence faite au stage d'étude de la pollution atmosphérique, Centre de Perfectionnement Technique
- 3) **Strehl Y., Millard P.** (1977), Traitement par combustion des fumées et odeurs d'origine industrielle- Récupération d'énergie, Pollution Atmosphérique, 75 , 301-316
- 4) **Katari V.S., Vatauvuk W.M., Wehe A.H.** (1987), Incineration techniques for control of volatile organic compounds emissions : Part I, Fundamentals and process design considerations, J.APCA, 37, 1, 91-99
- 5) **Katari V.S., Vatauvuk W.M., Wehe A.H.** (1987), Incineration techniques for control of volatile organic compounds emissions : Part II, Capital and annual operating costs, JAPCA, 37, 1, 199-201
- 6) **Vatauvuk W.M., Neveril R.B.** (1980), Factors for estimating capital and operating costs, Chemical Engineering, 3 Novembre.
- 7) **Vatauvuk W.M., Neveril R.B.** (1982), Estimate the size and cost of incinerators, Chemical Engineering, 12 Juillet.
- 8) **Woronoff G.** (1991), Technical and economical comparison of VOC control techniques, Congrès international I.S.F, Strasbourg.
- 9) **Kast W., Otten W.** (1987), The breakthrough in fixed bed adsorbers : methods of calculation and the effects of process parameters, Intern. Chem. Eng., 29, 2, 197-211
- 10) **Gradsztajn S, Conard J., Benoit H.** (1970), J. Phys. Chem. Solids, 31, 1121-1135
- 11) **Le Cloirec P., Martin G., Gallier J.** (1988), ¹H NMR investigation on saturated and unsaturated activated carbon, quantification and dynamics of protons, Carbon, 26, 3, 275-282
- 12) **Le Cloirec P., Baudu M., Martin G.** (1990), Membrane, toiles, fibres ou feutres : des charbons actifs d'utilisations très prometteuses, Rev. Sci. Tech. Défense, 2, 111-123
- 13) **Le Cloirec P., Baudu M., Martin G.** (1990), Dispositif de traitement de fluides au moyen d'une structure d'adsorption à couches superposées espacées, et régénération par effet joule, Brevet Français n° 90 03923 déposé le 22/03/90
- 14) **Boutakhamt N., Lin L., Le Cloirec P.**(1991), Evolution de H₂S sur charbon actif, étude en réacteur discontinu., publication en cours

- 15) **Harper M., Purnell C.J.** (1980), Alkylammonium montmorillonite as adsorbents for organic vapors from air, *Environ. Sci. Technol.*, 24, 1, 55-62
- 16) **Le Cloirec P., Dagois G., Martin G.** (1991), Traitement avec transfert gaz-solide : l'adsorption, "Odeurs et désodorisation dans l'environnement", P. Laffort & G. Martin Coordonnateurs, Tech. & Doc, Lavoisier, Paris, Ch. 11
- 17) **Nishida K., Inone H.** (1986), Removal of components by soils, *P.P.M.*, 17, 9, 37-47
- 18) **Dodori T., Nogushy Y.** (1984), Deodorization of waste gases from steel plant by soils, *Chuko to Tunko*, 385, 9-13
- 19) **Martin G., Le Cloirec P., Lemasle M., Cabon J.** (1989), Rétention de produits odorants sur tourbes, *Proceeding 8th World Air Clean Congress*, The Hague, The Netherlands, 4, 373-378
- 20) **Tanada S., Boki K.** (1980), Adsorption and removal of industrial offensive malodorous substances, *Kushima Bunri Daigaku Kiyo*, 20, 9-18
- 21) **Shigematsu A., Suzuki K.** (1987), Thermoplastic resin composition, *Brevet Européen n° 2203928*
- 22) **Osterburg G., Gluzek K.H., Reith W., Neier W.** (1987), Process for deodorizing isopropyl alcohol, *Brevet Allemand DE 3608202*
- 23) **Ritoul J.C.** (1983), A heating apparatus for heating solid particulate material, *Brevet Européen n° 0104749*
- 24) **Legros E.F.** (1981), Elimination des odeurs par adsorption sur charbon actif, *Tribune Cebedeau*, 435, 33, 81-90.
- 25) **Lemarchand D.** (1981), Thèse de Doctorat d'Ingénieur, Université de Rennes I, Série B, n° d'ordre 133, n° série 96.
- 26) **Le Cloirec P.** (1985) Thèse de Doctorat ès Sciences Physiques, Université de Rennes I, Série B, n° d'ordre 423, n° série 235.
- 27) **Trambouze P., Van Landeghem H., Wauquier J.P.** (1984), Les réacteurs chimiques, Edition Technip, Paris
- 28) **Coulson J.M., Richardson J.F.** (1966), *Chemical engineering*, Pergamon Press, Oxford, U.K.
- 29) **Treybal R.E.** (1981), *Mass transfer operations*, 3th Ed, McGraw Hill Intern. Ed.
- 30) **Le Cloirec P., Martin G., Dagois G.** (1989), Désodorisation de gaz de fermentation d'un biostabilisateur d'ordures ménagères, *Tech. Sci. Meth.*, 4, 231-236
- 31) **Le Cloirec P.** (1991), Elimination d'H₂S sur charbon actif, *Tech. Sci. Meth.*, 4, 205-207
- 32) **Coutant Ph.** (1990), Le traitement de l'hydrogène sulfuré à la station d'épuration de cholet, une solution le charbon actif, *Tech. Sci. Meth.*, 3, 127-130
- 33) **Perry R.H., Green D.** (1984), *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw Hill Intern. Ed, Chemical Engineering Series, New York.

- 34) **Coulson J.M., Richardson J.F.** (1978), *Chemical Engineering*, Pergamon Press, 3^{ème} Ed, Vol. 2.
- 35) **Withman W.G.** (1923), The two film theorie of absorption, *Chem. Met. Eng.*, 29, 147.
- 36) **Le Sauze N.** (1990), Etude du transfert de l'ozone dans les colonnes à bulles. Modélisation, application au traitement des eaux potables et à la désodorisation des gaz soufrés, Thèse, Université de Rennes I, n° d'ordre 458.
- 37) **Van Krevelen D.W., Hoftijzer P.J.** (1948), Kinetics of gas-liquid reaction part 1, general theorie, *Rec. Trav. Chim*, 67, 563
- 38) **Gardais D.** (1990), Environnement et électricité, les procédés électriques de traitement de rejets insutriels, *Dopee 85*, Avon, France
- 39) **Howard J.R.** (1989), *Fluidized bed technology, principles and applications*, Adam Hilger, Bristol & New York.
- 40) **Morris G.A., Jackson J.** (1953), *Absorption tower*, Londres
- 41) **Norton US Stoneware** (1978), *Absorption distillation optimisation*, Mass transfer Inc
- 42) **Farid M. M., Gunn D.J.** (1979), *Chem. Eng. Sc.*, 34, 579
- 43) **Copigneaux P.**, *Distillation, Absorption, Techniques de l'Ingénieur*, J2626-1-J2626-22
- 44) **Charpentier J.C., Wild G.**, *Absorption avec réaction chimique, Techniques de l'Ingénieur*, J2640-1-J2640-16
- 45) **Onda K., Takeuchi H., Okumoto Y.** (1968), *J. Chem Eng. Jap*, 1, 56
- 46) **Puranick S. S., Vogelpohl A.** (1974), *Chem. Engn Sc.*, 29, 501
- 47) **Danckwerts P.V.** (1970), *Gas liquid reaction*, McGraw Hill, New York, USA
- 48) **Mehta K.C., Sharma M.M.** (1975), *Brit. Chem. Eng.*, 53, 512
- 49) **Nukiyama S., Tanasawa Y** (1939), *Trans Soc. Mech. Eng*, 5, 63
- 50) **L'Homme G.A.** (1977), *Le génie chimique appliqué au traitement des effluents industriels gazeux*, Edition CEBEDOC, Liège, Belgique
- 51) **Renders I.J.** (1980), L'emploi de réactifs chimiques pour la prévention et le traitement de formations malodorantes, *Trib. Cebedeau*, 435, 33, 91-99
- 52) **Cadena F., Peters R.W.** (1988), Evaluation of chemical oxidizers for hydrogen sulfide control, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 60, 7, 1259-1263
- 53) **Perdreau L., Djerid S., Belin C., Laurent A., Charpentier J.C.** (1982), Study of the working of a new multicell scrubber applied in the fight against air pollution, *Sci. Total Environ.*, 23, 215-224
- 54) **Charpentier J.C.** (1975), Le lavage des gaz par un solvant sélectif, conception des laveurs, *Pollut. Atm.*, 66, 109-124

- 55) **Azou. A., Le Cloirec P., Martin G.** (1990), Adsorption de solvants chlorés dans des éthylènes- glycols, Proceeding Congrès "Les réacteurs gaz-liquide", Nancy, France
- 56) **Benoit O., Pannier G.** (1982), Les polluants atmosphériques et les odeurs. Nature, mesures, méthodes d'élimination. Lab. Ponts et Chaussées, Rapport de Recherches LPC n° 117
- 57) **Degrémont** (1978), Memento technique de l'eau, Tech. & Doc, Lavoisier, Paris
- 58) **Fanlo J.L.** (1987), Les odeurs : nature, mesure, élimination, Rapport Ecole des Mines d'Alès
- 59) **Sulzer** (1991), Documentation interne
- 60) **Lemaire F.** (1977), Dispersion des polluants et calcul des cheminées, Le génie chimique appliqué au traitement des effluents industriels gazeux, Ed Cebedoc (Liège), 193-228
- 61) **Lanoye R.** (1973), Inleiding tot atmosferische dispersie van schoorsteengassen, R.U.G., Gent
- 62) **Kretzschmar J.G., Mertens I.** (1984), Real-time on-site simulation of the dispersion of continuous and discontinuous releases of odoriferous gases, caractérisation et techniques de réduction des nuisances olfactives dans les industries de procédés, Société belge de filtration, Bruxelles, 213-229
- 63) **Voerman J.W.T., Harssema H.** (1984), Development of a dispersion model for odours, caractérisation et techniques de réduction des nuisances olfactives dans les industries de procédés, Société belge de filtration, Bruxelles, 231-244

3.7 LES TRAITEMENTS BIOLOGIQUES

3.7.1 INTRODUCTION

Le principe de la purification et du traitement de gaz par voie biologique date des années 20 (1). Si l'un des tous premiers brevets remonte à 1941 (2), la première réalisation industrielle d'un filtre biologique semble dater de 1953 (3) ; elle concernait l'épuration de gaz par un biofiltre à base de terre (sol) installé sur une unité de traitement d'eau à Long Beach (Californie).

Depuis lors, les recherches tant sur le plan microbiologique que sur le plan du génie des procédés n'ont cessé afin d'éliminer par voie biologique (oxydation) des composés volatils organiques ou non, appartenant à une grande variété de familles chimiques. Un tel développement, trouve, bien entendu, son origine dans les progrès de la connaissance des microorganismes, de leur physiologie, métabolisme, écologie...(bactéries, moisissures pour l'essentiel).

Ces études ont permis en particulier de définir, d'explicitier au sein de cycles biogéochimiques, les interactions entre organismes vivants et matière, aboutissant au concept de "continuum biogéochimique".

Une autre explication à ce développement de la biodésodorisation, est l'affirmation de plus en plus nette des préoccupations de l'homme face aux problèmes de pollution et leurs nuisances. Enfin, au regard d'études les plus récentes, les procédés de biodésodorisation en général, et la biofiltration des gaz en particulier, s'avèrent au plan économique (investissement et fonctionnement) particulièrement intéressants dans de nombreux cas de figure, rivalisant ainsi avec les procédés physico-chimiques.

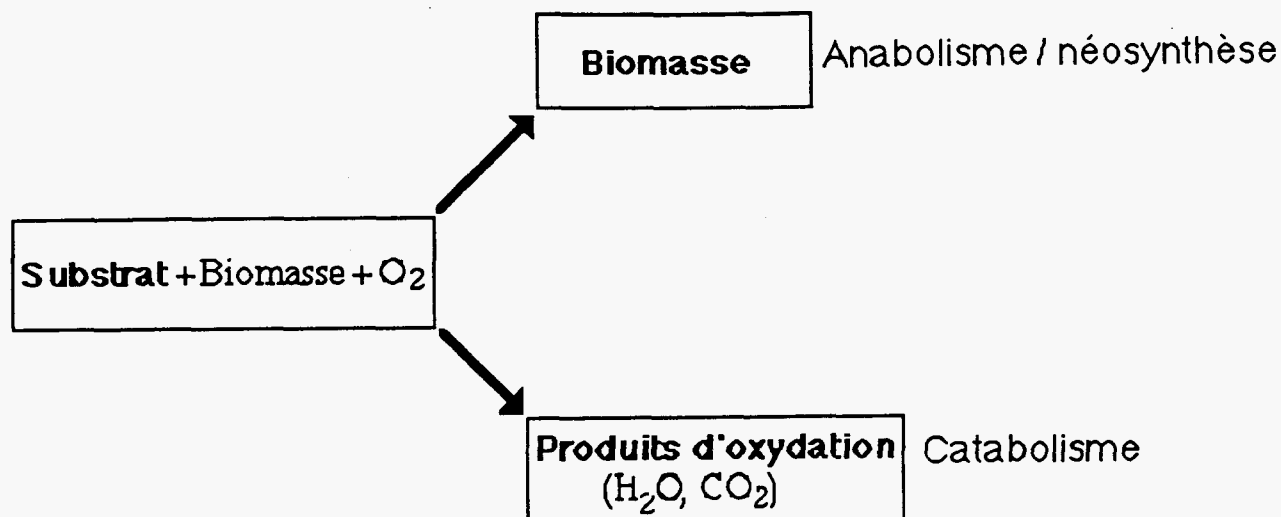
3.7.2. DEGRADATION DE SUBSTRATS

3.7.2.1. Biodégradabilité

Le principe qui conduit à l'utilisation de microorganismes au sein de systèmes de traitement repose en premier lieu sur les propriétés et les potentialités de ces microorganismes en matière de dégradation des composés présents dans les gaz, qu'ils soient organiques ou non. En matière d'environnement et de dépollution ce principe est largement utilisé et validé au niveau des procédés biologiques de traitement d'effluents liquides (traitements d'eaux usées par voie aérobie ou anaérobie), de déchets solides (compostage, ordures ménagères...) voire, plus récemment de sols (dépollution de sites ou friches industriels).

Dans le cas du traitement biologique de gaz, la dégradation doit permettre la transformation de composés (organiques ou minéraux) odorants et parfois toxiques, en composés **inodores et atoxiques**. L'élimination de substrats organiques par les microorganismes vient du fait que ces organismes (bactéries pour la plupart, moisissures, levures, ou algues microscopiques...) utilisent ces composés organiques, comme seule source de carbone pour leur propre biosynthèse (Anabolisme), et comme source d'énergie, indispensable à la dégradation d'un substrat (Catabolisme). Dans le cas du traitement d'air, seul un métabolisme de type **aérobie** intervient*.

L'élimination d'un composé présent dans le gaz passe donc par son **oxydation** selon le schéma suivant:



L'oxydation complète d'un substrat carboné organique conduit à la formation de biomasse et de composés ou produits minéraux (CO₂ et H₂O).

* Nous n'aborderons dans ce chapitre, que le traitement biologique des odeurs contenues dans l'air (en présence donc, d'oxygène). Cela exclut en particulier les procédés biologiques de traitement de gaz en absence d'oxygène (anaérobie), procédés, qui par ailleurs n'ont pas encore fait l'objet d'un développement industriel (4, 5, 6); à titre indicatif, nous mentionnerons deux cas illustrant la mise en œuvre d'une part, d'une bactérie chimolithotrophe, (*Thiobacillus denitrificans.*) et d'autre part, de bactéries photolithotrophes telles appartenant aux genres *Chlorobium*, *Chromatium*.

Les performances d'un procédé biologique de traitement de gaz opérant en continu sont le résultat final d'interactions physiques et biologiques complexes. Ces interactions définissent ce qu'on appelle les **macrocinétiques** du procédé.

Les phénomènes microbiologiques sont caractérisés par les vitesses des processus d'oxydation ou **microcinétiques** du procédé. Du fait de la grande variété de substrats (polluants) qui peuvent faire l'objet d'une biodégradation et de l'hétérogénéité des populations microbiennes (microflore) mises en jeu lors d'un traitement de gaz, la simplification de ces microcinétiques est nécessaire. Les vitesses de dégradation de substrats et de croissance de la biomasse peuvent être décrites de manière satisfaisante par l'équation de Monod, établie pour la croissance de souches pures.

$$-y \frac{dS}{dt} = \mu_m \frac{S}{S + K_s} X \quad (1)$$

où y est le coefficient de rendement en biomasse, S la concentration en substrat, X la concentration en biomasse, μ_m le taux de croissance maximale et K_s la constante de Michaelis-Menten.

Les boues activées (liquides ou sèches), le sol, le compost ou la tourbe constituent en pratique, une source disponible, importante et variée de microorganismes permettant d'assurer l'élimination par oxydation des composés dits naturels et donc facilement biodégradables comme les alcools, les acides, les esters, les cétones...

L'élimination de tels composés par les cellules libres en milieu liquide (laveur biologique), (cf paragraphe suivant) suit une cinétique d'ordre zéro, ceci jusque pour de faibles concentrations en substrats (quelques mg/m³ de gaz); K_s reste négligeable devant S, cela implique que K_s ~ 0 (1) traduisant la forte affinité du microorganisme pour le substrat. La vitesse d'élimination est donc fonction de la concentration en biomasse (catalyseur) dans des conditions données, soit : $-y \frac{dS}{dt} = \mu_m X$

Dans le cas des procédés à cellules immobilisées (biofiltre, lit bactérien), (paragraphe suivants), les constantes cinétiques, (V_{max}, K_s) sont modulées d'une part, par l'immobilisation elle-même (modifications chimiques, changements conformationnels, encombrement stérique) et d'autre part, par les phénomènes de partage et de diffusion; on détermine alors des constantes apparentes.

Pour de tels procédés, alimentés avec de faibles concentrations en substrats (ou faiblement solubles) la vitesse d'élimination est régie par la diffusion (régime contrôlé par la diffusion). Les processus d'élimination par voie biologique étant d'ordre zéro, tous les polluants gazeux biodégradables seront éliminés à 100% pour un temps de contact défini.

3.7.2.2. Composés xénobiotiques

La biodégradabilité d'un composé est un des paramètres essentiels de son élimination par voie biologique. Elle reflète souvent l'origine du composé. De manière générale, on considère que les composés biogéniques (ou naturels) sont facilement biodégradables alors que certains composés anthropogéniques, issus de l'activité humaine, et possédant des structures nouvelles (**xénobiotiques**) peuvent s'avérer difficilement biodégradables (composés récalcitrants) voire, impossible à dégrader par voie biologique (composés persistants)

Néanmoins, les travaux des microbiologistes, généticiens et biologistes moléculaires, au cours de ces dernières années ont largement progressé, permettant d'isoler, de sélectionner des populations ou groupes de populations (cultures mixtes, bactériennes pour l'essentiel) et / ou de construire des souches (par génie génétique ou introduction de plasmides) pouvant dégrader efficacement certains composés récalcitrants.

Pour la plupart, ces souches ont été isolées à partir de boues activées, de sols contaminés, voire directement de procédés de traitement de rejets gazeux. Les populations de microorganismes sont utilisées comme inoculum pour ensemercer l'unité de traitement afin d'assurer une élimination optimale du ou des composés tels par exemple des dérivés chlorés (dichlorométhane, dichloroéthane....) ou aromatiques (benzène, toluène, styrène...). A titre indicatif le tableau 1 illustre quelques exemples de dégradations de tels composés.

composés xénobiotiques	microorganismes	références
Dichlorométhane	Pseudomonas Hyphomicrobium Méthyllobacter	(9) (10),(11),(12) (12)
1,2-dichloroéthane	Xanthobacter	(13)
Chloroéthènes (DCE, TCE)	Méthanotrophes Alcaligenes Rhodococcus Propanotrophes Pseudomonas	(14) (15) (15) (16) (17)
Chlorure de vinyle	Mycobacterium	(18)
Epichlorohydrine	Pseudomonas	(19)
Chlorobenzène	Pseudomonas	(20), (21)
1,2-dichlorobenzène	Pseudomonas	(22)
1,3-dichlorobenzène	Pseudomonas	(23)
1,4-dichlorobenzène	Alcaligenes	(24)
Pentachlorophénol	Rhodococcus, Flavobacterium	(25) (26)
Pentachlorobiphényle	Pseudomonas	(27)
Dibenzofurane	Pseudomonas	(28)
2,4-dichlorophénoxyacétate	Alcaligenes Pseudomonas	(29) (30)
Hexachlorocyclohexane	Clostridium	(31)

Tableau 1: Exemples de dégradation (composés récalcitrants)

L'obtention et la mise en œuvre de tels outils catalytiques permettent d'envisager des perspectives intéressantes d'élimination de composés xénobiotiques.

3.7.3. LES PROCÉDES BIOLOGIQUES

Il existe trois groupes de procédés biologiques de traitement d'odeurs (*Tableau 2*). Ils sont distingués et identifiés selon le caractère mobile ou statique de la phase aqueuse d'une part, et de la biomasse d'autre part (cellules libres, ou immobilisées sur support).

Microflore (biomasse)	Phase aqueuse	
	mobile	statique
libre	laveur	-
immobilisée	lit bactérien	biofiltre

Tableau 2 : Les procédés biologiques d'après Ottengraf et Diks (42)

3.7.3.1. Biofiltre

• Les procédés

En Europe, l'un des premiers biofiltres fut installé à Genève-Villette (Suisse) en 1964 dans le but de traiter les gaz issus d'une unité de compostage (32). Le matériau filtrant était constitué de sol, suivant le modèle déjà mis en œuvre dans les années 50 aux USA (3,33,34) pour éliminer l' H_2S et des mercaptans.

L'année 1966 voit en Europe l'une des premières utilisations de compost comme médium filtrant pour la désodorisation de gaz issus d'une unité de compostage à Duisbourg (RFA) préfigurant ainsi une des caractéristiques du procédé de compostage "Beltsville" (1972).

L'utilisation de biofiltres dans le domaine agricole, l'élevage en particulier, s'est largement répandue par la suite: lieux de stockage, industries alimentaires, du tabac ...

Depuis la publication en 1972 (35) d'une des premières thèses sur le thème des biofiltres, et faisant état d'une approche expérimentale, le nombre d'unités de biofiltration (10 à 2000 m^2) n'a cessé d'augmenter particulièrement en RFA (plus de 100 filtres en activité en 1987) ou aux Pays-Bas.

Les figures 1 et 2 illustrent de telles unités de biofiltration où le passage de l'effluent gazeux est forcé au travers d'un matériau de remplissage au sein duquel des populations microbiennes propres au matériau ou bien exogènes (ensemencement) sont immobilisées et se développent.

De ce fait on considère que le matériau de remplissage particulaire est entouré d'un **biofilm** humide (*Fig 1*) constitué de microorganismes.

Les composés volatils et l'oxygène, présents dans l'effluent à traiter, sont transférés de la phase gazeuse vers le biofilm (absorption) où la dégradation microbienne a lieu (oxydation).

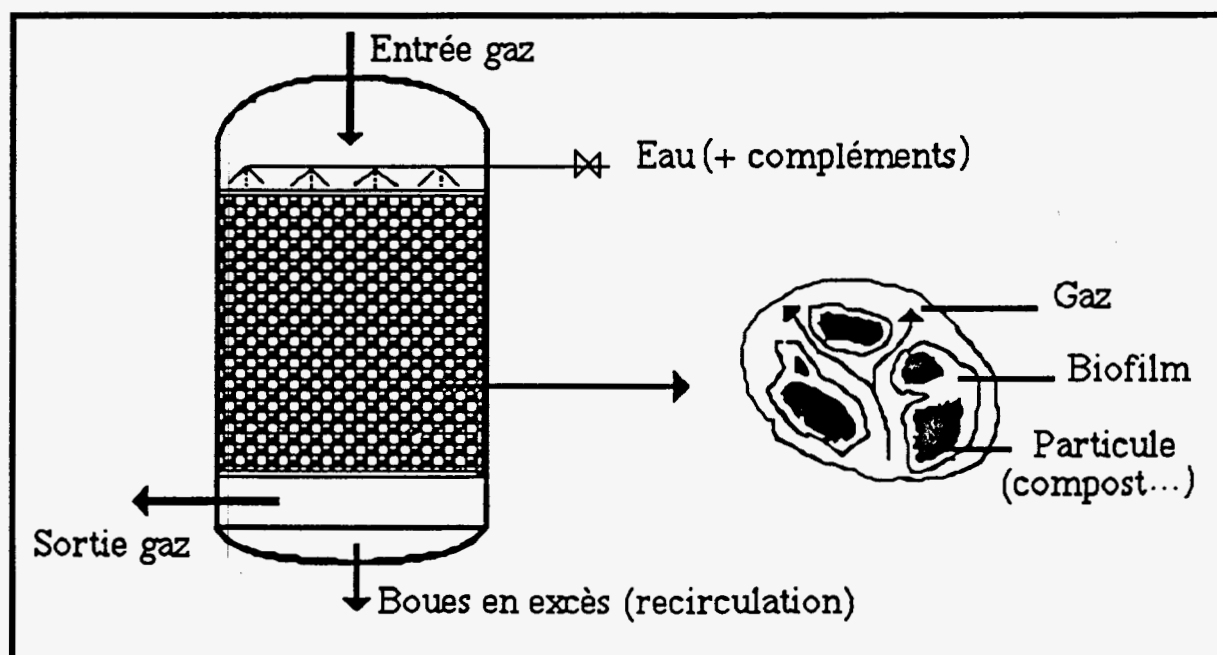


Figure 1 : Schéma d'un biofiltre (principe)

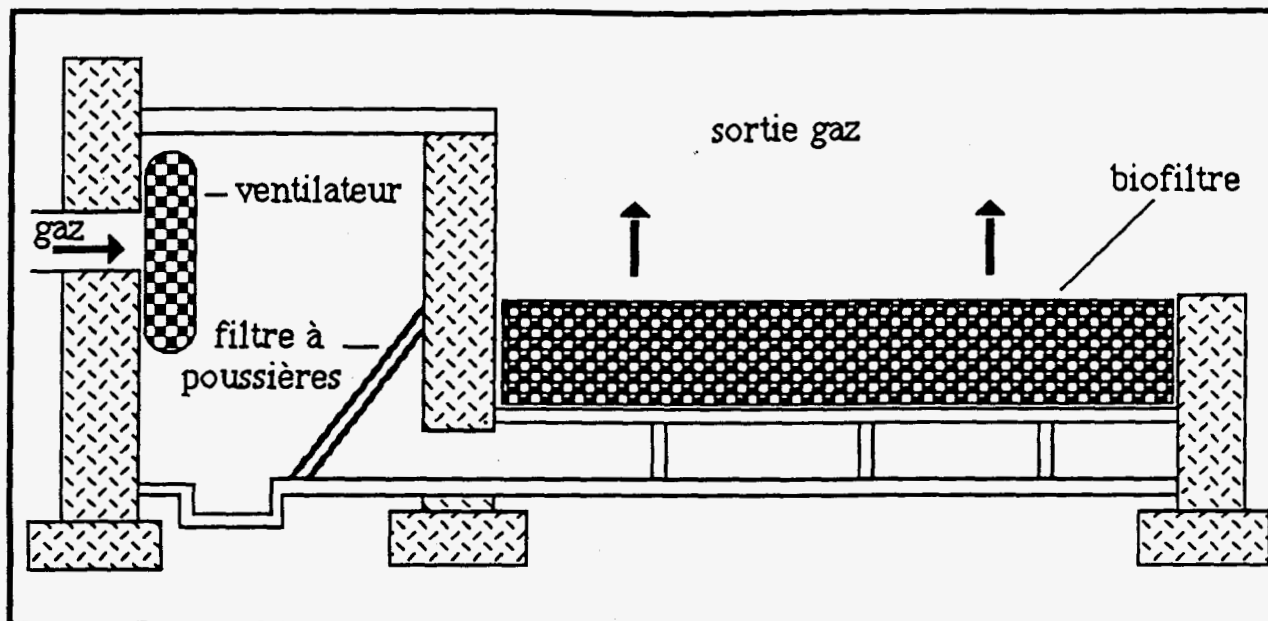


Figure 2 : Schéma d'un biofiltre "ouvert "

Les caractéristiques générales, au plan de l'ingénierie mise en œuvre sont les suivantes:

- canalisation des effluents gazeux
- refroidissement des gaz à traiter dont la température est supérieure à 40°C (voire 60°C pour certains cas, avec une population bactérienne adaptée) car la population microbienne est en général mésophile
- filtre pour les poussières ou aérosols lorsque leurs concentrations sont supérieures à 10-20 mg/m³
- fosse drainée (ou réacteur) permettant la distribution des gaz à l'aide de conduits perforés ou de caillebotis supportant le matériau filtrant et pouvant constituer un compartiment en pression (pressure chamber), (36)
- humidification du biofiltre; nécessaire pour l'activité biologique, il est indispensable d'entretenir 40 à 60 % d'humidité relative (H R minimale) ceci compte tenu de l'évaporation constante durant le fonctionnement du procédé. L'aspersion, (en général intermittente, voire asservie à un capteur) est réalisée à contre ou co-courant du flux gazeux; elle est, par ailleurs, contrôlée afin d'éviter les problèmes de tassement, ou de colmatage. Un progrès consiste à humidifier le gaz avant son passage sur le biofiltre (en prétraitement) à l'aide d'un humidificateur.

Depuis plusieurs années, l'intérêt se manifeste pour la conception de biofiltres couverts au détriment de systèmes "ouverts" (Fig 2), sujets à fluctuations (pluviométrie, température) permettant notamment un meilleur contrôle de la balance hydrique, et assurant une meilleure homogénéité en minimisant les phénomènes de tassement, de passages préférentiels et les rejets aqueux.

Dans ces conditions l'activité d'un biofiltre peut perdurer plusieurs années (3-5 ans).

- l'addition d'éléments nutritifs (carbone, phosphore, azote, soufre...), souvent couplée au système d'arrosage, permet dans certain cas d'améliorer l'efficacité du procédé (vitesse de dégradation): à titre d'exemple Don (37) montre que le rendement

- d'épuration d'un gaz à une vitesse de 100 m/h contenant du toluène (100 mg/m^3) passe de 50 % à 95 % en présence d'éléments nutritifs.
- la hauteur d'un biofiltre varie en général de 0,5 à 1 mètre; il s'agit là d'un compromis d'une part, entre l'efficacité nécessaire et d'autre part, le maintien de grandeurs physiques (perte de charge, colmatage) et économiques (surcoût énergétique) compatibles avec une installation industrielle.
 - de manière générale, les biofiltres occupent une surface au sol importante; si les premières installations fonctionnaient avec une charge surfacique de l'ordre de 5 à 10 m^3 de gaz/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$, ou (m/h), à l'heure actuelle les installations suite à l'amélioration des média filtrants en particulier, supportent des charges surfaciques plus importantes: 30-35 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (gaz issus du traitement d'eaux usées) voire beaucoup plus 100-150 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (sur unité de type fondoir) ceci avec une efficacité de 98% ou plus. Il faut également noter que des fluctuations au niveau de l'alimentation (charge) en polluants ne semblent pas perturber le biofiltre : bien dimensionné, il est plutôt insensible aux "pointes" de pollution ou bien à un arrêt momentané (pouvant durer plusieurs jours).
 - le support ou matériau filtrant, en général, est constitué de petites particules ($d < 10 \text{ mm}$), ayant une surface spécifique de 300 à $1000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (soit m^{-1}) ; il est décrit ci-après.

• Les matériaux filtrants

Le principe de fonctionnement d'un biofiltre est la retenue des composés chimiques sur un matériau servant à la fois de :

- support des microorganismes (réacteur à cellules immobilisées)
- source de microorganismes, plus ou moins importante selon l'origine du matériau (38-39)
- source d'éléments nutritifs

Après la mise en jeu de phénomènes d'absorption voire d'adsorption (41),(42),(55), les molécules odorantes sont transformées (oxydation) par les microorganismes.

Au sein du procédé, le médium filtrant constitue la partie importante; c'est aussi, souvent, la moins chère. Un matériau filtrant est de bonne qualité s'il répond aux critères suivants :

- riche en microorganismes (populations hétérogènes)
- présente une importante surface spécifique de contact pour favoriser les transferts de matière gaz / liquide / solide et la croissance du biofilm
- apporte certains éléments fondamentaux pour la vie des microorganismes (azote, phosphore, potassium, soufre, oligo-éléments...)
- bonne rétention d'eau: l'eau est en effet indispensable pour permettre le transfert gaz / liquide (absorption) et la croissance des microorganismes
- permet l'existence de phénomènes d'adsorption: transferts gaz / solide; liquide / solide (biofilm)
- permet le passage des gaz, de liquide et possède un comportement hydrodynamique adapté, sans passages préférentiels ni perte de charge trop élevée (quelques cm d'eau)
- enfin il doit représenter un investissement faible

Les média filtrants les plus couramment utilisés au plan industriel sont: le sol (terre), et plus sûrement depuis 25 ans (1,2,3,32,33,34) les tourbes, ou mélanges à base de tourbes (40), les composts (à partir d'ordures ménagères, déchets végétaux, écorces...) voire plus récemment (38) les boues issues du traitement des eaux urbaines ou industrielles.

De nombreuses études visent à améliorer les écoulements des fluides (gaz et liquides) au sein de ces média (comportement hydrodynamique). Il s'agit en particulier d'assurer d'une part une bonne distribution de l'air (absence de passages préférentiels, de zones anaérobies) et d'autre part d'assurer une humidité relative homogène et compatible avec un bon fonctionnement (limiter le tassement qui induit une perte de charge voire le colmatage). Dans ce contexte de l'étude du comportement mécanique du filtre, l'addition d'agents de "structure" comme, des copeaux, des écorces broyées, plus ou moins finement, des déchets végétaux, (feuilles, branches, pailles...) des particules de laves volcaniques ou de polystyrène permet, dans la plupart des cas, d'améliorer les performances du biofiltre comme le montre la figure 3. L'addition de tels agents structurants permet de diminuer la perte de charge.

A ce propos, d'autres auteurs (37) ont montré que l'addition d'écorces, diminuant la résistance à l'air du lit permet de diminuer de 50% le coût du traitement et de réduire d'un tiers la surface du biofiltre en travaillant avec de plus fortes charges (300 m³/m².h).

En tout état de cause, les biofiltres, comme du reste les autres procédés biologiques, sont en général plutôt inadaptés aux gaz fortement chargés, ceux dont la concentration en polluants excède 4 - 5 g/m³.

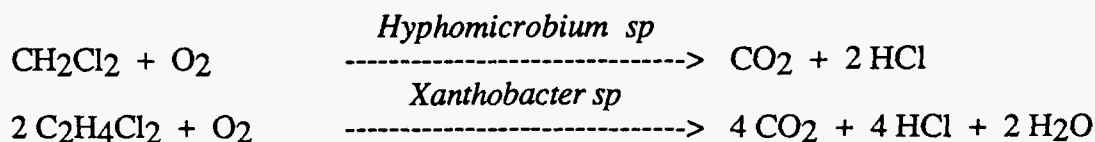
Enfin il faut signaler qu'une fois le biofiltre saturé, la plupart des média filtrants (compost, boues, tourbe ou mélanges à base de déchets végétaux) est susceptible d'être valorisée en agriculture sous forme d'amendement.

• Paramètres physiques

pH

Les biofiltres se montrent en général d'une utilisation plus souple comparée aux laveurs biologiques ou lits bactériens, (paragraphes 4.7.3.2. et 4.7.3.3.).

Cependant, leur utilisation peut s'avérer plus complexe lorsqu'il s'agit de traiter des composés à forte concentration, dont le(s) produit(s) d'oxydation est (sont) acide(s) : cas par exemple, de l'oxydation du sulfure d'hydrogène (39-40) ou de la dégradation de dérivés halogénés (42); ceci peut être illustré par la dégradation du dichlorométhane ou du dichloroéthane conduisant à une acidification rapide par production d'HCl selon:



L'activité biologique se trouve fortement inhibée car dépendante du pH. Dans ce cas l'addition de 40 kg de CaCO₃ par m³ de matériau filtrant (1 m de hauteur) permettrait de traiter durant un an, un gaz (100 m/h) contenant 40 mg/m³ de dichlorométhane (42). Malgré tout, un élément doit être pris en compte: l'éventuelle inhibition du produit de la neutralisation (la fraction soluble du CaCl₂) sur la microflore du biofiltre. A titre d'exemple, 5 à 10 kg de CaCl₂/m³ de biofiltre constituent une concentration inhibitrice.

Dans le cas de faibles concentrations, la neutralisation *in situ*, et ceci durant plusieurs années, est possible en additionnant au matériau filtrant des produits alcalins comme les carbonates : calcaires, maërl.(40)...., ou des phosphates.

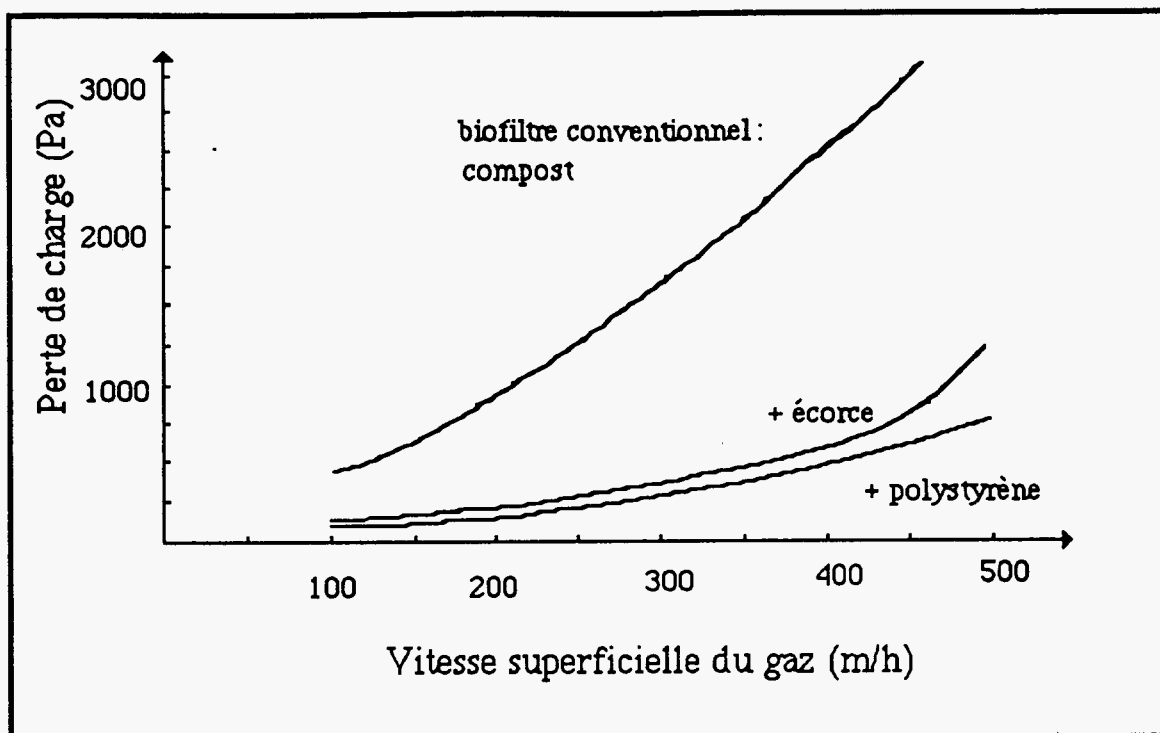


Figure 3 : Influence d'agents de structure sur la perte de charge du biofiltre

charge ($\approx 500 \text{ Pa/m}$) du biofiltre et conséquemment, de travailler avec de plus fortes charges surfaciques ($500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$).

Température

Un autre paramètre, influençant l'activité microbienne, est la température à laquelle a lieu le traitement du gaz. Nous avons vu qu'il peut être nécessaire de refroidir les gaz afin de permettre l'oxydation des molécules par les populations mésophiles (15 à 40°C).

Le tableau 3 suivant, montre, à titre d'exemple, l'incidence de la température sur un biofiltre alimenté avec des vapeurs de styrène d'après (42).

vitesse du gaz (m/h)	température (°C)	capacité d'élimination (g/m ³ .h)
50	20	46
50	27	82
100	20	42
100	27	80

Tableau 3 : Incidence de la température sur la capacité d'élimination d'un biofiltre.

D'après ces données, et utilisant la formule d'Arrhénius, l'énergie d'activation, E_a , correspondant à l'oxydation du substrat (styrène) en CO_2 peut être estimée à 70 kJ / mol ; soit une valeur classique d'énergie lors d'une oxydation biologique de substrat. Une telle influence de la température n'est toutefois pas confirmée au niveau d'un lit bactérien.

• Aspects cinétiques

Les expériences de laboratoire réalisées avec des suspensions de microorganismes (cultures en milieu liquide) permettent de déterminer des constantes de vitesses de dégradation propres (microcinétiques). Dans le cas de procédé de purification type biofiltre ou lit bactérien la biomasse se trouve concentrée voire aggrégée sur un support (biofilm).

Les phénomènes cinétiques sont alors substantiellement différents de ceux qui prévalent lors de cultures des microorganismes en phase aqueuse (cellules libres). Autour du biofilm se créent des gradients de concentration (substrats et produits). Ces gradients sont la résultante d'une part, du transport interne de masse (substrats organiques ou minéraux, O₂) par diffusion, et d'autre part de la consommation de ces substrats suite à l'avancement des réactions, ainsi que de l'apparition de produits.

Dans ces conditions, la vitesse de réaction peut varier au sein du biofilm compte tenu des contraintes liées en particulier à la diffusion des molécules et à leurs transformations.

Ces vitesses de réactions par ailleurs, ne sont pas identiques en surface ou en profondeur du biofilm; certaines couches du biofilm, les plus profondes, peuvent correspondre à des zones non réactives (paragraphe suivant).

Si donc l'approche cinétique type Monod est utilisée pour décrire les phénomènes, il évident que les contraintes diffusionnelles affectent la vitesse de réaction. La modélisation des phénomènes physico-chimiques qui ont lieu au sein du biofilm (absorption dans le biofilm humide suivi par la dégradation biologique des molécules) implique les postulats suivants (43):

- 1- Au sein du biofilm, les substrats sont transportés par diffusion; à titre indicatif on considère que l'oxygène pénètre d'environ 100 à 200 μm dans le biofilm dont l'épaisseur totale peut atteindre plusieurs millimètres.
- 2- L'épaisseur du biofilm est petite comparée au diamètre moyen des particules de remplissage (tourbe, compost...)
- 3- Les phénomènes microcinétiques au sein du biofilm obéissent à des réactions d'ordre zéro. Cela a été vérifié (43) avec tous les composés étudiés : alcools, cétones, esters, aromatiques,...et ceci jusqu'à des concentrations en substrats faibles. Si donc en théorie, pour être dans des conditions où $\mu = \mu_m$ on considère que la valeur de K_s (constante de Michaelis-Menten) doit être faible par rapport à la concentration en substrat (soit pour $S > 5K_s$), en pratique, les résultats de Diks et Ottengraf (43) montrent que pour $S = K$ l'ordre de la réaction globale d'élimination au niveau du dit biofilm, peut être approximé à zéro.

• Applications et aspects financiers

1- Applications industrielles

Aujourd'hui les biofiltres sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels. Le tableau 4 suivant illustre quelques applications des biofiltres pour traiter des gaz contenant différents mélanges de composés organiques ou minéraux.

A la vue de ces résultats, une efficacité importante de l'épuration (>90%) peut être obtenue au niveau industriel.

Applications	Débit (m ³ /h)	Composés	Nombre d'étages	Tps (s) de contact	Efficacité %
prod. gélatine	35000	odeur /n.s (1)	1	12-21	70-93
prod. chocolat	10000	odeur /n s (1)	2	22	99
poissonnerie	40000	230 mg C	1	20	50-90
industrie tabac	30000	NH ₃ (1,5mg) nicotine (3mg)	2	14	95
traitement eaux	10000	H ₂ S(10mg) acétone (8mg)	2	29	90-95
parfums	25400	10 ⁵ u.o	2	22	98
prod. peinture	11700	solv (1,8g)	2	38	90
indust pharma.	75000	solv. chlorés (0,4g)	3	108	80
prod.film photo	140000	solv (0,4g)	2	30	75
prod.céramique	30000	éthanol	1	8	98
fonderie	40000	benzène(9mg)	1	30	80

Tableau 4 : Exemples d'applications industrielles de la biofiltration d'après (11) : (1) non spécifié

2- Aspects financiers

Le coût d'un procédé de traitement par biofiltration dépend d'une part du volume de gaz à traiter, de la nature et de la concentration en polluants et d'autre part d'éléments périphériques: canalisations (gaz), filtres, échangeur, humidificateur, ventilateur...

Les tableaux 5 et 6 suivants, indiquent les coûts en matière d'investissement et de fonctionnement des différents procédés de traitement de gaz existant au plan industriel.

Procédés	Investissement DM/(m ³ /h)	Fonctionnement DM/1000m ³	Coût Total DM/1000m ³	Coût Total Dfl/1000m ³
Références	Maurer (1979) (1)	Maurer (1979) (1)	Jager & Jager (1978) (2)	Lith (1990) (3)
Incinération thermique	12-14	1,4-1,7	9,1 (coût combustible seulement)	7-9 (50% d'énergie récupérée)
Incinération catalytique	14-16	1,3-1,5	-	6-8
Adsorption	5-20	0,5-1	1,5 (incluant la régénération par incinération)	14-18 (incluant la régénération par vapeur)
Absorption	8-10	0,8-1	4,2 (chlorure)	-
Ozonation	6-8	0,4-0,6	4,2	-
Biofiltre :				
• ouvert	3-10	0,3-0,5	0,6	-
• fermé				0,5-3

Tableau 5 : Procédés de traitement de gaz, coûts d'investissement et de fonctionnement.

(1) Applications non spécifiées; (2) Unité de compostage, prix 1974; (3) gaz (10000 m³/h) contenant 100 à 2000 mg de composés organiques volatils par m³. DM = mark allemand, Dfl = florin néerlandais, d'après (11).

Procédés	Oxydation thermique	Oxydation catalytique	Prélavage et adsorption (charbon actif)	Lavage chimique à 2 étages	Prélavage et biofiltration
Investissement (kF)	760	805	175	322	300
Exploitation coût annuel * (kF)	521	500	730	280	110
Efficacité sur ammoniac (%)	98	92	celle du prélavage	>99	>95
Efficacité sur amines (%)	99,9	98	" "	>99	>99
Efficacité sur produits soufrés (%)	99	96 à 99	98	95 à 99	>99

Tableau 6 : Procédés de traitement de gaz issus de cuiseurs (après condenseurs) d'une usine d'équarissage ; coûts comparés.

Effluent (10 000 m³/h à 35°C) contenant 200 mg/m³ d'ammoniac, 150 mg/m³ d'H₂S et 20 mg/m³ d'amines. * Y compris l'amortissement sur un an, d'après (54).

A titre d'exemple, concernant le procédé de biofiltration BIOTON (Clairtech b.v.), le coût d'investissement peut être déterminé comme suit:

a) détermination du volume du biofiltre

- si la concentration en composés organiques volatils (c.o.v.) C < 1g/m³ alors:
le volume (filtre) = Q (débit) * 0,0155 * C^{0,5}

- si la concentration en c.o.v. est: 1g/m³ < C < 4g/m³ alors:
le volume (filtre) = Q * 0,01 * (C + $\frac{2 - 0,1 * C}{1 + 0,224 * C^{0,5}}$ + 1)

b) le coût d'investissement (florin néerlandais)

- si le volume V du filtre est < 200m³ alors le coût = 51315 * V^{0,49}

- si le volume V du filtre est > 200m³ alors le coût = 231254 + (2285 * V)

L'installation, l'instrumentation, le matériau filtrant (le matériau lui-même, son changement et son traitement) et le prétraitement (humidification) sont inclus dans ce coût.

La taille du biofiltre dépend de la concentration en polluants du gaz (entrée et sortie) et de leur biodégradabilité; le temps de séjour varie entre 5 et 75 secondes. Le coût de maintenance représente 2% du coût d'investissement et la durée de vie du procédé est 10 ans; celle du matériau filtrant, 3 ans.

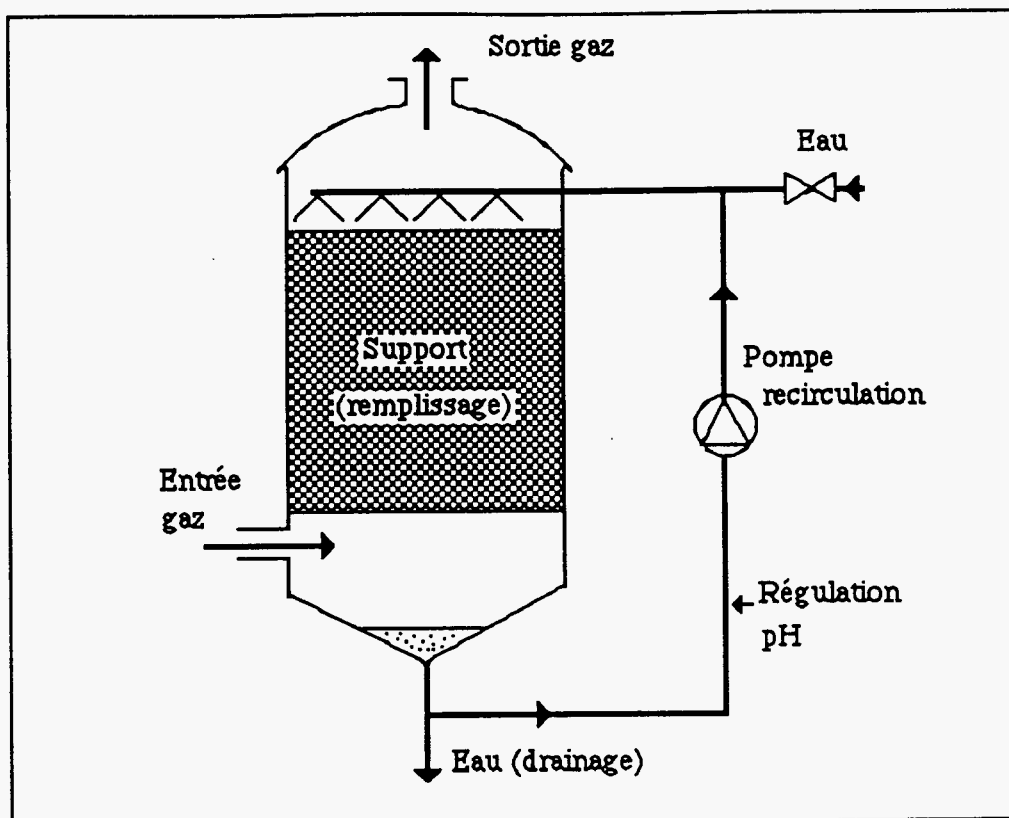


Figure 4 : Schéma d'un lit bactérien en traitement de gaz.

3.7.3.2 Lit bactérien

• Les procédés

Le lit bactérien (ou trickling filter) que se soit en traitement d'eau ou traitement de gaz consiste à utiliser la propriété de nombreux microorganismes à s'adsorber, se fixer sur des éléments de remplissage (anneaux de Raschig...) ou sur des supports structurés (plaques ondulées...) constituées de matériaux inertes (verres, plastiques, céramiques...). Après encroûtement, le biofilm se développe à la surface du support (*Fig 4*) au cours du fonctionnement du lit et peut atteindre plusieurs millimètres.

Le lit bactérien se différencie du laveur biologique par le fait que les deux étapes absorption (des polluants) et régénération (dégradation biologique) interviennent simultanément au sein du lit où sont immobilisés les microorganismes (*Tableau 2*).

La surface spécifique, (aire de contact par unité de volume), étant plutôt faible, 100-300 m²/m³, un grand volume vide est laissé au passage du gaz, diminuant ainsi les risques d'apparition de perte de charge importante ou de colmatage liés au développement du biofilm.

Néanmoins, le risque existe. Il est fonction en particulier de la nature du biofilm (au plan qualitatif et quantitatif), elle même dépendante de la charge appliquée (en général comprise entre 0,08 et 1 kg de carbone/m³ de lit et par jour) et de la nature des composés organiques à éliminer.

A titre d'exemple, l'élimination du 1,2-dichloroéthane et du toluène conduit après quelques semaines au colmatage du lit par formation d'un réseau (entre éléments de remplissage) constitué de longs filaments bactériens (biomasse filamenteuse). Dans des conditions semblables, l'élimination du dichlorométhane, ne pose pas du tout le même problème.

Un dispositif d'arrosage continu avec de l'eau, distribuée de façon homogène et contenant les compléments nutritifs indispensables (N,P,...) permet d'assurer une constante humidité sur toute la section du lit, créant ainsi un film liquide autour des éléments de remplissage et du biofilm (*Fig 4*).

Le gaz à traiter est filtré (si la concentration en poussières est > 10-20 mg/m³) puis, son passage est forcé au travers du lit à contre ou co-courant de la phase aqueuse. L'oxygène et les composés volatils solubles dans l'eau sont transférés dans la phase liquide (absorption) puis vers le biofilm où ils sont oxydés par le métabolisme aérobie des microorganismes. Dans ces conditions, ont lieu en permanence le **transfert de masse** (G/L) ainsi que le **transport** jusqu'au biofilm qui, lui, assure une constante diminution de la concentration en composés organiques de la phase liquide (driving force).

En général, une décantation simple (gravité) permet d'éliminer les boues (**biomasse**) qui se forment et qui sont en partie entraînées par la phase liquide circulante dont la concentration peut atteindre 10 g/l (matières sèches). Cette phase liquide permet non seulement d'entretenir une humidité relative nécessaire à la vie de la biomasse (et de compenser l'évaporation) mais aussi d'apporter d'une part, les éléments nutritifs nécessaires aux microorganismes et d'autre part, de procéder à la régulation du pH au sein du lit, voire, de la température du lit (53) (par chauffage de l'eau lorsque cela peut être nécessaire en hiver particulièrement).

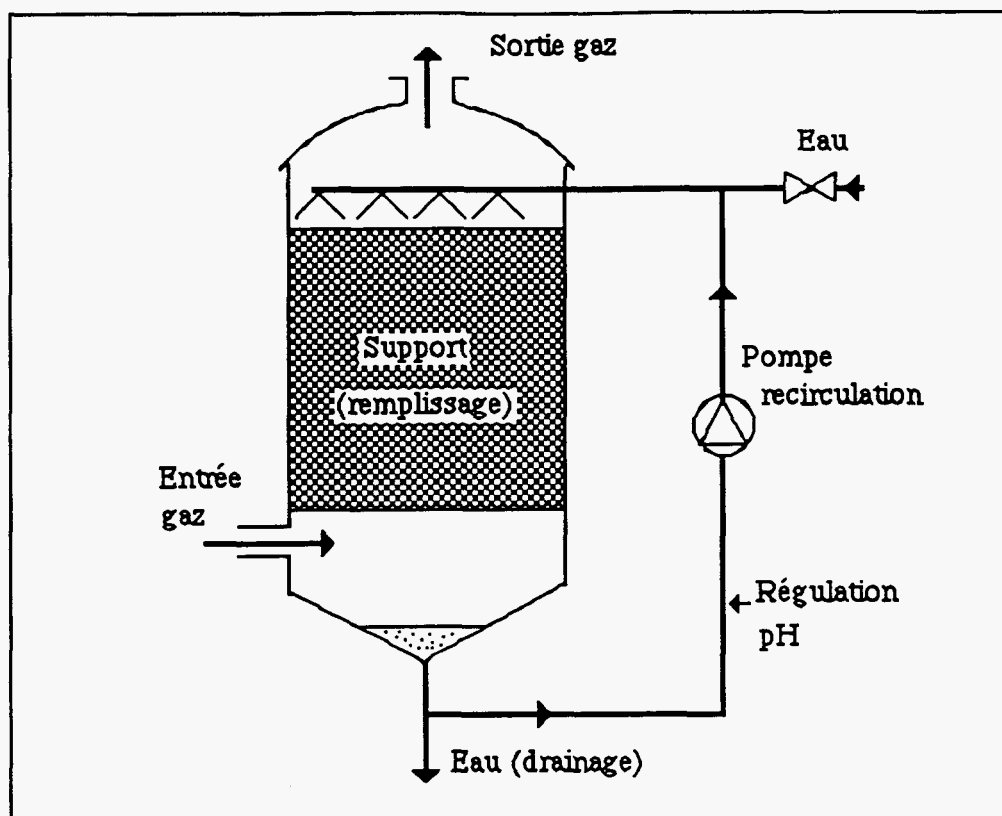


Figure 4 : Schéma d'un lit bactérien en traitement de gaz.

• Paramètres physiques

pH

L'élimination d'un composé halogéné tel le dichlorométhane s'accompagne d'une acidification (pH --> 4) de la phase aqueuse du fait de la production d'acide (HCl) concomitante à la dégradation, pouvant provoquer une inhibition quasi totale des microorganismes. Ceci est corroboré par la mesure du pH à l'aide d'une micro-électrode (41) à l'interface et à l'intérieur du biofilm ; elle met en évidence une acidification rapide et profonde dans le biofilm, d'où la nécessaire neutralisation de la phase aqueuse.

Cette grande facilité qu'offre le lit bactérien non seulement de réguler le pH (ex: NaOH) mais aussi d'éliminer en continu les produits de la neutralisation (ex: NaCl) pouvant inhiber le biofilm est un avantage du lit bactérien par rapport au biofiltre notamment pour traiter des gaz contenant des composés hydrocarbonés halogénés, de l'ammoniac, ou de l'hydrogène sulfuré...

Température

L'incidence de la température sur l'activité globale du lit ne semble pas établie; du moins, dans le cas de l'élimination de dichlorométhane, les performances du lit sont identiques à 20°C ou à 30°C (42). La moins bonne solubilité du composé à 30°C et un transfert de masse moins favorisé que dans le cas du biofiltre (plus faible surface spécifique du remplissage) constitueraient des explications à ce phénomène.

• Aspects cinétiques - modélisation

L'utilisation de lits bactériens n'est pas limitée aux composés hydrophiles, mais applicable également au traitement de composés moyennement solubles tel, par exemple le dichlorométhane.

Dans ce cas, c'est encore l'oxydation biologique qui s'avère être l'étape limitante du procédé par rapport au transfert gaz-liquide; malgré tout, un haut degré d'élimination peut être obtenu, ceci indépendamment du sens du flux gazeux (à co ou contre courant du flux liquide), mais dépendant en premier lieu du temps superficiel de contact.

A titre d'exemple, la capacité maximale d'élimination du dichlorométhane est de l'ordre de $157 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ dans les conditions suivantes:

- pilote: hauteur 270 cm, diamètre 40 cm
- vitesse superficielle du gaz: 80 à 320 m/h
- concentration critique dans la phase liquide: 45 g/m^3
- vitesse superficielle du liquide: 3,6 m/h

Les résultats obtenus avec cette unité ont permis à leurs auteurs (11), de développer, récemment, un modèle simplifié (Uniform Concentration Model) permettant de prévoir les performances du lit.

• Applications

Les applications industrielles des lits bactériens en désodorisation sont encore peu nombreuses; toutefois, les études pilotes déjà réalisées ou en cours laissent présager des applications futures intéressantes (11) (50) et (51) pour des composés (en faible concentration) présentant une bonne ou moyenne solubilité dans l'eau, ou donnant lieu à la formation de produits acides.

3.7.3.3 Laveurs biologiques

• Les Procédés

Le lavage biologique de gaz présente des analogies certaines dans son principe, avec le lavage chimique. Quelles que soient les variantes, en effet, les biolaveurs (bioscrubbers) et les laveurs chimiques possèdent une étape analogue, ou phase d'absorption mettant en jeu des paramètres classiques tels que: solubilité, coefficient de partage, température, pH, temps de contact...

Parmi les différents laveurs chimiques (absorption humide), les laveurs dits à pulvérisation, présentent le plus d'analogies avec les laveurs biologiques. Comme le montre la figure, ces derniers peuvent inclure ou non un système de refroidissement, ou de prélavage de gaz, présenter un ou plusieurs étages selon la nature et les caractéristiques du gaz à traiter. Il est à noter qu'un prélavage (pouvant générer dans certains cas des condensats fortement visqueux) peut permettre d'abattre plus de 50% de l'odeur. En outre, le prélavage peut s'accompagner d'un traitement chimique afin d'éliminer dans un mélange gazeux à traiter un composé indésirable pour le lavage biologique à proprement dit réalisé à l'aide de boues activées adaptées; cas de l'élimination de NH_3 par lavage à l'acide sulfurique par exemple (44).

Du point de vue du procédé, le lavage biologique représente deux étapes distinctes.

L'étape d'**absorption**, au cours de laquelle a lieu le transfert de masse entre la phase gazeuse et la phase liquide (eau).

L'étape de **régénération** au cours de laquelle les composés absorbés et solubles dans l'eau sont dégradés par oxydation biologique au niveau d'un bassin d'activation générant ainsi de la biomasse et/ou du CO₂.

Un procédé optimisé fera en sorte que les phénomènes physico-chimique (absorption) et biologique (oxydation) soient contrôlés en particulier au plan des cinétiques des réactions.

• Aspects cinétiques

La phase d'absorption des composés volatils hydrosolubles, et plus précisément leurs cinétiques de transfert de masse, sont régies par leur solubilité spécifique en phase aqueuse, établissant un équilibre entre phases. Cet équilibre, dans le cas de faibles concentrations est décrit par la loi de Henry. Concrètement cela signifie qu'une concentration constamment faible du soluté dans la phase aqueuse (entretenu par la dégradation biologique) est nécessaire pour obtenir de bonnes performances d'absorption du système.

La phase de régénération, elle, sera efficace à partir du moment où certaines conditions sont remplies:

- les solutés doivent être biodégradables. Pour des composés moyennement biodégradables cela nécessite l'adaptation ou la sélection d'une ou plusieurs populations microbiennes aptes à dégrader selon des cinétiques compatibles avec leur mise en œuvre industrielle.

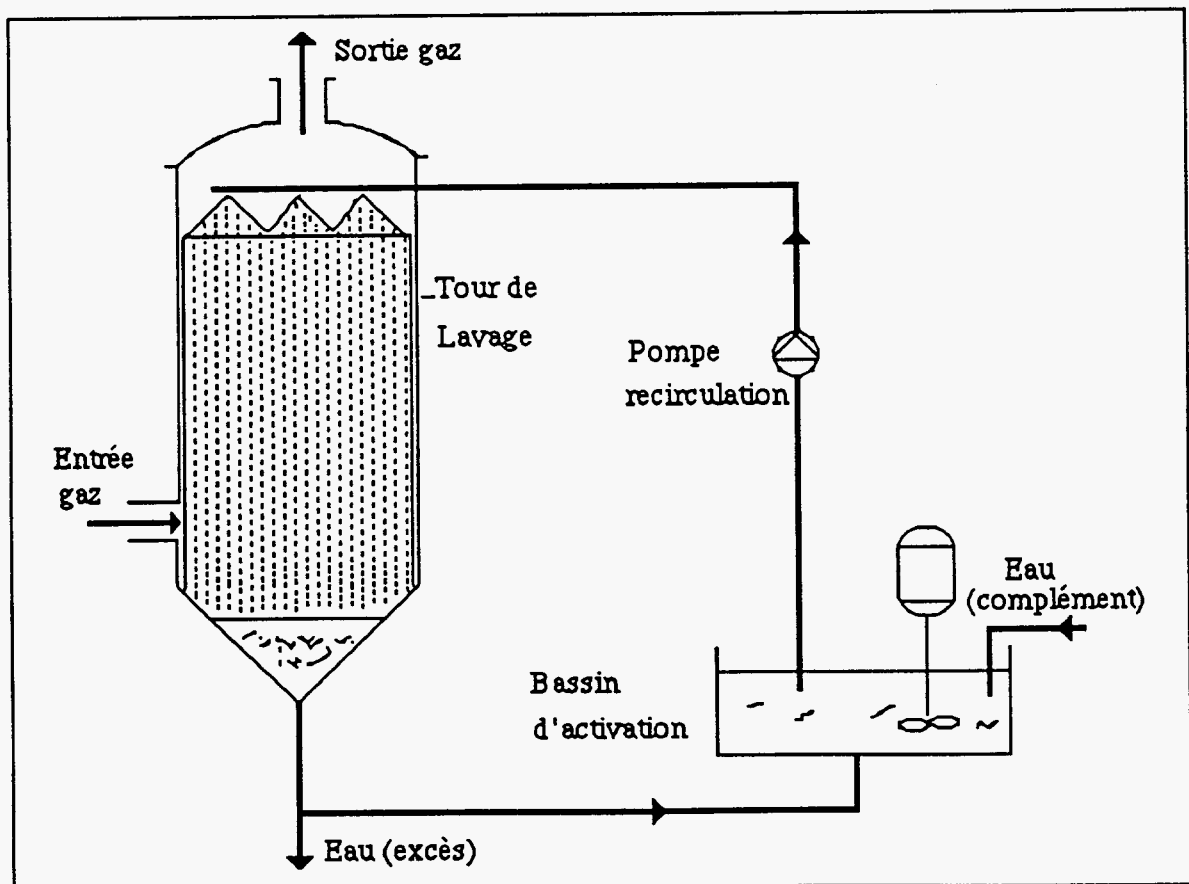


Figure 5 : Schéma d'un laveur biologique.

- les paramètres physiques ou physico-chimiques, pH, température, O₂ dissous, C/N/P/S, oligoéléments, accumulation éventuelle de produit(s) plus ou moins toxique(s), doivent s'inscrire dans des gammes de valeurs spécifiques permettant une bonne oxydation des polluants.

La phase de régénération a lieu dans un réservoir (Fig 5) contenant la biomasse (boues activées) en suspension. Après la régénération les boues activées sont renvoyées au sommet de la tour de lavage pour absorber à nouveau des solutés et commencer leur dégradation. La concentration en boues est de l'ordre de 0,2 à 1 kg/m³ (M.E.S.), ne dépassant pas en tout cas 10 kg/m³ (gestion du procédé favorisée).

La vitesse superficielle du gaz en général varie de 0,5 à 1 m/s et une efficacité importante (90%) peut être obtenue pour des composés dont la valeur du coefficient de Henry (H) est relativement faible (< 1250 Pa.m³/mol); l'énergie nécessaire à la recirculation du liquide devenant élevée pour des produits à coefficient plus important.

Pour des composés de ce type, une solution récente (45) consiste à ajouter à la phase aqueuse un solvant organique à haut point d'ébullition et très peu hydrosoluble (type silicone ou phtalate) et présentant une faible valeur de coefficient de Henry pour les composés devant être absorbés. De plus il ne doit être ni toxique vis à vis des microorganismes, ni biodégradable. Dans ces conditions, le transfert de masse (G/L) est favorisé (plus forte capacité d'absorption du solvant) au sein de la tour de lavage permettant de concentrer les polluants gazeux d'un facteur 100 à 1000 par rapport à la phase aqueuse seule. Le transfert, solvant / eau, se fait au niveau de l'unité de régénération pour assurer la dégradation biologique. De ce fait de fortes concentrations en polluants-substrats peuvent être obtenues dans la phase aqueuse sans effets toxiques sur la biomasse.

• Applications

Un faible nombre d'applications à grande échelle est connu à l'heure actuelle, néanmoins voici quelques exemples dont fait état la littérature.

a) Gaz issus de fours (fabrication d'abrasifs) d'après Schröder (44)

- débit: 36000 m³/h
- température: 550°C; 40°C après échangeur et élimination des poussières
- caractéristiques du gaz:

gaz (mg/m ³)	entrée	sortie	efficacité
ammoniac	160	0,05	>99
formaldéhyde	3,5	0,5	86
phénol	5	0,3	94
DCO	22	5,3	76
Odeur (unité d')	500	45	91

- 1° étage: laveur chimique
- 2° étage: laveur biologique (tour) avec boues activées, régulation de pH (NaOH), addition de phosphates.
- latence au démarrage de l'unité industrielle: 6 semaines
- durée de vie de l'unité: plusieurs années

b) Gaz issus d'une unité de peinture d'après Schippert (46)

- débit: 35000 à 60000 Nm³/h à 160°C
- charge: solvant = 30 à 45 kg/h; résine = 2 kg/h
- échangeur thermique
- 2 laveurs biologiques en série; tours: hauteur = 6m, diamètre = 4m
- vitesse de recirculation du liquide = 0,5 m³/h
- bassin d'activation commun pour les 2 laveurs = 280 m³
- additions de: disodium hydrogénophosphate (0,15 kg/h), ammonium sulphate (0,6 kg/h), agent anti-mousse (0,1 kg/h)
- caractéristiques du gaz :

solvants (mg/m ³)	entrée	sortie
butyl glycol	885	0,3
n-butanol	326	0,5
éthyl glycol	102	0,1
isobutanol	2,2	0,16
xylène	1,9	1,3
méthyl-iso-butyl-cétone	1,3	0,5

D'autres applications sont décrites comme étant des réussites, pour traiter des gaz issus de :

- fours (fonderies): 120 000 à 180 000 m³/h; fours d'émaillage (47) (48)
- du conditionnement de produits alimentaires: 25 000 m³/h
- atelier d'impression (49)
- traitement d'eau (49)

3.7.4 CONCLUSION

Les années passées ont vu l'extension des procédés biologiques (et en particulier la biofiltration) au traitement et à l'élimination de composés xénobiotiques volatils issus des divers secteurs industriels. Le savoir-faire acquis depuis une vingtaine d'années fait de la biofiltration un procédé attractif parmi les autres procédés biologiques.

Néanmoins, les laveurs et les lits bactériens présentent des potentialités à venir prometteuses pour des applications telles que l'élimination de composés halogénés, l'ammoniac (50-52) ...

Comme tous les procédés, les systèmes biologiques font l'objet d'évolution et ceci, dans plusieurs voies :

- Recherche de nouvelles capacités d'élimination par adaptation ou sélection naturelle ou dirigée (mutagenèse, génie génétique) chez les microorganismes (en monocultures, ou cultures mixtes) afin d'éliminer des composés xénobiotiques récalcitrants.
- Mise en oeuvre industrielle évoluant vers des procédés de plus en plus compacts, autonomes (capteurs, régulations) ou mixtes (biologique et physico-chimique) : biofiltre + charbon actif (10), lit bactérien + lavage chimique (53).

Pour conclure ce chapitre destiné à la présentation des procédés biologiques, et à la vue de leurs caractéristiques techniques et économiques, on peut affirmer, en particulier pour les biofiltres, qu'ils constituent au jour d'aujourd'hui une alternative dans de nombreux cas, aux procédés physico-chimiques et thermiques.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) **Bach H.** (1923), *Gesundheits-Ingenieur*, 46, 38, 370-376
- 2) **Prüss M., Blank H.** (1941), German Patent 710954 Appl. 1934
- 3) **Pomeroy R.** (1957), Deodorizing gaz streams by the use of microbial growths, US Patent 2,793,096
- 4) **Sublette K.L., Sylvester N.D.** (1987), Oxydation of Hydrogen Sulfide by *Thiobacillus denitrificans*: Desulfurization of natural gas, *Biotechnol. Bioeng.*, 29, 249-257
- 5) **Cork D.J. Garunas R.** (1982), The effect of a continuous H₂S-N₂-CO₂H₂ gas purge on the growth of *Chlorobium thiosulfatophilum*: Application to the fossil fuel acid gas removal, "Paper presented at the Annual Meeting of the American Society for Microbiology, Atlanta, GA, march
- 6) **Kobayashi H.A., Stenstrom M., Mah R.A.** (1983), Use of photosynthetic bacteria for hydrogen sulphide removal from anaerobic waste treatment effluent, *Water Res.*, 17, 5, 579-587
- 7) **Depeyre D., Isambert A., Creti C., Laulan P. Y., Zografakis N.** (1987), Fermentation méthanique et désulfuration de biogaz, un exemple de combinaison de deux opérations en biotechnologie, *L'actualité chimique*, 8, 295-299
- 8) **Fewson C.A.** (1991), Factors affecting the degradation of hazardous recalcitrant materials, *Int. Symp. Environ. Biotech.*, 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 173-183
- 9) **Brunner W., Straub D., Leisinger T.** (1980), Bacterial degradation of dichloromethane, *Appl. Environ. Microbiol.*, 40, 950-958
- 10) **Ottengraf S.P.P., Meesters J.J.P., van den Oever A.H.C., Rozema H.R.** (1986), Biological elimination of volatil xenobiotic compounds in biofilters, *Bioprocess Eng.*, 1, 61-69
- 11) **Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P.** (1991), Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter, *Bioprocess Eng.*, 6, 93-99, part I & 131-140, part II
- 12) **Scholtz R., Wackett L.P., Egli C., Cook A.M., Leisinger T.** (1988), Dichloromethane dehalogenase with improved catalytic activity isolated from a fast-growing dichloromethane-utilising bacterium *J. Bacteriol.*, 170, 5698-5704
- 13) **Janssen D., Scheper A., Dijkhuizen L., Witholt B.** (1985), Degradation of halogenated aliphatic compound by *Xanthobacter autotrophicus*, *Appl. Environ. Microbiol.*, 163, 635-639
- 14) **Fogel M.M., Taddeo A.R., Fogel S.** (1986), Biodegradation of chlorinated ethenes by a methane utilizing mixed culture, *Appl. Environ. Microbiol.*, 51, 720-724
- 15) **Ewers J., Clemens W., Knackmuss H.J.** (1991), Biodegradation of chloroethenes using isoprene as co-substrate, *Int. Symp. Environ. Biotech.*, 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 77-89

- 16) **Wackett L.P., Brusseau G.A., Householder S.R., Hanson R.S.** (1989), Survey of microbial oxygenase: trichloroethylene degradation by propane oxidizing bacteria, *Appl. Environ. Microbiol.*, 55, 2960-2964
- 17) **Folsom B.R., Chapman P.G., Pritchard P.H.** (1990), Phenol and trichloroethylene degradation by *Pseudomonas cepacia*, *Appl. Environ. Microbiol.*, 56, 1279-1285
- 18) **Hartmans S. & Coll.**, (1985), *Biotechnol. Letters*, 7, 383-388
- 19) **Wijngaard v.d. A., Janssen D.B., Witholt B.** (1989), Degradation of epichlorohydrine and halohydrine by three bacterial cultures, *J. Gen. Microbiol.*, 135, 2199-2208
- 20) **Reineke W.** (1988), Microbial degradation of haloaromatics, *Ann. Rev. Microbiol.*, 42, 263-287
- 21) **Reineke W.** (1986), Construction of bacterial strains with novel degradative capabilities for chloroaromatics, *J. Basic. Microbiol.*, 26, 551-567
- 22) **Oldenhuis R., Kuijk L., Lammers A. Janssen D.B., Witholt B.** (1989), Degradation of chlorinated and non chlorinated aromatic solvents in soil by pure bacterial cultures, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 30, 211-217
- 23) **Bont J. de & Coll.** (1986), *Appl. Environ. Microbiol.*, 52, 677-680
- 24) **Schraa G. & Coll.** (1986) *Appl. Environ. Microbiol.*, 52, 1374-1381
- 25) **Apajalahti J.H.A., Salkinoja-Salonen M.S.** (1986), degradation of polychlorinated phenols by *Rhodococcus chlorophenicus*, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 25, 62-67
- 26) **Edgehill R.U., Fin R.K.** (1982), Isolation, characterization and growth kinetics of bacteria metabolizing P.C.P., *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 16, 179-184
- 27) **Bopp L.H.** (1986), Degradation of highly chlorinated P.C.B.s by *Pseudomonas* strains LB 400, *J. Indust. Microbiol.* 1, 23-29
- 28) **Fortnagel P., Harms H., Wittich R.M., Krone S., Meyer H., Sinnwell V., Wilkes H., Francke W.** (1990), Metabolism of dibenzofuran by *Pseudomonas* strain HH 69 and the mixed culture HH 27, *Appl. Environ. Microbiol.*, 56, 1148-1156
- 29) **Streber W.R., Timmis K.N., Zenk M.H.** (1987), Analysis, cloning and high-level expression of 2,4-dichlorophenoxyacetate monooxygenase gene *tfdA* of *Alcaligenes eutrophus*, *J. Bact.* 169, 2950-2955
- 30) **Jacobsen C.** (1991), Survival and biodegradative effect of *Pseudomonas cepacia* DB01 (pR0101) in soil contaminated with 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, *Int. Symp. Environ. Biotech.*, 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 315-317
- 31) **Mac Rae I.C., Raghu K., Castro T.F.** (1969), Anaerobic degradation of the insecticide Lindane by *Clostridium sphenoides*, *Nature* 222, 859-860
- 32) **Dupont G.** (1964), Division de l'assainissement du département des travaux publics, Genève, C. H.

- 33) **Gummerman R.C., Carlson D.A.**(1966), Hydrogene sulfide and methyl-mercaptan removal with soil columns, Proceedings Industrial Waste Conference Purdue University, Lafayette, Indiana
- 34) **Carlson D.A., Leiser C.P.** (1966), Soil beds for the control of sewage odours, J. Water Poll. Control. Fed., 5, 829-840
- 35) **Helmer R.**(1972), Sorption und Mikrobieller Abbau in Boden Filter bei der Desodorierung von Luftströmen Stuttgarter Berichte zur Siedlungs wasserwirtschaft, Thèse, 49
- 36) **Don J.A., Feenstra A.** (1984), Odour abatement through biofiltration in Caractérisation et techniques de réduction des nuisances olfactives dans les industries de procédés, Societé belge de filtration, 337-349
- 37) **Don J.A.**(1986), The rapid development of biofiltration for the purification of diversified waste gas streams, V.D.I. Berichte, 561, 63-73
- 38) **Fanlo J.L., Degorce-Dumas J.R., Kowal S., Le Cloirec P.**(1991), Procédé biologique de traitement de gaz, biofiltres et application à la désodorisation de gaz, Brevet n° 91.05346, 22 avril 1991
- 39) **Kowal S., Fanlo J.L., Degorce-Dumas J.R., Le Cloirec P** (1991), Removal of H₂S by dry activated sludge: an approach of mechanisms, Int. Symp. Environ. Biotech., 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 135-138
- 40) **Dalouche A., Lemasle M., Le Cloirec P., Martin G., Besson G.** (1989), Utilisation de biofiltres pour l'épuration de gaz chargés en composés azotés et soufrés, Proceedings of the 8th World Clean Congress The Hague, The Netherlands, 11-15 september, 4, 379-384
- 41) **Martin G., Le Cloirec P., Lemasle M., Cabon J.** (1989), Rétention de produits odorants sur tourbes, Proceedings of the 8th World Clean Congress The Hague, The Netherlands, 11-15 september, 4, 373-378
- 42) **Ottengraf S.P.P., Diks R.M.** (1990), Biological purification of waste gases, Review, Chimicaoggi, may, 41-45
- 43) **Diks R.M., Ottengraf S.P.P.** (1991), Process engineering aspects of biological waste gas purification, Int. Symp. Environ. Biotech., 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 353-367
- 44) **Schröder S.** (1987), Practical experience with a waste gas treatment plant according to the chemico-biological absorption process in an industrial drying process, Abstracts, Int. Meeting Heidelberg, 24-26 march, oral 16
- 45) **Schippert E.** (1989), V.D.I. Berichte 735, 77-88, und 161-177
- 46) **Schippert E.** (1987), Chemico-biological gas scrubbing for the reduction of organic emissions, Abstracts, Int. Meeting Heidelberg, 24-26 march, oral 15
- 47) **Kohler H., Reither K.** (1987), State of art of biological waste gas treatment - example of industrial applications, Abstracts, Int. Meeting Heidelberg, 24-26 march, poster 7
- 48) **Paul E.** (1987), Experiences with large-scale biological scrubbers, Abstracts, Int. Meeting Heidelberg, 24-26 march, oral 14

- 49) **Schirtz S.** (1987), Biological scrubbers in the waste air from feedstuff and printed circuit manufacturing as well from sewage treatment plants, Abstracts, Int. Meeting Heidelberg, 24-26 march, poster 9
- 50) **Berhnaard T., Berhnaard U.** (1987), Biological waste gas treatment in fixed bed reactor with adapted microorganisms, Abstracts, Int. Meeting Heidelberg, 24-26 march, poster 12
- 51) **Vis P.I.M., Rinzema A.** (1991), Removal of ammonia from waste gas with a rotating biological contactor, Int. Symp. Environ. Biotech., 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 373-376
- 52) **Thalasso F., L'hermite P., Hammami R., Naveau H.P., Nyns E.J.** (1991), Reactor design for biological gas treatment using the "mist foam concept", Int. Symp. Environ. Biotech., 22-25 April, Ostend, (Belgium), part I, 377-37
- 53) **Verstraete W., Vanstaen H., Neukermans G., Debruyckere M.** (1975), Désodorisation de l'air à l'aide d'un filtre biologique, Centre Belge d'Etude et de Documentation des Eaux, 376, 134-139
- 54) **Gardais D.**(1990), Biofiltration, dans Environnement et Electricité," Les procédés électriques de traitement des rejets industriels", Dopée 85, Avon,159-163
- 55) **Martin G., Laffort P.** (1991), Odeur et Désodorisation dans l'Environnement, Tech. & Doc., Lavoisier, Paris

ANNEXE 3

ENQUETE SUR LES PROCEDES DE TRAITEMENT

ENQUETE

1 METHODOLOGIE

La pertinence d'une étude technique des procédés industriels existants étant affirmée, un travail d'enquête (questionnaire et visite) a été mené.

La réalisation de cet objectif a nécessité l'élaboration d'un document-questionnaire destiné à être le support d'enquête d'études de cas. Cette démarche a pour but de faire état des :

- caractéristiques techniques (nature des procédés, des matériels, des effluents...),
- performances vis-à-vis de divers effluents (nature, charge)
- aspects économiques
- causes éventuelles de dysfonctionnement.

Concernant ce dernier point, les aspects dimensionnement des installations, ainsi que leur maintenance, apparaissent comme cruciaux.

Lors de la réunion GEODE du 15 juin 1992 (C.E.I.- Villeurbanne), il a été convenu d'adopter une forme anonyme pour la présentation finale des résultats de l'enquête.

Les divers types d'effluents correspondent à des activités industrielles différentes :

- Chimie
- Agro-alimentaire (équarrissage, engrais)
- Déchets (station d'épuration, incinération)

2 ETUDES DE CAS

2 1 LE QUESTIONNAIRE

FICHE SIGNALÉTIQUE

Société :

Activité de l'entreprise :

Adresse du site visité :

Tel

Fax

Responsable du site :

Responsable environnement du site :

Groupe :

Adresse :

Tel

Fax

Responsable environnement du Groupe :

Type de Procédé de désodorisation :

L'AIR A TRAITER

Provenance de l'air (débits)

Ventilation d'atelier

Gaz de process

Débit total d'air à traiter

Prétraitement de l'air

Qualité de l'air (polluants-concentration)

- Taux d'humidité

- Entrée

- Sortie :

Post-traitement de l'air

Ventilateur

Marque :

Puissance nominale :

Pertes de charge dans le circuit

Consommation électrique

Rejets

Cheminée (dimensions)

Autres

INCINERATION

Débit nominal de traitement

Schéma de principe

Incinérateur

Marque

Type

Dimension

Coûts

Investissement

fonctionnement

Problèmes

Gestion et maintenance

Personnel

LAVAGE - ABSORPTION

Débit nominal de traitement

Schéma de principe

Réacteurs

Dimensions

Réactifs de Lavage

Prétraitement des réactifs

Qualité, concentrations et débits (m^3/h)

Consommation des réactifs (l/j)

Régulation des réactifs

Postraitement des effluents

Garnissage

Type

dimension

Caractéristiques physico-chimiques

Coûts

Investissement

fonctionnement

Problèmes

Gestion et maintenance

Personnel

ADSORPTION

Débit nominal de traitement

Schéma de principe

Réacteurs

Dimensions

Adsorbants

Qualité

Marque

Caractéristiques physico-chimiques

Origine

Taille

Surface spécifique (m²/g)

Masse volumique apparente

Masse volumique réelle

Imprégnations

Indice d'iode

Indice CCl₄

Analyse élémentaire : C,O,N,H

Fonctions de surface

Régénération

Coûts

Investissement

fonctionnement

Problèmes

Gestion et maintenance

Personnel

BIOFILTRES

Débit nominal de traitement

Schéma de principe

Réacteurs

Dimensions

Garnissages

Qualité

Marque

Caractéristiques Physico-chimiques

Origine

Taille

Surface spécifique (m²/g)

Masse volumique apparente

Masse volumique réelle

Analyse élémentaire :C, O, N, H

Métaux

Changement du garnissage

Coûts

Investissement

fonctionnement

Problèmes

Gestion et maintenance

Personnel

2 2 TABLEAU RECAPITULATIF DES ETUDES DE CAS

Procédé Industrie	Incinération	Adsorption	Absorption	Biofiltration
Agro- alimentaire			Equarrissage : 4 Bioréacteur : 1	Equarrissage : 3 Amendement : 1
Déchets	Gaz de fosse : 1	Station d'épuration : 1 Traitement des Ordures ménagères : 1	Lavage (eau) : 2 Lavage chimique : 2	
Chimie	Air de ventilation : 1		Emission peinture : 1	

Total des sites industriels visités : 18

3 ANALYSES DES ETUDES DE CAS

Captage - Ventilation

Selon le type de source d'odeurs le captage de l'air sera plus ou moins complexe. De façon générale, lorsqu'il s'agit d'une source ponctuelle (cuiseurs par exemple) une aspiration à l'aide d'un ventilateur permet de résoudre le problème du captage. Le problème est différent lorsqu'il s'agit de capter les gaz d'une fosse de réception de déchets, ouverte sur un côté (cas d'une unité d'incinération par exemple). Dans ces conditions, une étude sérieuse de l'aérodynamique de la circulation de l'air est requise afin d'obtenir une ventilation adéquate. Une simulation de la ventilation à l'aide de maquette (en hydrodynamique), permettant de concevoir un système intégrant à la fois le soufflage et l'aspiration de l'air par des ventilateurs appropriés (nombre, puissance, disposition dans le volume, perte de charge à vaincre...) constitue une approche globale des phénomènes de circulation d'air tout à fait pertinente.

Dans ce même contexte du captage et de la ventilation les risques éventuels liés à la présence de poussières et de vapeurs explosives (exemple des traiteurs de déchets) ne doivent pas être ignorés. Cet aspect "sécurité" doit être intégré lors de la conception même de l'unité ; ceci inclut non seulement des mesures de la concentration des polluants dans l'air (ponctuelles et continues) mais aussi l'installation de capteurs/alarmes dont on déterminera le nombre, la disposition ainsi que les seuils d'alerte en fonction de l'environnement à gérer.

Dans le cas d'atmosphère diffuse, il existe un problème important pour le captage et la canalisation des émissions gazeuses. On peut citer l'exemple de station d'épuration. Le cas idéal est de capoter les installations sous un même ensemble et de ventiler le volume ainsi circonscrit. On rencontre quelques installations de ce type dans le sud de la France, villes balnéaires sur la Côte d'Azur où la station se trouve proche ou dans la ville. Le coût d'une telle opération est très important.

Une autre approche intéressante est de définir des volumes autour de chaque module de traitement. Dans la station visitée, seuls l'arrivée eau brute et le traitement global des boues étaient ainsi capotés. Le volume à ventiler est minimisé. En outre, les matériaux utilisés sont du type résine armée afin d'éviter les problèmes de corrosion. De plus, des ouvertures (trous d'homme) sont effectuées afin de rendre accessible l'ouvrage pour les travaux de maintenance. Il est possible de ventiler ces volumes, soit globalement, soit unité par unité. Il en est de même pour le traitement. Cette station comporte des traitements séparés des odeurs, ce qui minimise le coût du réseau d'air.

Procédés basés sur l'incinération

L'analyse de l'étude de cas concernant l'incinération des gaz odorants fait apparaître les éléments suivants :

Dans l'unité visitée (usine d'incinération), les gaz à traiter sont issus d'une fosse de stockage-reprise de déchets industriels dont la ventilation a été conçue sur la base des critères évoqués plus haut (cahier des charges comparable concernant la circulation d'air, et les aspects liés à la sécurité) ; ces gaz contiennent de faibles concentrations en C.O.V. (solvants, hydrocarbures légers, aromatiques...) soit inférieures à 20-30 ppm. Ces gaz de fosse sont dilués dans l'air qui alimente le four rotatif qui incinère les déchets (1300/1600°C).

L'incinération de ces gaz de fosse (faible teneur en C.O.V. et en poussières) après leur dilution dans le flux d'air indispensable au bon fonctionnement du four, ne paraît pas poser de problèmes particuliers à l'exploitant. Il faut noter que le flux de matières apporté par le gaz (<1kg/h) est négligeable par rapport au flux de déchets incinérés (3000kg/h). Compte-tenu de la présence d'un four, l'industriel a fait le choix de l'incinération plutôt que d'installer un biofiltre.

Procédés basés sur l'adsorption

Notre approche s'est limitée, pour l'adsorption, au cas de traitement des odeurs des émissions industrielles. Ne sont pas abordés ni les traitements des rejets domestiques, ni le traitement des solvants.

Le matériau utilisé est dans les sites visités, du charbon actif. La mise en œuvre est classique, sous forme de filtre garni de mélanges de matériau imprégné. On rencontre des charbons actifs spéciaux pour les soufrés (H_2S principalement), les azotés (NH_3) et des charbons actifs non imprégnés microporeux pour le "reste" des molécules odorantes. Le gaz peut être soit poussé dans le filtre, soit oxygéné au travers de celui-ci. Les deux possibilités existent. Les débits rencontrés étaient dans une gamme de 1000 à 12000 m^3/h . L'air peut être légèrement chauffé ($+10^\circ C$). On note, quelle que soit l'installation, un temps de cycle entre deux saturations bien supérieur à celui calculé ($\times 4$ à 8). Ceci peut s'expliquer par des possibilités d'oxydation catalytique sur le filtre ou le développement de biomasse impliquant un phénomène physico-chimique et biologique et donc une augmentation considérable de la capacité d'adsorption du matériau.

Il convient de noter que ce type de procédé est très simple à mettre en œuvre et à faire fonctionner. Du fait de la très longue durée de vie des charbons actifs et du faible coût énergétique du système, ce procédé semble assez intéressant dans une gamme de débit moyenne.

Procédés basés sur l'absorption

Lavage chimique

Dans le cas de l'équarrissage, les laveurs (type Cellcot, Wemco ou autre) sont largement utilisés pour traiter des gaz, en général d'abord poussés par un premier ventilateur à la sortie des fours puis, aspirés en sortie du laveur. Différents types de lavage ont été rencontrés. Ils dérivent en général du modèle désormais classique suivant : $H_2SO_4/H_2O/NaOH-ClONa$. Si en théorie, le principe du lavage s'applique tout à fait à l'élimination de composés hydrosolubles tels ceux rencontrés dans les gaz d'équarrissage (molécules neutralisées ou oxydées en milieu aqueux), en pratique, on constate que l'on peut fréquemment s'éloigner des conditions optimales de fonctionnement. Le colmatage par dépôt de poudre et poussières, l'encrassement des électrodes (poussières) et conséquemment l'absence de régulation du pH sont la résultante non seulement

- d'erreurs de conception (longueurs de gaines trop importantes),
- de matériels plus ou moins efficaces (cyclone),
- d'une faible maintenance

Ces dysfonctionnements ont bien entendu des répercussions sur l'efficacité globale du lavage.

Lavage à l'eau

L'étude a porté sur des laveurs dont la conception et la réalisation ont été réalisées soit par une société d'ingénierie extérieure soit par l'entreprise elle-même. Elle amène les remarques suivantes:

Les débits d'air traité sont importants (50000 à 70000 Nm^3/h) et les polluants gazeux à éliminer sont de nature différente (aromatiques, cétones, hydrocarbures légers,...).

Si leur dimensionnement est, en règle générale correct, leur efficacité est moyenne. En effet, selon la nature des polluants l'épuration est plus ou moins bonne et varie de 0% (pas d'épuration) à 30 - 40% pour certains et jusqu'à plus de 90% pour d'autres.

Pour de nombreux polluants, un mauvais transfert gaz -> liquide peut expliquer en partie cette efficacité moyenne ou faible du laveur.

D'autre part, nous avons constaté la présence de microorganismes et plus particulièrement de bactéries (insoupçonnées jusqu'à présent) dans la phase aqueuse de laveurs. Ceci montre que des phénomènes de biodégradation interviennent au sein des laveurs à eau. La dégradation biologique est cependant loin d'être totale (DCO > 10-20 000mg/l) du fait notamment du caractère peu ou faiblement biodégradable de certains composés (cinétiques d'oxydation lentes, accumulation de produits toxiques) et/ou d'une absence d'équilibre nutritionnel approprié.

De manière générale, les laveurs rencontrés ne font pas l'objet de suivis analytiques réguliers et leur gestion semble tout à fait ponctuelle (absence de personnel).

Procédé biologique : Biofiltration

Plusieurs biofiltres ont fait l'objet d'une enquête. Ils concernent le secteur de l'éparrissage bien sûr, traitement de l'air issu de la ventilation d'aire de stockage, d'ateliers ou gaz incondensables de cuiseurs (dégraissage et séchage des os), mais ils concernent aussi celui de la fabrication de compost, d'engrais ou d'amendement organique pour l'agriculture.

Les biofiltres étudiés (biofiltres "ouverts") pouvaient avoir été réalisés soit par une entreprise française, ou, le plus souvent par une société allemande ou suisse. Les débits d'air traité varient de 13000 à 25000Nm³/h, la surface des filtres variant elle, de 90 à 200m².

Pré-lavage des gaz.

Avant le biofiltre, l'air est refroidi (échangeur, air-coil) et subit un lavage le plus souvent à l'eau, parfois acide (H₂SO₄), qui a pour but de refroidir l'air (exemple des gaz de cuiseurs refroidis de 115-120°C à 30-35°C en été, 20-25°C en hiver avant l'entrée du filtre), d'en éliminer la majorité des poussières et d'abattre déjà une partie importante de la pollution représentée par l'ammoniac, les amines, cétones, alcools et H₂S. Débit d'eau des laveurs : 100 à 200 m³/h. Le rythme d'entretien d'un laveur (nettoyage, détartrage) est très variable : hebdomadaire à mensuel.

Garnissage du filtre.

Les biofiltres visités avaient les garnissages suivants :

- couche d'écorce (10 cm) + couche de tourbe fibreuse (50 cm)
- tourbe fibreuse + 10 % de bruyère (ou noix de coco), (1,2 m)
- pulpe de bois ou morceaux de palettes, (1,2 m)

Humidification du filtre.

L'air, sortant du laveur, est en général saturé d'eau avant son entrée dans le biofiltre ; néanmoins la plupart des filtres sont équipés de systèmes d'arrosage plus ou moins sophistiqués : arrosage manuel ou automatique en présence (mais fait plutôt rare) d'un capteur d'humidité (sonde pour gazon par exemple).

D'une façon générale, les filtres à base de tourbe, (notamment avec 1,2 m de hauteur), ont plus facilement tendance à colmater, nécessitant un changement annuel et partiel du remplissage (1/3 en moyenne). Ce colmatage étant essentiellement causé par un arrosage non contrôlé et souvent excessif.

Pertes de charge.

En régime normal de fonctionnement (hors excès d'arrosage par exemple), les pertes de charge sont en général inférieures à 100-150 mm d'eau (même après 2-3 ans de fonctionnement par exemple).

Les problèmes les plus fréquents de colmatage sont rencontrés au niveau d'une part des biofiltres non suivis et/ou non entretenus régulièrement et d'autre part, au niveau des laveurs précédant les filtres (piégeage des poussières) ou dans les canalisations avant laveur (ou cyclone).

Efficacité

Les biofiltres étudiés ont présenté au démarrage une phase de latence (période d'inefficacité) de 3 semaines à un mois minimum. Par la suite, l'efficacité s'améliore et devient quasi totale vis-à-vis des cétones, alcools en particulier. Selon la nature des autres familles de composés cette efficacité varie comme en témoigne le tableau suivant.

Composés mg/m ³		Abattement %
Amines	1 à 5	30 à 90
Ammoniac	20 à 100	90 à 98
Cétones	1 à 5	100
Alcools	0 à 3	100
H ₂ S	10 à 100	80 à 90

Efficacité moyenne des biofiltres sur gaz d'équarrissage lavés.

Durant les périodes de congés (ou fin de semaine), la ventilation est le plus souvent réduite voire arrêtée. Une fois le débit gazeux rétabli, le biofiltre récupère son efficacité antérieure.

Investissement/fonctionnement

Sans avoir procédé à une étude comparative exhaustive il apparaît néanmoins que le coût total d'investissement d'un biofiltre (laveur, pompe, gaines, ventilateur, biofiltre) destiné à traiter un effluent comparable (débit, concentration en produits) peut varier de 30 à 50%.

Parmi les coûts de fonctionnement on notera principalement la consommation électrique (pompe, ventilateur), l'eau (lavage des gaz et arrosage des filtres), les compléments nutritifs éventuellement ajoutés (pour améliorer l'équilibre nutritionnel du biofiltre) et le

changement partiel ou total du garnissage qui s'opère de façon très variable d'un filtre à un autre. A titre d'exemple :

le m³ de tourbe + bruyère livré coûte 424F TTC (1992)

le m³ de tourbe + noix de coco livré coûte 490F TTC

4 - CONCLUSIONS

Adsorption

Les filtres étudiés ont un dimensionnement et un fonctionnement correct. La mise en œuvre de ces procédés d'adsorption sur charbon actif se situe dans une gamme de débit moyenne de l'ordre de 10 000 m³/h. Le point majeur mis en lumière par cette étude est dans les exemples considérés une capacité d'adsorption de polluants bien supérieure à celle calculée pour ce type de matériau poreux. Ceci entraîne une durée de vie largement supérieure à celle prévue et donc une réduction notable des coûts de fonctionnement. Par contre, il convient de noter, en conclusion, une méconnaissance totale des processus mis en jeu dans ce type de procédé de désodorisation.

Absorption

L'enquête révèle pour ces procédés de désodorisation les points suivants :

- le lavage de gaz multi étage est d'utilisation courante ;
- il existe des problèmes de régulation et d'une manière générale de gestion des réactifs et des flux ;
- les réactifs usagés sont mélangés et envoyés à la station d'épuration.

Biofiltration

La première remarque concerne la nature des composés odorants oxydés dans les installations de biofiltration visitées : dans tous les cas, seules des molécules organiques ("naturelles") sont en cause. Du fait de leur caractère tout à fait biodégradable, leur élimination par oxydation biologique est totale.

De façon générale, le dimensionnement des biofiltres est correct, les temps de séjour de l'effluent varient entre 18 et 36 s pour des charges influentes (total : amines, ammoniac, C.O.V., H₂S) plutôt inférieures à 0,4kg/m³/j. Les rendements d'abattement de la pollution correspondent aux données généralement publiées. Cependant il faut insister sur le fait que ces biofiltres font l'objet d'une maintenance et d'un suivi analytique très limités ; peu ou pas d'analyses après la mise en route de l'installation et durant son fonctionnement, humidification/arrosage aléatoire provoquant soit une inefficacité (filtre trop sec) soit et c'est plus grave, le colmatage en particulier au niveau de la couche inférieure du-dit filtre (10-20 cm). Dans ces conditions, l'expérience montre que le décolmatage passe avant tout par un reconditionnement du garnissage après remplacement de la couche saturée d'eau. Si globalement, la maintenance des biofiltres semble faible elle souligne certainement une faiblesse de cette technique rustique de désodorisation liée à la nature même des garnissages utilisés industriellement présentant une propension au colmatage et à l'apparition de passages préférentiels.

ANNEXE 4

ASPECTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS

1 - ASPECTS LEGISLATIFS

En matière de prévention des pollutions concernant l'air, l'eau ou les déchets la législation française a institué une réglementation s'appuyant sur des actions autoritaires (lois, décrets, circulaires ou arrêtés) ou financières (taxes et leurs corollaires : les aides, via les agences à caractère public).

Les odeurs constituent une des formes de pollution atmosphérique qui bien que ne revêtant pas obligatoirement un caractère aigu de toxicité n'en est pas moins immédiatement perçue par le public.

Aussi force est il de constater, que face aux problèmes d'odeurs, il ne convient plus seulement de s'assurer que la santé ou la sécurité du public ne sont pas directement menacées. Il faut offrir à chacun d'entre nous un environnement de qualité et agréable à vivre.

1.1 ASPECT REGLEMENTAIRE (1)

1.1.1 LES INSTALLATIONS CLASSEES

Les textes de base sont :

- la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)
- le décret d'application du 21 septembre 1977.

1.1.1.1 Les procédures réglementaires

La législation soumet les usines, les grands élevages et plus généralement les installations publiques ou privées qui sont susceptibles d'être à l'origine de dangers ou d'inconvénients importants à des procédures d'autorisations (pour les plus importantes), ou de déclaration, et ce, quel que soit le statut juridique de leur exploitant.

Cette réglementation concerne 500 000 exploitations dont 38 000 environ soumises à autorisation.

Les catégories d'installations qui sont visées sont définies par une nomenclature qui comprend environ 400 rubriques. Pour chacune, des seuils déterminent les cas où l'installation est soumise à autorisation ou à déclaration.

La procédure d'autorisation est délivrée par le préfet. Elle exige notamment de la part du pétitionnaire la fourniture d'une étude d'impact sur l'environnement, qui doit prendre en compte les sources d'odeurs, la quantification si possible de ces émissions odorantes et les moyens mis en œuvre pour les atténuer avec indication des performances attendues et des dispositifs de mesure envisagés.

Cette étude doit permettre de sensibiliser l'exploitant aux problèmes évoqués, d'informer l'administration chargée d'élaborer les prescriptions et de donner une connaissance claire et complète au public des dispositions envisagées pour combattre les nuisances inhérentes au type d'activité concernée.

Cette procédure doit être contradictoire. Le public fait part de ses observations à l'occasion d'une enquête publique d'un mois annoncée par affichage et voie de presse. L'exploitant doit établir un mémoire en réponse aux observations faites. Il peut en outre se faire entendre au Conseil Départemental d'Hygiène le quel, donne au préfet un avis consultatif. Les droits des tiers restent réservés une fois l'autorisation donnée, et l'on peut signaler l'existence d'un régime de plein contentieux en la matière.

1.1.1.2 Règles techniques imposées à l'exploitant

L'autorisation accordée est assortie de règles techniques destinées à prévenir les pollutions et les risques et à mettre en œuvre les programmes nationaux de lutte contre les nuisances.

Il est ainsi possible d'imposer à l'exploitant des dispositifs d'épuration des eaux et des gaz. Dans ce cadre, les problèmes d'odeurs sont bien sûr pris en compte.

Ces prescriptions doivent fixer une limite maximale chiffrée au flux de nuisances et prévoir chaque fois que cela est nécessaire le contrôle ou la surveillance de ces rejets. Ces prescriptions doivent dans la mesure du possible être formulées en terme d'objectifs et non de moyens afin de préserver l'initiative et la responsabilité des industriels et faciliter le développement ou l'utilisation des techniques peu polluantes.

Dans tous les cas, ces prescriptions font l'objet de négociations préalables entre l'inspection des installations classées et l'exploitant, d'autant plus approfondies que les problèmes potentiels sont sensibles et les enjeux technico-économiques importants.

1.1.1.3 Contrôle

Après la mise en service de l'installation, ces prescriptions seront contrôlées par l'Inspection des Installations Classées qui est assurée par les Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt, les Directions des Services Vétérinaires, les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

1.1.1.4 Sanctions

Si l'exploitant ne respecte pas les règles qui lui sont imposées, il encourt des sanctions pénales : amendes de 2000 à 20 000 F dans le cas de l'exploitation d'une installation sans l'autorisation requise, et des peines d'emprisonnement (2 à 6 mois) et / ou des amendes de 20 000 à 50 000 F en cas de récidive. L'inspecteur des installations classées doit en effet dresser procès-verbal et le transmettre au Procureur de la République qui après instruction, saisira le tribunal compétent.

Des sanctions administratives sont également prévues :

- exécution de travaux de mise en conformité aux frais de l'exploitant.
- consignation auprès d'un comptable public d'une somme répondant du montant des travaux à réaliser pour la mise en conformité de l'installation.
- suspension du fonctionnement de l'installation.

1.1.2 ASPECTS TECHNIQUES DE LA REGLEMENTATION DES INSTALLATIONS CLASSEES

Pour s'assurer du respect des normes de rejets de polluants imposées à un exploitant par l'arrêté préfectoral d'autorisation, comme pour surveiller la qualité des milieux naturels, il est nécessaire de quantifier les niveaux de polluants et de les mesurer.

En ce qui concerne les installations classées, il y a lieu de distinguer deux types de mesures :

- d'une part, l'autosurveillance qui désigne les mesures réalisées par l'exploitant à la demande de l'Inspection des Installations Classées,
- d'autre part, les contrôles désignant les mesures réalisées par l'Inspection des Installations Classées ou par un organisme indépendant de l'exploitant.

1.1.2.1 La métrologie des odeurs

La métrologie des odeurs est, en règle générale, beaucoup plus délicate que l'analyse d'eau ou d'une molécule gazeuse, ou que la mesure du bruit. Mais la quantification des phénomènes dans le domaine des odeurs est indispensable pour éviter le subjectif et l'arbitraire. Les besoins en matière de métrologie des odeurs, issus de la réglementation peuvent se résumer ainsi : quantifier des niveaux odorants, sans forcément identifier la nature du polluant, que ce soit à l'émission, ou dans le milieu à proximité d'un établissement .

1.1.2.2 Métrologie et réglementation

Métrologie et réglementation sont liées. Aussi, est il important de disposer d'outils métrologiques appropriés afin de permettre une normalisation efficace.

Parmi les acteurs intéressés à ces problèmes de mesures et de réglementation, le Ministère de l'Environnement et plus particulièrement le Service de l'Environnement Industriel (S.E.I.) poursuit les efforts entrepris en matière de normalisation (N.F. X 43-101, détermination du facteur de dilution au seuil de perception ; N.F. X 43-104, relative aux prélèvements et N.F. X 43-103 relative à la mesure de l'intensité odorante, en cours de publication) ou d'instrumentation (développement d'olfactomètre).

1 1.3 AUTRES REGLEMENTATIONS

1.1.3.1 Le règlement sanitaire départemental

La législation des installations classées donne à l'administration des pouvoirs très étendus qui ne se justifient que pour prévenir les risques les plus sérieux nécessitant un arbitrage rigoureux.

Lorsqu'une installation qui n'est pas visée par la nomenclature des installations classées présente des inconvénients, le Maire dispose des pouvoirs de police (article L. 131 et

suyvants du Code des Communes), nécessaires pour exiger de l'exploitant qu'il préserve mieux la tranquillité ou le bien-être de ses voisins.

Au plan technique, ces pouvoirs s'appuient sur le règlement sanitaire départemental. Celui-ci est un ensemble de prescriptions prises dans chaque département par les préfets. Il précise les modalités techniques que doivent respecter les activités humaines afin de ne pas troubler la tranquillité du voisinage. Les problèmes d'odeurs ne sont pas traités spécifiquement, mais sont pris en compte lorsqu'il y a lieu dans ce règlement :

- l'entreposage de détritrus, déjections (art. 23.1)
- l'évacuation de fumiers d'animaux (art. 26 et Titre VIII)
- les conduits de ventilation (immeubles) (art. 31.2)
- l'emplacement des récipients des ordures ménagères dans les immeubles collectifs (art. 77)
- les transports de matières visées (art. 99.4)
- l'implantation des élevages et des stockages de déjections et de matières fermentescibles (Titre VIII)

Le Maire est chargé de l'exécution de ces dispositions. Il peut faire appel à la Direction Départemental de l'Action Sanitaire et Sociale (DDASS) au Service d'Hygiène Municipal, à la Direction des Services Vétérinaires, à la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDA) et à l'inspection des Installations Classées (coordination : DRIRE) via l'autorité préfectorale, pour des problèmes plus spécifiques.

1.1.3.2 La loi n° 61.842 du 2 août 1961 (lutte contre les pollutions atmosphériques)

Elle est relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les odeurs. Elle a un domaine d'application très vaste : immeubles, établissements industriels, commerciaux, artisanaux ou agricoles, véhicules ou autres objets...

Modifiée le 7 juillet 1980, elle crée en outre l'Agence pour la Qualité de l'Air (A.Q.A), établissement public de l'Etat à caractère industriel et commercial, chargée de faciliter et de réaliser des actions de surveillance, de prévention et d'information en matière de pollutions atmosphériques, intégrée depuis 1991 à l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (AEME).

1.1.3.3 Décret du 13 mai 1974 (contrôle des émissions polluantes)

Ce décret institue un contrôle des émissions polluantes et concerne :

- les installations d'incinération et de combustion
- la surveillance de la qualité de l'atmosphère
- les actions correctives à l'émission en cas de dérive hors normes
- des règlements spécifiques par arrêtés ministériels

- les contrôles sous l'autorité des DRIRE

1.1.3.4 Décret du 11 mai 1990 (taxe parafiscale)

Ce décret institue une taxe parafiscale sur la pollution atmosphérique. Cette taxe est perçue par l'AQA. Sont soumis à taxe parafiscale sur leurs rejets atmosphériques les entreprises qui remplissent simultanément les deux conditions suivantes :

- Exploitation d'une ICPE soumise à autorisation
- Installations entrant dans l'une des catégories suivantes :
 - * installations de combustion dont le PCI entrant est > 20 MW
 - * installations d'incinération d'ordures ménagères de plus de 3 t/h
 - * installations rejetant en une année plus de :
 - 150 t de SO₂ ou
 - 150 t de NO₂ ou
 - 150 t de HCl ou
 - 150 t d'hydrocarbures non méthaniques ou de COV

Taux limites des polluants donnant lieu à taxation (1991) :

SO₂ à raison de 200 F par tonne émise

NO₂ à raison de 200 F par tonne émise

HCl à raison de 200 F par tonne émise

Hydrocarbures, solvants, COV et Poussières 500 F / t

Réduction des émissions de SO₂ (2).

Le dioxyde de soufre, dont les émissions en 1988 ont été estimées en France à 1 400 000 tonnes, jouent un rôle important dans le phénomène des "pluies acides". Comme les NO_x, il n'est, de plus, pas neutre au plan olfactif. Rappelons que l'Etat s'est fixé comme objectif de réduire d'au moins 50 % ses émissions entre 1980 et 1990.

Réduction des émissions de COV (2).

La réduction des émissions de composés organiques volatils constitue une des priorités, compte tenu de l'importance des émissions de ces substances (évaluées à 2 000 000 t

par an), du caractère potentiellement toxique de certains composés ou d'autres nuisances dont ils peuvent être à l'origine (ozone, Peroxy-Acyl-Nitrates). Leurs origines sont :

- transport : 55 %
- industries utilisant des solvants : 31 %
- peinture, imprimeries, dégraissage (métaux), activités domestiques, stockage hydrocarbures, raffineries : 14 %

Certaines études tendent à montrer, par ailleurs, qu'il est plus efficace de réduire les rejets de COV plutôt que les rejets d'oxydes d'azote, pour diminuer la formation des composés photooxydants, du moins en zones urbaines ou industrielles. C'est pourquoi l'Etat s'est fixé en 1985 comme objectif, de réduire de 30 % les rejets d'hydrocarbures d'ici l'an 2000. D'autre part concernant ce sujet, nous renvoyons le lecteur au texte du protocole défini à Montréal en septembre 1987.

L'AQA a pour sa part favorisé, depuis sa création, le développement et la promotion de nouvelles techniques de désulfuration ou de réduction de COV (2).

1.2 TEXTES PARTICULIERS TRAITANT DU PROBLEME DES ODEURS : EXEMPLES

Il existe des réglementations en matière d'odeurs, applicables à de nombreux secteurs industriels et particulièrement le secteur agricole et agro-alimentaire.

Dans tous ces textes, et surtout les plus anciens, le problème des nuisances olfactives est cependant abordé de façon très vague ou générale : "...toutes émissions d'odeurs provenant de l'installation ne devront pas constituer une source de nuisances pour le voisinage..."

1.2.1 ARRETES-TYPES

En application de l'article 29 du décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977, des prescriptions générales sont imposées aux installations soumises à déclaration ceci pour chaque département par arrêté préfectoral.

A titre indicatif, voici une liste des rubriques où il est fait référence de manière générale aux odeurs :

- 1 Abattages des animaux
- 19 Acide formique et formiates (fabrication)
- 28 Acides stéarique, palmitique et oléique (fabrication)
- 35 Alcools et eau-de-vie (production)
- 48a Amines combustibles liquéfiées (ateliers)
- 58 Animaux vivants (établissements contenant des)
- 66 Asphaltes, bitumes, brais, résines (dépôts)

- 83 Bougies et autres objets en cire, paraffine ou acide stéarique
- 84 Boyauderies
- 85 Boyaux salés destinés au commerce de la charcuterie
- 86 Brasseries
- 91 Buanderies, laveries de linge, blanchisseries
- 94 Caoutchouc ou autres élastomères
- 104 Carbonisation de bois
- 141 Choucroute (fabrication)
- 145 Cidreries industrielles
- 147 Cire à cacheter (fabrication)
- 154 Cornes, sabots et onglons
- 157 Corps gras pour l'alimentation (traitement de matières animales)
- 159 Corroieries et ateliers d'imprégnation de peaux
- 170 Dextrines à partir de l'amidon
- 175 Eaux grasses (dépôts)
- 176 Ecailles et vessies de poissons (traitement)
- 177 Echaudoirs
- 186 Escargots (préparation) dans les agglomérations
- 190 Fanons de baleines (travail)
- 200 Friteries industrielles (dans les agglomérations)
- 200bis Fromages (fonte des)
- 204 Fumiers (dépôts de) en vue de l'utilisation en champignonnières
- 214 Glycérine (distillation)
- 215 Glycérine (extraction)
- 216 Goudrons
- 218 Graines ou fruits (torréfaction)
- 219 Graisse et suif (fonderies)
- 232 Huiles végétales, animales, résines synthétiques (traitement à chaud)

- 234 Huiles végétales (épuration)
- 241 Laines et tissus (épaillage)
- 242 Laiteries (beurreries, fromageries, caséineries, lactoseries)
- 243 Lait (travail du)
- 244 Lard (charcuteries, viandes)
- 245 Lessives alcalines des papétries (incinération)
- 246 Levures ou autres produits d'origine végétale, animale (fabrication)
- 250 Liqueurs avec distillation d'alcools
- 265 Malteries
- 267 Maroquinerie (ateliers)
- 271 Matières plastiques (fabrication)
- 317 Oignons (dessication)
- 320 Os (dépôts)
- 332 Parfums artificiels (fabrication)
- 333 Pâte à papier (préparation)
- 335 Peaux (lustrage)
- 340 Peaux salées non séchées (dépôt)
- 341 Peaux séchées (dépôt)
- 352 Poissons frais, crustacés, mollusques (conserveries : agglomération)
- 354 Poissons salés, saurs ou séchés (dépôts)
- 358 Produits céramiques (fabrication)
- 359 Produits opothérapiques, d'extraits d'organes animaux
- 362 Rogues (dépôt)
- 367 Salaisons et préparation des viandes et abats
- 368 Salaisons (dépôt)
- 371 Sang (dessication)
- 380 Soles de porc et crins d'animaux (préparation)
- 391 Tabacs (dépôt de résidus)

- 395 Teinture et impression de textiles
- 396 Teintureries de peaux
- 400 Triperies (échaudoirs)
- 405 Vernis, peintures, encres, huiles siccatives (application)
- 406 Vernis, peintures, encres, huiles siccatives (cuisson)

1.2.2 ARRETES, CIRCULAIRES ET INSTRUCTIONS TECHNIQUES

- Abattoirs : arrêté du 1er février 1983, fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les abattoirs de boucheries au titre de la protection de l'environnement.
- Brasseries : circulaire du 22 mars 1983, relative aux brasseries relevant du régime d'autorisation.
- Distilleries : circulaire et instructions du 8 août 1974, relative aux distilleries du jus de betteraves ; circulaire et instructions du 8 août 1974, relative aux distilleries de mélasses ; circulaire et instructions du 8 août 1974, relative aux distilleries viticoles.
- Elevages : circulaire et instructions du 18 décembre 1981, relative aux pollutions et nuisances dues aux élevages de veaux de boucherie et/ou de bovins à l'engrais relevant du régime d'autorisation. Arrêté et instructions du 1er octobre 1982, relatifs aux règles techniques concernant les installations d'élevage de volailles relevant du régime d'autorisation.
- Equarrissages : circulaire et instructions du 29 juin 1977, relatives à la prévention des pollutions et nuisances des équarrissages.
- Porcheries : circulaire et instructions du 12 août 1976, relatives aux porcheries.

Dans ces trois derniers textes, la notion de nuisances olfactives est analysée plus en détail dans les instructions techniques. On y trouve des prescriptions imposées pour :

- le bâtiment d'élevage,
- le stockage des déjections
- le traitement des déjections

Mais c'est le secteur de l'équarrissage qui reste le plus réglementé sur le plan des odeurs par la circulaire citée plus haut. Cette industrie traite plus de 700 000 tonnes de déchets d'origine animale dans environ 60 établissements. Les composés en cause sont essentiellement des composés azotés et soufrés, des aldéhydes et des cétones (§ 2.4.3.4).

La circulaire prévoit l'amélioration des conditions de stockage, la condensation des buées, la collecte et le traitement des gaz incondensables et des gaz froids d'ateliers. Elle fixe le facteur de dilution au seuil (soit dans ce cas 200) et le débit d'odeur ($< 1 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$) pour caractériser le gaz à l'émission et impose également un rendement des installations de traitement des odeurs égal au moins à :

- 98 % sur les produits soufrés
- 98 % sur l'ammoniac et amines
- 98 % sur les aldéhydes et cétones

1.3 LA REGLEMENTATION AU PLAN COMMUNAUTAIRE

En matière de protection de l'environnement, la Commission des Communautés Européennes a une approche par milieu et par polluant, contrairement à l'approche française en matière d'environnement industriel.

Il faut en particulier noter la directive 84/360/CEE du 28 juin 1984 relative à la lutte contre la pollution atmosphérique en provenance des installations industrielles ainsi que la directive 88/609/CEE du 24 novembre 1988 sur les grandes installations de combustion, qui prévoit une baisse globale des émissions de SO₂ et de NO_x en provenance des installations existantes et le renforcement des normes d'émissions sur les installations nouvelles.

Deux autres directives relatives à la prévention de la pollution atmosphérique produite par l'incinération des ordures ménagères ont été adoptées les 8 et 21 juin 1989. Elles concernent respectivement d'une part les installations nouvelles (89/369/CEE), et d'autre part les installations existantes (89/425/CEE). La mise en application de cette dernière posera sans doute des problèmes importants en particulier aux exploitants des fours de petite taille (200 en France, inférieurs à 4 t/h) en raison des exigences nouvelles en matière de combustion et de traitement des fumées (3)

D'autre part au cours des années 1989 des notes techniques concernant les secteurs suivants ont été réalisées et approuvées (4):

- production d'acide sulfurique
- production d'acide nitrique
- production d'ammoniac
- production de ciment
- fabrication, stockage du benzène
- incinération de déchets toxiques ou dangereux

Pour 1990-1991, les notes techniques suivantes ont été programmées :

- industrie du raffinage
- cokeries
- agglomération de minerais, aciéries à l'oxygène
- aciéries à l'arc électrique
- fonderies

D'autres travaux sont en cours, ils concernent :

- la préparation d'une directive concernant la prévention de la pollution atmosphérique en provenance des installation de déchets dangereux.
- l'analyse de la mise en œuvre technique de la directive 88/609/CEE.
- le développement des travaux relatifs à la réduction des émissions de COV en provenance de sources fixes.
- de nouveaux textes sur les turbines à gaz, les installations de combustion de moins de 50 MW...
- le programme THERMIE

En ce qui concerne les odeurs à proprement parler, il n'existe pas actuellement de directives européennes, ni semble-t-il de projet dans ce domaine.

1.4 CONCLUSION (2)

Si le problème des odeurs est effectivement pris en compte dans la réglementation, on constate que des difficultés techniques d'ordre métrologique n'ont pas permis de généraliser l'imposition de valeurs limites quantifiées de rejets concernant les odeurs.

Les efforts engagés en matière de métrologie des odeurs doivent être poursuivis pour répondre aux besoins issus de la réglementation, tant en ce qui concerne l'olfactométrie, les techniques de prélèvement ou d'échantillonnage de gaz odorants ou bien les techniques d'identification et de quantification des molécules chimiques responsables des odeurs.

La réduction des émissions polluantes au niveau requis pour une protection satisfaisante de l'environnement, si elle constitue rarement un investissement productif, est néanmoins susceptible de présenter des retombées tout à fait positives en terme d'image de marque pour l'entreprise.

La prévention des pollutions apparaît, ainsi, comme un domaine où les moyens d'action sont essentiellement d'ordre réglementaire. De ce fait, les pays développés ont généralement fondé leur stratégie pour la prévention des pollutions sur la mise en œuvre des meilleures techniques disponibles, économiquement supportable.

Des systèmes d'aide financière ont donc dû être mis en place pour inciter au développement des nouvelles techniques antipollution et pour démontrer l'efficacité et l'économie de ces procédés nouveaux ou améliorés.

Par ailleurs, la mise en œuvre de taxes sur les émissions polluantes à un taux suffisant peut permettre une réduction rapide des émissions. Il suffit qu'en l'absence d'un traitement efficace des rejets, le montant à acquitter soit notablement plus élevé que le coût total de mise en œuvre des moyens qui seraient nécessaires pour réduire les émissions polluantes concernées.

En application du principe pollueur / payeur, la France a mis en place une taxe sur les émissions d'oxydes de soufre des grandes installations, d'un taux modéré, n'impliquant pas ce risque économique. Les fonds ainsi collectés permettent, d'une part, de développer de nouvelles techniques et, d'autre part, ils sont redistribués aux industriels assujettis à la taxe qui réalisent des investissements pour réduire leur pollution.

REGLEMENTATION - TEXTES

(Liste non exhaustive)

- * Loi du 19 juillet 1976 et décret du 21 septembre 1977
- * Arrêté du 25 janvier 1991 relatif aux installations d'incinération de résidus urbains
- * Décret du 11 mai 1990 instituant une taxe parafiscale sur la pollution atmosphérique
- * Arrêté du 27 juin 1990 relatif aux grandes installations de combustion
- * Instructions techniques du 25 août 1988 relatives aux ateliers de prélaquage
- * Instructions techniques du 5 avril 1988 relatives aux ICPE, concernant les ateliers de reproduction graphique
- * Circulaire du 11 juin 1987 relatives aux ICPE, réduction des émissions de solvants à l'atmosphère lors de l'application de peinture aux carrosseries automobiles
- * Arrêté du 4 septembre 1986 relatif à la réduction des émissions d'hydrocarbures provenant des activités de stockage
- * Circulaire du 23 juin 1986 relative aux ateliers d'extraction d'huiles végétales par solvants inflammables
- * Arrêté du 26 septembre 1985 relatif aux ateliers de traitement de surface
- * Circulaire du 10 février 1984 relative aux ICPE, fabrication de produits contenant de l'amiante
- * Circulaire du 22 mars 1983 relative aux brasseries relevant du régime d'autorisation
- * Arrêté du 1er février 1983 relatif aux abattoirs de boucheries
- * Arrêté du 1er octobre 1982 relatif aux installations d'élevage de volailles relevant du régime d'autorisation
- * Circulaire du 18 décembre 1981 relative aux pollutions dues aux élevages de veaux de boucherie et/ou de bovins à l'engrais relevant du régime d'autorisation
- * Circulaire du 18 décembre 1977 relatif à l'arrêté du 20 juin 1975 concernant l'équipement et l'exploitation des installations thermiques en vue de réduire la pollution atmosphérique et d'économiser l'énergie
- * Décret du 21 septembre 1977 relatif aux prescriptions générales imposées aux ICPE
- * Circulaire du 29 juin 1977 relative à la prévention des pollutions et nuisances des équarrissages

- * Circulaire du 12 août 1976 relative aux porcheries
- * Arrêté du 20 juin 1975 concernant l'équipement et l'exploitation des installations thermiques en vue de réduire la pollution atmosphérique et d'économiser l'énergie
- * Circulaire du 8 août 1974 relative aux distilleries de jus de betteraves, de mélasses et distilleries vinicoles
- * Circulaire du 31 juillet 1974 relative aux nuisances des ateliers d'acide nitrique
- * Décret du 13 mai 1974 relatif au contrôle des émissions polluantes
- * Circulaire du 13 août 1971 relative à la construction des cheminées dans le cas des installations émettant des poussières fines
- * Circulaire du 24 novembre 1970 relative à la construction des cheminées dans le cas des installations de combustion
- * Loi du 2 août 1961 relative à la pollution atmosphérique

BIBLIOGRAPHIE

- 1) Rolland S. (1990), Odeurs, réglementation française et développements possibles, conférence I.S.F & A.F.I.T.E., Pollutec 90, Eurexpo Lyon, 20 novembre 1990
- 2) Olier J.Ph., Allary A., Milhau A., Seminel M. (1989), Stratégie de réduction des pollutions atmosphériques : bilan de l'action de l'Agence pour la Qualité de l'Air dans le domaine des pollutions gazeuses, Poll. Atm., avril-juin, 168-175
- 3) Olier J.Ph., Allary A., Milhau A., Seminel M. (1989), La prévention de la pollution atmosphérique produite par l'incinération des ordures ménagères, T.S.M.-L'Eau, 9, 491-497
- 4) Bartaire J.G. (1990), La politique de la Commission des Communautés Européennes en matière de pollution atmosphérique, Poll. Atm., octobre

2 - QUALITE DE L'AIR : ASPECTS NORMATIFS

2.1 LA NORMALISATION : SES APPORTS

2.1.1 GENERALITES

La norme, en particulier dans les secteurs de l'Environnement, est souvent considérée sous son aspect réglementaire : les normes d'émission, par exemple, sont des valeurs limites à caractère réglementaire (d'application obligatoire) ou ont valeur de recommandation, d'objectif à atteindre.

Les normes élaborées au sein de l'Afnor sont d'application volontaire, hormis certaines d'entre elles qui, pour des raisons évidentes d'hygiène et de sécurité, sont rendues obligatoires par décret ou par arrêté (par exemple la norme NF sur les casques de moto).

2.1.2 DEFINITION DE LA NORME

Selon sa mission officielle : "la normalisation a pour objet de fournir des documents de référence comportant des solutions à des problèmes techniques et commerciaux concernant les produits, biens et services qui se posent de façon répétée dans les relations entre partenaires économiques, scientifiques, techniques et sociaux (décret 84-74)".

D'un point de vue plus pratique, la norme est un document de référence, réalisé de manière consensuelle au sein de commissions de normalisation.

2.1.3 ROLE DE L'AFNOR : ELABORATION ET PROMOTION DES NORMES

Dans ce paysage, l'Afnor a pour fonction de s'assurer de la bonne qualité des documents normatifs qu'elle édite, en vérifiant le bien fondé de la normalisation dans tel ou tel secteur et en pratiquant une consultation optimale auprès des acteurs concernés.

L'Afnor, d'autre part, siège dans les organismes de normalisation internationaux. Elle est donc à ce titre la courroie de transmission entre ces organismes et les partenaires socio-économiques français.

2.2 LA QUALITE DE L'AIR

La normalisation en qualité de l'air concerne essentiellement les méthodes de mesure des composés de l'air et les questions annexes : Terminologie, Echantillonnage, méthodes d'évaluation des appareils et traitement statistique des données. En aucun cas, elle ne fixe de valeurs limites, le choix des méthodes étant néanmoins intimement lié aux ordres de grandeur des concentrations de composés à mesurer.

Les organismes au sein desquels sont élaborées les normes sont au nombre de trois. Traitant des mêmes sujets, leurs structures et leurs programmes de travail sont intimement liés.

2.3 L'ISO (INTERNATIONAL STANDARDISATION ORGANISATION)

2.3.1 REGLES DE FONCTIONNEMENT

La principale caractéristique des normes internationales est que les pays membres conservent une totale liberté quant à leur reprise comme norme nationale.

Il est à noter, d'autre part, que chaque pays participant dispose d'une seule voix pour exprimer son opinion.

Ces deux remarques soulignent les différences majeures avec les statuts du CEN (Comité Européen de Normalisation).

2.3.2 LA NORMALISATION INTERNATIONALE EN QUALITE DE L'AIR

L'ISO élabore les normes internationales sur la qualité de l'air au sein du Comité Technique 146 (ISO/TC 146 "Qualité de l'Air"), à secrétariat allemand (DIN-VDI (1)) et à présidence hollandaise.

Celui-ci est organisé en quatre Sous-Comités, organisés eux mêmes en Groupes de Travail et traite d'un certain nombre de composés dont beaucoup sont couverts par les directives européennes (entre autres : SO₂, NO_X, poussières, ainsi que les procédures d'évaluation des méthodes de mesure).

L'Afnor participe à ces quatre Sous Comités, ainsi que la RFA, les Pays Bas, le Royaume Uni, les USA, le Canada, pour ne citer que les plus importants.

2.4 LE CEN (COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION)

2.4.1 REGLES DE FONCTIONNEMENT

Les pays membres de droit du CEN sont les douze pays de la Communauté Européenne, ainsi que les six pays membres de l'AELE (2).

a - Obligation de reprise

Dans le but d'accomplir l'harmonisation, obligation est faite aux pays membres de la Communauté Européenne de reprendre les normes européennes dans leur propre catalogue et d'y supprimer toute norme nationale existante qui pourrait présenter des contradictions avec ces normes européennes.

On comprend dès lors la grande importance que revêtent ces travaux et les incidences que la normalisation communautaire peut avoir sur le paysage industriel national.

b - Statu-quo

Cette obligation de reprise est complétée par le principe de "statu quo", selon lequel, dès qu'un sujet est inscrit au programme du CEN, les pays membres ont interdiction (sauf rare dérogation) de publier de norme sur le sujet (hormis des projets de norme qui auraient déjà atteint le stade d'enquête probatoire).

En d'autres termes, les pays membres peuvent travailler sur un sujet traité au CEN, mais seulement dans le cadre CEN.

c - Vote à majorité qualifiée

Enfin, il est à noter, pour en finir avec ce bref et non-exhaustif descriptif du CEN, que les votes se font à majorité pondérée ou la RFA, le Royaume Uni, l'Italie et la France sont majoritaires.

2.4.2 La normalisation en qualité de l'air au CEN

Les structures existantes au CEN qui traitent de la Qualité de l'Air figurent dans le tableau 1.

a - CEN/TC 137

En 1987 a été créé le Comité Technique 137 (CEN/TC 137) intitulé "Substances dangereuses sur les lieux de travail". Celui-ci fait partie d'un ensemble de Comités Techniques créés à la demande de la Commission pour traiter des questions d'hygiène et de sécurité dans le travail (protection individuelle, machines dangereuses, ..).

b - CEN/TC 264

En 1991 a été créé le Comité Technique 264 (CEN/TC 264) "Qualité de l'air" dont le secrétariat a été confié au VDI, comme pour l'ISO/TC 146.

Trois groupes de travail ont été créés :

- GT 1 : Dioxines à l'émission
- GT 2 : Odeurs
- GT 3 : HCl à l'émission / méthode manuelle

Deux de ces groupes de travail (le GT 1 et le GT 2) sont sous mandat ; cela signifie que les normes qu'ils préparent ont fait l'objet d'une commande de la part de la Commission des Communautés Européennes afin de fournir à la DG XI "Environnement" des méthodes de mesures de référence en application de la future directive sur l'incinération des déchets dangereux.

2.4.3 Relations ISO/CEN

Il existe des accords entre l'ISO et le CEN, dits "Accords de VIENNE", qui établissent des règles générales de collaboration entre les deux organismes pour éviter une duplication des travaux.

2.5 L'AFNOR

2.5.1 COMMISSIONS FRANÇAISES

L'Afnor de son côté, gère un certain nombre de commissions de normalisation françaises dont la structure s'apparente à celle de l'ISO/TC 146.

Elles sont au nombre de 7 :

- La commission X43A, commission générale "Qualité de l'Air", traite des questions de stratégie et d'orientation générale ainsi que des problèmes de financement.
- Les commissions de normalisation suivantes au sein desquelles sont élaborés les textes de normes ; ce sont elles qui font les choix techniques :
 - X43B "Emissions de sources fixes"
 - X43C "Air des lieux de travail"
 - X43D "Air Ambient"
 - X43E "Aspects généraux"
 - X43F "Mesures olfactométriques"
 - X43I "Air intérieur"
 - X43T "Terminologie"

2.5.2 LEURS MISSIONS

Ces commissions, composées d'experts et de représentants des administrations concernés, ont pour première mission d'élaborer des normes françaises.

Elles ont déjà permis la réalisation d'une cinquantaine de normes.

Leur seconde tâche concerne le suivi et la participation aux travaux européens et internationaux.

2 6 LES OBJECTIFS

2 6.1 SUIVRE L'ISO ET LE CEN

Les deux actions (française et internationale) sont interdépendantes ; il est en effet inconcevable que les commissions françaises établissent leur programmes dans une optique franco-française, et que la normalisation européenne et/ou internationale soit élaborée sans les apports des expertises et savoirs faire français.

Ainsi, la liste de projets de norme actuellement à l'étude a été élaborée en considérant :

- les besoins français exprimés par les administrations et les secteurs industriels concernés,
- les besoins ou les demandes de normalisation exprimés par nos partenaires européens et internationaux.

2 6.2 PARTICIPER

Les commissions répondent aux consultations des organes de travail internationaux et délèguent des experts à leurs réunions.

2 6.3 PRENDRE DES INITIATIVES

L'Afnor a pu assumer, avec le concours d'experts français et le soutien du ministère de l'Environnement et de l'Agence pour la Qualité de l'Air, le secrétariat de certains groupes de travail ISO et proposer des normes françaises.

Elle gère d'autre part le secrétariat du CEN/TC 264/GT 3 "HCI".

2 6.4 OLFACTOMETRIE

Au sein de la commission X43F "olfactométrie", deux normes ont été publiées :

- NF X 43-101 (Déc. 1986) Méthode de mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux - Détermination du facteur de dilution au seuil de perception.
- NF X 43-104 (Mars 1990) Atmosphères odorantes - Méthodes de prélèvement.
- NF X 43-103 Mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux - Méthodes supraliminaires (en préparation).

Les deux normes X43-101 et X43-104 ont été proposées au groupe "Odeurs" du CEN/TC 264 comme projets de normes européennes.

2 6.5 LES MOYENS

Pour réaliser ces objectifs, l'Afnor poursuit actuellement, avec le soutien du Ministère de l'Environnement, de l'Agence pour la Qualité de l'air et des commissions de normalisation concernées, la gestion du dispositif de travail et d'information qui permet de répondre efficacement aux évolutions techniques et réglementaires du secteur aux trois niveaux : national, européen et international.

L'élaboration des normes, nous le rappelons, est un travail consensuel. La participation de tous les acteurs concernés est donc indispensable pour garantir la qualité et la pertinence des documents produits.

Pour toutes informations complémentaires contacter Pascale MIENVILLE :

AFNOR (Association Française de Normalisation) Tel : (1) 42 91 58 37

- (1) DIN : Deutsch Institut fur Normalisation
- VDI : Verein Deutscher Ingenieure
(Association d'Ingénieurs Allemands)
- (2) AELE : Association Européenne de Libre Echange :
(constituée des pays suivants : Autriche, Danemark, Finlande, Norvège, Suède et Suisse)

**QUALITE DE L'AIR - INSTANCES DE NORMALISATION
DECEMBRE 1991**

FRANCAISES (Afnor)	EUROPEENNES (CEN)	INTERNATIONALES(ISO)
QUALITE DE L'AIR		
Commission Générale X 43 A <u>Président</u> : M. HERZ (Directeur de l'AQA)	CEN/TC 264 "Qualité de l'Air" <u>Président</u> : M. VICARD (Lab SA) <u>Secr.</u> : M. GREFEN (RFA)	ISO/TC 146 "Qualité de l'Air" <u>Président</u> : M. ARONDS (NL) <u>Secr.</u> : M. GREFEN (RFA)
EMISSIONS DE SOURCES FIXES		
Com. de Normalisation X 43 B <u>Président</u> : M. HAMELIN (AQA)	CEN/TC 264/GT 1 "Dioxines" (RFA) SEN/TC 264/GT 3 "HCl" (F)	ISO/TC 146/SC 1 <u>Président</u> : M. ARONDS (NL) <u>Secr.</u> : M. VAN DER BERG
AIR DES LIEUX DE TRAVAIL		
Com. de Normalisation X 43 C <u>Président</u> : M. BAZIN (INRS)	CEN/TC 137 "Substances dangereuses sur lieux de travail" <u>Président</u> : M. BLOME <u>Secr.</u> : M. GEGUSCH (RFA)	ISO/TC 146/SC 2 <u>Président</u> : M. BARTLAY (USA) <u>Secr.</u> : M. KENNEBECK
AIR AMBIANT		
Com. de Normalisation X 43 D <u>Président</u> : M. HOUDRET (ENSTIMD)		ISO/TC 146/SC 3 <u>Président</u> : M. ROOK (USA) <u>Secr.</u> : M. PUZAK (USA)
ASPECTS GENERAUX		
Com. de Normalisation X 43 E <u>Président</u> : M. MONTAMAT (LNE)		ISO/TC 146/SC 4 <u>Président</u> : M. CUMMINGS (GB) <u>Secr.</u> : M. WEBER (RFA)
MESURES OLFACTOMETRIQUES		
Com. de Normalisation X 43 F <u>Président</u> : M. MACLEOD (ENSIA)	CEN/TC 264/GT 2 "Odeurs" (NL)	
AIR INTERIEUR		
Com. de Normalisation X 43 I <u>Président</u> : M. ALLIOT (PANOL)		

ANNEXE 5

LISTES DES PRINCIPAUX ACTEURS DANS LE DOMAINE DES ODEURS

**PRINCIPALES SOCIETES ACTIVES DANS LE DOMAINE DE L'ANALYSE,
DE LA MESURE ET DU TRAITEMENT DES NUISANCES OLFACTIVES.**

(Liste non exhaustive)

ANALYSE ET MESURE DE GAZ - MATERIELS**U.V. et visible - Paramagétisme - Electrochimie - Chimie -
Chromatographie gazeuse - Spectrométrie de masse.**

ABB Kent (Les Ulis) Tel : (1) 69 07 91 00
AINF (Paris) Tel : (1) 34 25 07 07
ALFA-LAVAL (Les Clayes sous Bois) Tel:(1) 30 55 04 04
APAVE (Paris) Tel : (1) 45 66 99 44
ARELCO ARC (Fontenay sous Bois) Tel : (1) 43 94 06 09
COMSATEC (Paris) Tel : (1) 42 01 51 91
CONTROLE ET PREVENTION (Paris) Tel : (1) 40 54 64 74
CORECI (Courbevoie) Tel : (1) 43 34 91 31
COSMA (Igny) Tel : 69 41 03 90
DELSI INSTRUMENTS (Suresnes) Tel : (1) 45 06 52 22
E.G.C.I. PILLARD (Marseille) Tel : 91 79 90 21
ENDRESS + HAUSER (Boissy st Léger) Tel : (1) 45 95 97 97
FOXBORO (St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 55
GRUTER & MARCHAND (Nanterre) Tel : 47 21 56 81
HARTMANN & BRAUN (Bagnole) Tel : (1) 43 62 13 15
HERMANN MORITZ (Chassant) Tel : 37 49 43 19
LEEDS & NORTHRUP (St Cyr) Tel : (1) 34 60 61 61
LEYBOLD (Les Ulis) Tel: (1) 69 07 64 00
MAIR (Boulogne) Tel : (1) 46 04 81 11
MCC (Mesure Contrôle Commande) (Issoudun) Tel : 54 21 44 14
M.S.A.(St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 44
NICOLET INSTRUMENTS (Plaisir) Tel : (1) 30 54 00 97
PANAMETRICS (La Garenne Colombes) (1) 47 82 42 81
PHILIPS IC (Bobigny) Tel : (1) 48 30 11 11
RECOMAT (La Garenne-Colombe) Tel : (1) 47 82 42 81
ROSEMOUNT (Paris) Tel (1) 42 00 11 05
SCHAEFER TECHNIQUES (Nozay) Tel : (1) 69 01 49 73
SERES (Aix-en-Provence) Tel : (42) 24.49.10
SIEMENS (St Denis) Tel : (1) 49 22 31 00

TESTOTERM (Forbach) Tel : 87 85 34 35

ZIVY (Gennevilliers) Tel : (1) 47 98 82 93

**Absorption de rayonnement - Chimie Luminescence -
Fluorescence - Infrarouge.**

ABB Kent (Les Ulis) Tel : (1) 69 07 91 00

AINF (Paris) Tel : (1) 34 25 07 07

ALFA-LAVAL (Les Clayes sous Bois) Tel:(1) 30 55 04 04

APAVE (Paris) Tel : (1) 45 66 99 44

ARELCO ARC (Fontenay sous Bois) Tel : (1) 43 94 06 09

BRUEL & KJAER (Paris) Tel : (1) 64 57 20 10

COMSATEC (Paris) Tel : (1) 42 01 51 91

CONTROLE ET PREVENTION (Paris) Tel : (1) 40 54 64 74

CORECI (Courbevoie) Tel : (1) 43 34 91 31

COSMA (Igny) Tel : 69 41 03 90

E.G.C.I. PILLARD (Marseille) Tel : 91 79 90 21

ENRAF NONIUS (Versailles) Tel : (1) 45 09 04 04

ENVIRONNEMENT SA (Poissy) Tel : (1) 39.79.34.57

FOXBORO (Paris) Tel : (1) 42 01 51 91

HARTMANN & BRAUN (Bagnole) Tel : (1) 43 62 13 15

HERMANN MORITZ (Chassant) Tel : 37 49 43 19

INSTRUMAT (Les Ulis) Tel : (1) 69 28 27 34

LEEDS & NORTHRUP (St Cyr 78 210)

LEYBOLD HERAEUS SOGEV (Les Ulis) Tel: (1) 69 07 64 00

MAIR Tel : (1) 46 04 81 11

MCC (Mesure Contrôle commande) (Issoudun) Tel : 54 21 44 14

M.S.A.(St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 44

NICOLET INSTRUMENTS (Plaisir) Tel : (1) 30 54 00 97

OSI (Paris) Tel : (1) 45 54 97 31

PANAMETRICS (La Garenne Colombes) (1) 47 82 42 81

PHILIPS IC (Bobigny) Tel : (1) 48 30 11 11

RECOMAT (La Garenne-Colombes) Tel : (1) 47 82 42 81

ROSEMOUNT (Paris) Tel (1) 42 00 11 05

SCHAEFER TECHNIQUES (Nozay) Tel : (1) 69 01 49 73

SICK OPTIQUE ELEC.(Marne-la-Vallée) (1) 60 05 90 15

SIEMENS (St Denis) Tel : (1) 49 22 31 00)

TECHMATION (Paris) Tel : (1) 42 00 11 05

Gaz toxiques

AINF (Paris) Tel : (1) 34 25 07 07
AIR LIQUIDE (Paris) (1) 42 91 93 47
ALFA-LAVAL (Les Clayes sous Bois) Tel:(1) 30 55 04 04
APAVE (Paris) Tel : (1) 45 66 99 44
ARELCO ARC (Fontenay sous Bois) Tel : (1) 43 94 06 09
BRUEL & KJAER (Paris) Tel : (1) 64 57 20 10
CONTROLE ET PREVENTION (Paris) Tel : (1) 40 54 64 74
COSMA (Igny) Tel : 69 41 03 90
DRAEGER-BRANDT (Strasbourg) Tel : 88 39 18 47
E.G.C.I. PILLARD (Marseille) Tel : 91 79 90 21
ENDRESS + HAUSER(Boissy st Léger) Tel : (1) 45 95 97 97
ENVIRONNEMENT SA (Poissy) Tel : (1) 39.79.34.57
GRUTER & MARCHAND (Nanterre) Tel : 47 21 56 81
HARTMANN & BRAUN (Bagnolet) Tel : (1) 43 62 13 15
HERMANN MORITZ (Chassant) Tel : 37 49 43 19
INSTRUMAT (Les Ulis) Tel : (1) 69 28 27 34
MAIR Tel : (1) 46 04 81 11
M.S.A.(St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 44
PANAMETRICS (La Garenne Colombes) (1) 47 82 42 81
RECOMAT (La Garenne-Colombes) Tel : (1) 47 82 42 81
ROSEMOUNT (Paris) Tel (1) 42 00 11 05
SCHAEFER TECHNIQUES (Nozay) Tel : (1) 69 01 49 73

Contrôle de la pollution atmosphérique

AINF (Paris) Tel : (1) 34 25 07 0
APAVE (Paris) Tel : (1) 45 66 99 44
ARELCO ARC (Fontenay sous Bois) Tel : (1) 43 94 06 09
BIOBLOCK SCIENTIFIC (Illkirch) Tel : 88 67 14 14
BUREAU VERITAS (Courbevoie) (1) 42 91 52 91
CETEN APAVE INTERNATIONAL(Paris)Tel:(1) 45 66 99 44
CONTROLE ET PREVENTION (Paris) Tel : (1) 40 54 64 74
CORECI (Courbevoie) Tel : (1) 43 34 91 31
COSMA (Igny) Tel : 69 41 03 90
DELSI INSTRUMENTS (Suresnes) Tel : (1) 45 06 52 22
DRAEGER-BRANDT (Strasbourg) Tel : 88 39 18 47
ENDRESS + HAUSER (Boissy st Léger) Tel : (1) 45 95 97 97

ENVIRONNEMENT SA (Poissy) Tel : (1) 39.79.34.57
GRUTER & MARCHAND (Nanterre) Tel : 47 21 56 81
LEYBOLD (Les Ulis 91 940) Tel: (1) 69 07 64 00
MAIR Tel : (1) 46 04 81 11
M.S.A.(St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 44
OSI (Paris) Tel : (1) 45 54 97 31
PANAMETRICS (La Garenne Colombes) (1) 47 82 42 81
RECOMAT (La Garenne-Colombes) Tel : (1) 47 82 42 81
ROSEMOUNT (Paris) Tel (1) 42 00 11 05
ROUCAIRE (Vélizy) Tel : (1) 39 46 96 33
SCHAEFER TECHNIQUES (Nozay) Tel : (1) 69 01 49 73
S2IS (Marne-la-Vallée) Tel : 60 05 87 94
SIEMENS (St Denis) Tel : (1) 49 22 31 00
SOCOTEC ENV.(Lyon) Tel : 78 60 12 68
SOLOMAT (Evry) Tel : 60 77 89 90
TECHMATION (Paris) Tel : (1) 42 00 11 05

Mesure et contrôle de l'émission des gaz et poussières

ARELCO ARC (Fontenay sous Bois) Tel : (1) 43 94 06 09
BECKMAN (Gagny) Tel : (1) 43 01 70 00
BUREAU VERITAS (Courbevoie) (1) 42 91 52 91
CONTROLE ET PREVENTION (Paris)Tel : (1) 40 54 64 74
CORECI (Courbevoie) Tel : (1) 43 34 91 31
COSMA (Igny) Tel : 69 41 03 90
DITECO (Vitrolles) Tel : 42 89 40 33
E.G.C.I. PILLARD (Marseille) Tel : 91 79 90 21
ENDRESS + HAUSER (Boissy st Léger) Tel : (1) 45 95 97 97
EMISSION SA (Poissy) Tel : (1) 39.79.34.57
GRUTER & MARCHAND (Nanterre) Tel : 47 21 56 81
INSTRUMAT (Les Ulis) Tel : (1) 69 28 27 34
MAIR Tel : (1) 46 04 81 11
M.S.A.(St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 44
OLDHAM FRANCE (Arras) Tel : 21 73 21 34
OSI (Paris) Tel : (1) 45 54 97 31
PANAMETRICS (La Garenne Colombes) (1) 47 82 42 81
SCHAEFER TECHNIQUES (Nozay) Tel : (1) 69 01 49 73
SERES (Aix-en-Provence) Tel : (42) 24.49.10
SICK OPTIQUE ELEC.(Marne-la-Vallée) (1) 60 05 90 15

SIEMENS (St Denis) Tel : (1) 49 22 31 00

SOCOTEC ENV.(Lyon) Tel : 78 60 12 68

ZIVY (Gennevilliers) Tel : (1) 47 98 82 93

Ambiance de travail

AINF (Paris) Tel : (1) 34 25 07 0

APAVE (Paris) Tel : (1) 45 66 99 44

ARELCO ARC (Fontenay sous Bois) Tel : (1) 43 94 06 09

BIOBLOCK SCIENTIFIC (Illkirch) Tel : 88 67 14 14

CETEN APAVE INTERNATIONAL (Paris Tel:(1) 45 66 99 44

CONTROLE ET PREVENTION (Paris) Tel : (1) 40 54 64 74

DELSI NERMAG INSTRUMENTS (Suresnes) Tel : (1) 45 06 52 22

DRAEGER-BRANDT (Strasbourg) Tel : 88 39 18 47)

ENVIRONNEMENT SA (Poissy) Tel : (1) 39.79.34.57

ENDRESS + HAUSER (Boissy st Léger) Tel : (1) 45 95 97 97

MAIR Tel : (1) 46 04 81 11

M.S.A.(St Ouent) Tel : (1) 30 37 88 44

PANAMETRICS (La Garenne Colombes) (1) 47 82 42 81

RECOMAT (La Garenne-Colombes) Tel : (1) 47 82 42 81

ANALYSE (OLFACTOMETRIE)

C.E.A (Commissariat à l'Energie Atomique), Laboratoire d'Olfactométrie,
Fontenay-aux-Roses (1) 46 54 72 04

ASSOCIATIONS - CENTRES DE DOCUMENTATION - CENTRES DE RECHERCHE

AFNOR (Paris) Tel : (1) 42 91 58 37

A.Q.A. (Agence pour la Qualité de l'Air) (Courbevoie) Tel : (1) 49 01 45 45

CITEPA (Centre Techn de Pollution Atmosphérique) (Paris) Tel : (1) 45 27 12 88

Club CRIN "Parfums et Odorat (Association CRIN, Paris) Tel : (1) 45 50 48 11

Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes Laboratoire Chimie des Nuisances
et Génie de l'Environnement Tel : 99 36 29 95

Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques (Nancy) Tel : 83 35 21 21

Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Génie Chimique (Toulouse) Tel : 61
52 92 41

Ecole des Mines d'Alès, Département.Génie de l'Environnement Tel : 66 78 53 70

I.E.I. (Institut de l'Environnement International), Club "Odeurs" (Aix-les-Bains)

Tel : 79 88 20 00

INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) (ex

CERCHAR), (Verneuil-en-Halatte) Tel : (1) 44 55 66 77

RECORD, Groupe Odeurs et Désodorisation (Villeurbanne) Tel 72 43 81 88

Université de Technologie de Compiègne, Tel : 44 23 44 23

PROCEDE DE TRAITEMENT (FOURNISSEURS)

ABSORPTION

AAF (Paris) Tel : (1) 42 67 68 63

Air Industrie Environnement (AIE) Tel : (1) 39 73 92 15

BEFS (ex départ. ASOLVAIR de CARGOCAIR) Tel : 45 04 52 09

CCM SULZER (Mantes-la-Ville) (1) 34 77 70 00

DEGREMONT (Rueil Malmaison) Tel : (1) 42 04 90 00

DELTA NEU * (Marcq-en-Baroeul) Tel : 20 45 64 56

FLAKT INDUSTRIE (Viroflay) Tel : (1) 39 49 39 00

LAB SA (Lyon) Tel : 78 63 70 90

LAMY (Caluire) Tel : (78) 23.21.73

LURGI (Saint-Cloud) Tel : (1) 49.11.37.00

OTV (Courbevoie) Tel : (1) 49 04 45 91

PEABODY FRANCE (Nanterre) Tel : 780.71.23

SAPS (St Romain en Gal) Tel : 74 31 75 96

SIFAT (Uffholtz) Tel : 89 75 54 16

SOCREMATIC (St Ouent) Tel : (1) 34 64 93 50

SPEICHIM Cergy (1) 34 22 73 00

TGI (Plaisir) Tel : (1) 30 55 83 00

TNO* Apeldoorn (Pays-Bas) Tel : 31 (0315) 697 100

TROUVAY & CAUVIN (Le Havre) Tel : 35 25 62 62

WALTHER (Nancy) Tel : 83 51 28 19

WEMCO (Meyzieu) Tel : 72 02 56 00

* voie sèche ou semi-sèche

ADSORPTION

AMEG (Paris) Tel 45 66 30 00

CECA*(Paris la Defense) Tel (1) 49 04 12 34

CHEMVIRON* (Créteil) Tel : (1) 43 77 12 63

LURGI (Saint-Cloud) Tel : (1) 49.11.37.00

MUNTERS COMPOSANTS (Gennevilliers) (1) 47 99 19 15
NORIT* (Le Blanc Mesnil) Tel : (1) 45 91 08 08
PICA* (Levallois) Tel : (1) 47 39 60 40
SAPS (St Romain en Gal) Tel : 74 31 75 96
TGI (Plaisir) Tel : (1) 30 55 83 00
John ZINK (Argenteuil) Tel : 982.21.32
* fournisseurs de charbon actif

BIOFILTRATION

CIBA-GEIGY (Bâle, Suisse)
CLAIRTECH (Utrecht, Pays-Bas) Tel 31 30 94 83 94
COMPRIMO Gmbh (Hannovre, RFA)
GUILLEAUME-WERK (Bonn, RFA)
KARL EISENBACH Gmbh (Francfort, RFA)
OBI ÖKO-HUM (Märwil, Suisse) Tel : 071 81 22 11
OTV (Courbevoie) Tel (1) 49 04 46 64
SAPS (St Romain en Gal) Tel : 74 31 75 96
STEP SA (Dreux) Tel : 37 43 20 74
TNO (Apeldoorn, Pays-Bas) Tel : 31 (0315) 697 100

BIOLAVEUR

DAIMLER BENZ (Stuttgart, RFA)
NIRO ATOMIZER (Rueil-Malmaison) Tel : (1) 47 08 92 92

INCINERATION

AIR INDUSTRIE (Courbevoie) Tel : (1) 47 88.17.17
CALIQUA (Paris) Tel : 203.96.53
CARRIER (Suresne) Tel : 772.92.12
C.F.I. * (Montreuil) Tel : 858.91.01
ENGELHARD (Paris) Tel : 553.82.05
FERBECK & VINCENT (Velizy-Villacoublay) Tel : 946.96.26
FLAMECO-FRANCE * (Levallois-Perret) Tel : 757.85.58
FLAKT INDUSTRIE (Viroflay) Tel : (1) 39 49 39 00
HEURTEY (Paris) Tel : 267.44.00
HYGROTHERM (Manchester GB)
KATEC (Paris) Tel : 770.15.00
LAMY (Caluire) Tel : (78) 23.21.73

MAXON * (Rueil-Malmaison) Tel : 977.92.54
OXY-FRANCE (Antony) Tel : 668.03.12
PEABODY FRANCE (Nanterre) Tel : 780.71.23
PILLARD (Marseille) Tel : (91) 79.90.21
PYRO DIF * (Noisy-Le-Sec) Tel : 858.61.24
SARP INDUSTRIES (Limay) Tel : (1) 30 92 04 77
John ZINK (Argenteuil) Tel : 982.21.32

* constructeurs de brûleurs adaptés à l'incinération des effluents gazeux

OZONATION

ALTAIR (Lyon) Tel : 72 33 04 26
CHRIST (Cergy) Tel : (1) 30 32 62 63
COMPAGNIE DES EAUX ET DE L'OZONE (Paris) 1 42 94 03 03
DEGREMONT (Rueil Malmaison) Tel : (1) 42 04 90 00
OTV (Courbevoie) Tel : (1) 49 04 45 91
OZONIA (Rueil) Tel : 46 25 60 00
TRAILIGAZ (Garges les Gousses) Tel : (1) 39 86 60 29
WEDECO (Rambouillet) Tel : (1) 34 85 78 04