

L'assainissement de l'air des locaux de travail

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les Carsat, Cramif, CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, multimédias, site Internet...

Les publications de l'INRS sont distribuées par les Carsat. Pour les obtenir, adressez-vous au service Prévention de la caisse régionale ou de la caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collègue représentant les employeurs et d'un collègue représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'île-de France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, la caisse régionale d'assurance maladie d'île-de France et les caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.
Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle).
La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

Assainissement de l'air des locaux de travail

Ce document a été établi par un groupe de travail comprenant des spécialistes des Carsat/Cram et de l'INRS, en collaboration avec les syndicats professionnels.

Il est conçu comme un guide et un document de référence pour la conception, la conduite et le contrôle des installations d'assainissement de l'air.

Au sommaire :

- conception et fonctionnement des installations de rejet (avec ou sans traitement de l'air et récupération de l'énergie) et de recyclage ;
- étude, calcul et surveillance d'une installation de recyclage ;
- systèmes de récupération de la chaleur ;
- types d'épurateurs utilisables ;
- systèmes de surveillance d'une installation de recyclage.

Préambule

Ce document a été établi par un groupe de travail constitué sous l'égide de la CNAM et comprenant des spécialistes de ventilation et nuisances chimiques des Carsat/Cram et de l'INRS. Son élaboration a été effectuée après consultation des organismes professionnels suivants: Syndicat de l'aérotechnique, CETIAT, CETIM⁽¹⁾. Son but est de servir de guide et de document de référence à l'usage des personnes et organisations concernées par la conception, la conduite et le contrôle des installations d'assainissement de l'air des locaux de travail.

Les données présentées dans ce texte sont susceptibles d'évoluer en fonction de l'expérience acquise ou de modifications apportées sur le plan réglementaire.

Cette édition prend en compte les prescriptions réglementaires parues depuis 1984, c'est-à-dire :

- les décrets n^{os} 84-1093 et 84-1094 du 7 décembre 1984 (modifiés par le décret n^o 87-809 du 1^{er} octobre 1987) ;
- la circulaire d'application de ces décrets ;
- les arrêtés des 8 et 9 octobre 1987.

Lorsque les techniques de production ne permettent pas de supprimer les émissions de polluants dégagés au cours des activités industrielles (locaux à pollution spécifique), on doit mettre en œuvre des dispositifs de captage. L'air ainsi capté peut ensuite faire l'objet :

- d'un rejet à l'extérieur du bâtiment, après avoir subi éventuellement une épuration ou un traitement de récupération d'énergie ;
- d'un recyclage après épuration, vers le même local ou d'autres locaux où la pollution est de même nature.

Ce guide propose un recueil de recommandations à prendre en compte pour parvenir à la mise en place d'installations les plus satisfaisantes possibles.

Il contient :

- un bref rappel des méthodes de ventilation et des procédés actuels d'assainissement de l'air ;
- des recommandations pratiques applicables à chaque procédé ;
- une méthode déductive permettant d'identifier les cas où le recyclage est applicable.

Trois annexes techniques donnent des informations sur les différents procédés de récupération de chaleur, d'épuration de l'air sur les systèmes de surveillance de la qualité de l'air dans les locaux de travail, en particulier dans le cadre d'une installation de recyclage.

(1) CETIAT : Centre technique des industries aérotechniques et thermiques.

CETIM : Centre technique des industries mécaniques.

Sommaire

1. Généralités	4
1.1. Ventilation du local industriel. Définitions	4
1.2. Les procédés d'assainissement de l'air des locaux de travail	5
1.3. Valeurs limites d'exposition (VLEP)	6
2. Obligations réglementaires et recommandations relatives à la conception et au fonctionnement des installations	6
2.1. Rejet simple	6
2.2. Rejet avec récupération d'énergie	8
2.3. Rejet après traitement de l'air pollué	8
2.4. Rejet avec récupération d'énergie et traitement de l'air rejeté	9
2.5. Recyclage	9
2.6. Conclusion	12
3. Protocole visant à déterminer l'opportunité de l'installation d'un dispositif de recyclage	12
3.1. Première étape: étude préalable	12
3.2. Deuxième étape: choix des méthodes et des équipements de surveillance	14
3.3. Définition, Calcul de l'installation, Mise en route et surveillance	14
4. Conclusion générale	15
Annexes	16
Annexe 1. Systèmes de récupération de la chaleur	16
Annexe 2. Sélection des types d'épurateurs utilisables	20
Annexe 3. Systèmes destinés à la surveillance du fonctionnement d'une installation de recyclage	22
Bibliographie	24

Remarque importante

Ce guide pratique de ventilation ne s'intéresse qu'aux procédés d'assainissement de l'air des locaux de travail. Dans tout ce document, il est admis que l'air pollué est capté par les meilleurs moyens. Pour les problèmes spécifiques au captage de l'air pollué, le lecteur pourra se référer aux autres guides de cette série, parus ou à paraître.

1. Généralités

Lutter contre la pollution dans les ateliers et les locaux de travail consiste à réduire, à un niveau le plus faible possible, la quantité des polluants dont les effets sur l'homme sont reconnus ou soupçonnés : c'est le rôle de l'installation de ventilation.

1.1. Ventilation du local industriel – Définitions

L'assainissement d'un local à pollution spécifique (local où sont émis des polluants sous forme de gaz, vapeurs, aérosols solides ou liquides autres que ceux liés à la présence humaine) peut être réalisé par l'une des techniques de ventilation suivantes.

Ventilation locale

Le captage des polluants se fait dès leur émission, avant leur dispersion dans le local. Une telle ventilation peut être réalisée au niveau de l'outil ou du poste de travail.

Ventilation générale

Extraction de l'air pollué après dilution des polluants dans l'air. Elle peut être assurée de plusieurs façons :

- *ventilation mécanique*: introduction de l'air et extraction maîtrisées par des moyens mécaniques (ventilateurs et éventuellement gaines de répartition et de reprise d'air);
- *ventilation mixte*: introduction non maîtrisée de l'air par des ouvertures naturelles ou aménagées et extraction mécanique ou *vice versa*.

TABLEAU I

Les procédés d'assainissement de l'air des locaux industriels

	Rejet simple	Rejet avec récupération d'énergie	Rejet avec épuration de l'air	Rejet avec récupération et épuration	Recyclage
Épuration	NON	NON	OUI	OUI	OUI
Récupération d'énergie	NON	OUI	NON	OUI	OUI
Principes généraux	Après captage des polluants par ventilation locale ou après dilution des polluants par ventilation générale, rejet de l'air pollué à l'extérieur du local.	Rejet simple – transfert à l'air neuf introduit d'une partie de la chaleur de l'air extrait.	Rejet de l'air pollué après épuration préalable par un procédé adapté.	Combinaison des deux principes précédents.	Limité aux périodes hivernales. Traitement de l'air pollué par des épurateurs et réintroduction partielle ou totale de l'air épuré dans le local. Critères d'épuration plus sévères que dans le cas du rejet.
Domaines d'utilisation	Présence de polluants non éliminables par traitement ou peu nocifs. Procédé souvent associé à une ventilation générale.	Voir cas du rejet simple. S'applique particulièrement lorsque le rejet d'air réchauffé s'effectue à température élevée ou sous de forts débits.	S'applique lorsque les rejets non épurés provoqueraient une pollution de l'environnement dépassant les normes.	Combinaison des deux domaines précédents.	Lorsque les polluants sont identifiés et peuvent être éliminés par un procédé existant. Fortement déconseillé pour des polluants tels que allergènes et cancérogènes.
Inconvénients relatifs aux principes	Rejet de quantités d'air réchauffé parfois importantes. Pollution de l'environnement.	Pollution de l'environnement possible. Sujétions supplémentaires (entretien des échangeurs).	Rejet de quantités d'air réchauffé parfois importantes. Contrôles périodiques du fonctionnement de l'épurateur ou du niveau de pollution au rejet.	Contrôles périodiques du fonctionnement de l'installation et entretien.	La nécessité de surveiller le fonctionnement correct de l'installation pour des raisons de sécurité implique des contrôles permanents. Présence pratiquement permanente d'un certain taux de polluants dans le local.
Limites actuelles d'utilisation	Pas de limitation technologique en dehors des difficultés dues à l'abrasion provoquée par certaines poussières.	Pas de limitation technologique.	Difficultés de réalisations pratiques pour certains polluants.	Voir cas précédent.	Difficultés dans la mesure en continu du taux de pollution du local. Les défaillances du système ne sont pas toujours décelées rapidement, ce qui peut entraîner une forte élévation de la pollution du local. Entretien et surveillance à réaliser avec soin.

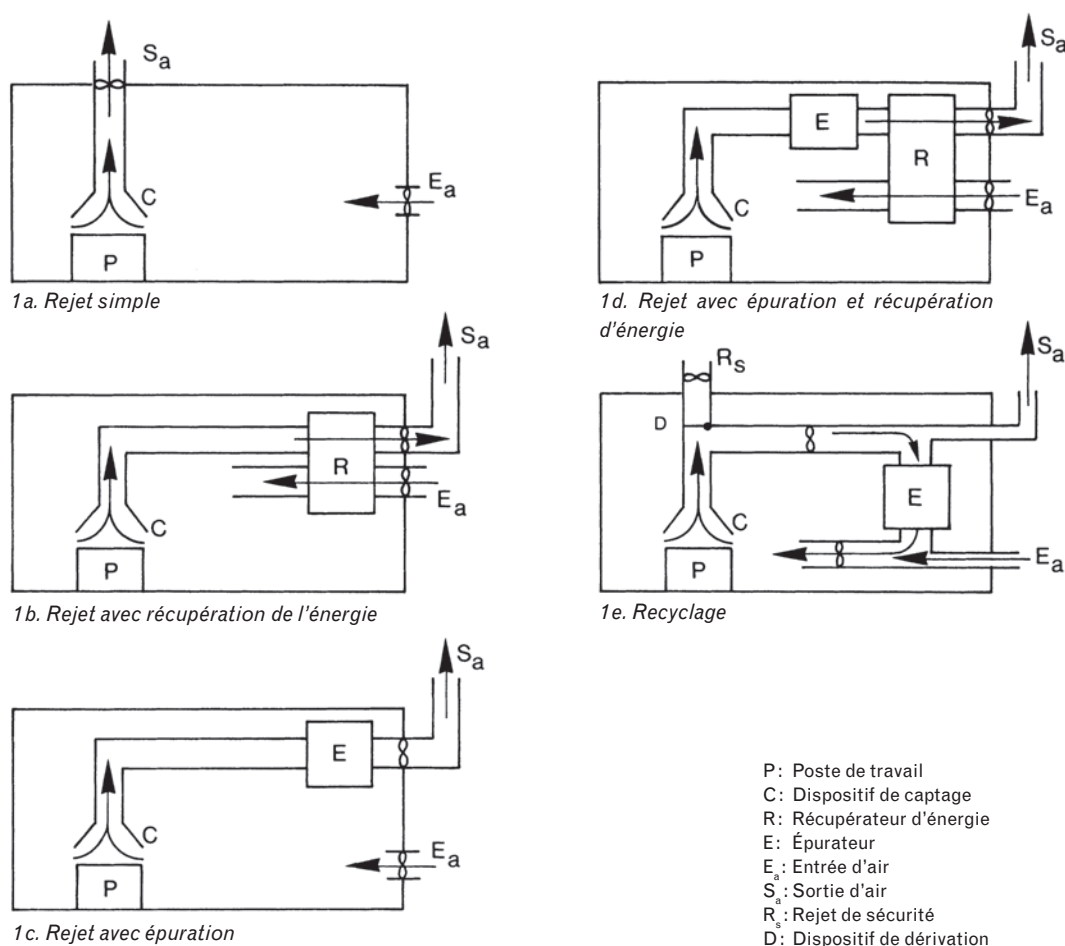


Figure 1. Différents procédés d'assainissement de l'air

Commentaires

Il est évident que pour assurer la maîtrise des conditions de ventilation d'un local, en particulier la pureté et la température de l'air introduit, la ventilation mécanique est recommandée. Son intérêt est d'autant plus sensible qu'elle s'applique aussi bien à la ventilation locale que générale. La ventilation mixte est utilisable lorsque l'introduction ou l'extraction de l'air est correctement assurée par des ouvertures dans les parois du local. Bien entendu, les procédés de ventilation ne s'utilisent pas indifféremment et le lecteur intéressé pourra se reporter utilement au guide pratique de ventilation n° 0, consacré aux principes généraux de ventilation (édition INRS ED 695).

1.2. Les procédés d'assainissement de l'air des locaux de travail

(tableau I)

L'air pollué peut faire l'objet soit d'un rejet, soit d'un recyclage.

Le rejet de l'air pollué à l'extérieur du local (fig. 1a à 1d) peut s'accompagner de récupération d'énergie et/ou d'épuration de l'air. L'épuration de l'air rejeté est à réaliser dans les cas où des normes de pollution sont établies au titre de la protection de l'environnement.

Le recyclage (fig. 1e) consiste à capter l'air pollué, à l'assainir par un traitement approprié et à le réintroduire dans le local.

Le rejet à l'extérieur est généralement coûteux en énergie de chauffage pendant l'hiver. De plus, l'éventuelle

récupération d'énergie n'est pas complète. Aussi le recyclage présente-t-il des avantages et les entreprises sont-elles souvent attirées par ce procédé. Cependant, il ne peut être appliqué à tous les cas de pollution et l'efficacité globale de l'installation est tributaire du fonctionnement de l'ensemble de ses éléments, qui peuvent être nombreux et variés selon la complexité du problème à traiter. L'utilisation du recyclage doit donc reposer sur le respect d'un minimum de règles qui seront exposées dans le chapitre suivant.

Le recyclage ne devrait pas fonctionner hors des périodes de chauffage ou de climatisation. De plus, le débit de recyclage ne doit pas être pris en compte dans le calcul du débit d'air neuf à introduire dans le local, fixé réglementairement en

fonction du nombre d'occupants et de la désignation du local.

1.3. Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)

En ce qui concerne les nuisances chimiques, l'objectif minimal à atteindre est le maintien de la salubrité de l'air dans les locaux de travail. Un bon système de référence consiste à utiliser les VLEP pour les concentrations de substance toxiques, que celles-ci soient issues de la réglementation, de normes ou de règles de l'art en la matière.

Pour la plupart des polluants gazeux et particulaires, les hygiénistes du travail proposent des VLEP en dessous desquelles une population exposée peut être considérée avec une forte probabilité à l'abri de tout risque de maladie d'origine professionnelle; **une réserve importante est cependant nécessaire pour les substances reconnues cancérigènes pour l'homme**, pour lesquelles les VLEP ne correspondent pas toujours à un seuil en dessous duquel on peut affirmer l'absence de risque pour toutes les personnes exposées et correspondent seulement à un compromis. **Il en est de même pour les substances allergènes** qui peuvent induire des troubles graves chez les personnes hypersensibilisées à des niveaux de concentration extrêmement faibles, parfois même non mesurables.

Les points essentiels, relatifs aux valeurs limites d'exposition, sont les suivants:

- il existe des valeurs limites d'exposition de court terme (VLCT) et des valeurs limites d'exposition sur 8 heures (VLEP8h); elles sont très variables suivant les pays;
- ces valeurs ont, la plupart du temps un caractère indicatif et sont susceptibles d'être modifiées en fonction de l'évolution des connaissances;
- elles ne concernent qu'un produit déterminé et non des mélanges, pour lesquels on applique quelquefois une règle empirique d'additivité;
- certains polluants font l'objet de valeurs réglementaires, les textes précisant généralement les modalités

des mesures de concentrations.

Le respect ou le non-respect de ces valeurs peut être vérifié par des mesures de concentration, qui sont différentes selon qu'il s'agit de se référer à une valeur moyenne (prélèvements de type individuel de longue durée ou multiple de courte durée avec pondération), ou à une valeur plafond (prélèvements effectués avec des appareils à temps de réponse court).

Remarque

En dehors des substances nocives, il peut exister dans l'atmosphère des produits inflammables pour lesquels il existe des limites d'explosivité; dans le cas de produits à la fois inflammables et toxiques, la valeur limite sera déterminée par la condition la plus restrictive, c'est-à-dire pratiquement par la valeur limite correspondant à la toxicité.

2. Obligations réglementaires et recommandations relatives à la conception et au fonctionnement des installations

Dans le domaine du rejet comme celui du recyclage, il convient de réaliser des installations dont la conception et le fonctionnement répondent à certaines règles à respecter sous peine de nuire à l'efficacité et à la fiabilité du système choisi. L'objet de ce chapitre est de dresser une liste aussi complète que possible des recommandations qu'il serait souhaitable de voir appliquées à chaque type d'installation: rejet avec ou sans récupération d'énergie, rejet avec ou sans épuration, recyclage.

2.1. Rejet simple

L'efficacité d'un tel dispositif est uniquement tributaire du captage des polluants et de l'introduction d'air «neuf» puisé à l'extérieur. Les problèmes de surveillance du bon fonctionnement de l'installation sont donc très simplifiés. Enfin, précisons que les extractions d'air pollué doivent être compensées en quantité égale par des apports d'air neuf et réchauffé si nécessaire.

2.1.1. Conception

Bien que comportant peu d'éléments, la conception d'une installation de rejet simple mérite tout de même la prise en compte d'un certain nombre de données relatives à la disposition et aux possibilités des divers équipements.

- Les éléments du système de captage doivent être munis des **dispositifs nécessaires à une vérification rapide de leur fonctionnement**: prises de pression statique, indicateurs de débits...

(Art. R. 4212-7, R.422-20, R. 4222-21, arrêtés du 8-9 octobre 1987)

- Les orifices de rejet de l'air pollué et d'introduction de l'air extérieur doivent être disposés de façon qu'**aucune réintroduction des polluants** ne puisse s'effectuer, quelles que soient les conditions climatiques. Dans certains environnements, il est souhaitable d'épurer l'air introduit ou tout au moins de vérifier sa salubrité.

- Les **débits de ventilation générale et de captage** doivent être établis en fonction des productions de polluants immédiates, des changements prévus à court terme dans les activités du local et de la turbulence occasionnée par les courants d'air.

(Art. R. 4222-12 et circ. du 9 mai 1985)

- Les **débits d'air rejeté et introduit** devraient pouvoir être notablement augmentés (par exemple doublés) afin de tolérer une augmentation sensible du débit des polluants (émission intense accidentelle) ou du nombre des points de captage.

- L'**air introduit dans le local** est généralement distribué par un **réseau de gaines et de bouches de**

soufflage. Celles-ci devront être disposées de telle manière que la répartition de l'air soit la plus homogène possible ; elles ne doivent pas réduire l'efficacité des systèmes de captage ni occasionner de gêne pour le personnel à cause de vitesses d'air excessives.

(Art. R. 4222-13 et circ. du 9 mai 1985)

- **L'installation de ventilation** doit être conçue de façon à ce qu'elle ne majore pas les niveaux sonores d'ambiance de plus de 2 dB(A), à moins que le niveau sonore engendré par son fonctionnement ne dépasse par 50 dB(A).

(Art. R. 4212-2 et circ. du 9 mai 1985)

- Une notice d'instructions doit être remise au chef d'établissement par le maître d'ouvrage. Cette notice fait partie du **dossier de l'installation** qui est tenu à la disposition des organismes et personnes chargées de la sécurité du travail. En dehors des valeurs de référence (voir paragraphe suivant), cette notice doit comporter des informations générales, telles que :

- schéma de circulation de l'air entre les différents locaux ;
- justification des solutions retenues pour l'assainissement ;
- indication du ou des polluants représentatifs de la pollution ambiante, c'est-à-dire pour le respect des valeurs limites d'exposition ;
- hypothèses de calcul ;
- conditions de fonctionnement et d'entretien des équipements, ainsi que les causes de pannes et leurs remèdes ;
- caractéristiques des systèmes de surveillance mis en œuvre et des moyens de contrôle de ces systèmes.

(Art. R. 4212-7, R. 4222-21, circ. du 9 mai 1985 et art. 2 et 4 de l'arr. du 8 octobre 1987)

2.1.2. Mise en service et adaptation

La mise en service doit donner lieu à des mesures complètes qui renseignent sur les possibilités réelles de l'installation. Au cas où celles-ci seraient inférieures aux prévisions, des adaptations devront impérativement être réalisées.

Ces mesures, effectuées dans le premier mois qui suit la première

mise en service des installations, seront consignées au dossier de l'installation et serviront de référence pour les contrôles périodiques. Elles porteront sur :

- le débit d'air extrait par chaque système de captage ainsi que les pressions statiques ou les vitesses d'air, en différents points de l'installation, associées à ces débits ;
- le débit d'air global extrait ;
- l'efficacité de captage minimale des systèmes d'aspiration.

Les mesures précédentes devront également être effectuées chaque fois qu'un changement dans la production amènera à fixer d'autres conditions de fonctionnement: taux de pollution admis, débits de ventilation...

(Art. R. 4212-7, R. 4222-22, circ. du 9 mai 1985 et art. 2 et 4 de l'arr. du 8 octobre 1987)

Elles pourront être complétées par des mesures portant sur les **niveaux de concentration** mesurés :

- **aux postes de travail** : ils devront être inférieurs aux concentrations limites admises. En cas de dépassement de ces valeurs, l'installation de ventilation sera remaniée ;
- **au rejet dans l'atmosphère** : ils devront être en accord avec les règlements édictés par le ministère chargé de l'environnement. Dans le cas contraire, l'installation d'un dispositif de traitement des rejets est obligatoire ;
- **à l'introduction de l'air extérieur.**

2.1.3. Surveillance et entretien

Le chef d'établissement doit prévoir l'organisation de contrôles réguliers. Ces visites donneront lieu au relevé de grandeurs significatives du fonctionnement de l'installation (par exemple : pression statique dans les conduites).

L'intérêt de ces visites est d'apporter des renseignements sur l'état de l'installation, de remarquer des dérives éventuelles dans ses possibilités, de déclencher en temps utile les opérations d'entretien.

Ces contrôles périodiques doivent être réalisés sous la responsabilité du chef d'établissement, par ses propres

soins, par une entreprise spécialisée ou un organisme compétent, qu'il soit agréé ou non.

On contrôlera en particulier chaque année :

- le débit d'air global extrait par l'installation ;
- les pressions statiques ou les vitesses aux points caractéristiques de l'installation, notamment au niveau des systèmes de captage. On effectuera l'examen de tous les éléments de l'installation (système de captage, gaines, système d'apport d'air de compensation). Les résultats de cet examen ainsi que les différentes opérations d'entretien et de nettoyage, les aménagements et les réglages apportés, seront **consignés au dossier de maintenance faisant partie du dossier de l'installation.**

Ces contrôles périodiques ne dispensent pas le chef d'établissement de l'entretien et du nettoyage de l'installation ainsi que du remplacement des éléments défectueux chaque fois qu'ils sont nécessaires.

(Art. R. 4222-20 à R. 4222-22 et art. 2 et 4 de l'arr. du 8 octobre 1987)

2.1.4. Information sur l'installation

Toutes les informations nécessaires sont réunies dans le **dossier de l'installation** présenté précédemment (chapitres 2.1.1. à 2.1.3) qui doit être tenu à la disposition des organismes et personnes chargés de la sécurité du travail.

Ce dossier est constitué de la notice d'instruction fournie par le maître d'ouvrage et de la consigne d'utilisation rédigée par le chef d'établissement.

Il comportera :

- la description de l'installation ;
- la note de calcul établie lors de la conception ;
- les résultats du contrôle effectué à la mise en service ou après modification ;
- les ajustements et adaptations réalisés à la suite de ce contrôle ;
- le détail du plan de surveillance et d'entretien ;
- le détail des travaux d'entretien ou de remise en état ;

- les résultats des contrôles périodiques;
- les modifications éventuelles de l'installation, par exemple consécutives aux conditions de dégagement des polluants;
- les mesures à prendre en cas de panne (remise en marche, évacuation des locaux).

(Art. R. 4212-7, R. 4222-21, circ. du 9 mai 1985 et art. 2 et 4 de l'arr. du 8 octobre 1987)

2.2. Rejet avec récupération d'énergie

Ce type de rejet peut être envisagé lorsque l'économie réalisée par la récupération permet d'amortir, dans des délais raisonnables, le supplément d'investissement consenti.

Le principe de la récupération d'énergie consiste à transférer à l'air introduit une partie de la chaleur contenue dans l'air rejeté. La récupération d'énergie est généralement assurée par des échangeurs de chaleur (voir annexe 1).

Les recommandations du chapitre précédent restent bien entendu valables. Il s'y ajoute d'autres recommandations propres à la conception et à l'entretien de l'installation de récupération.

2.2.1. Conception

Ajouter un échangeur de chaleur à une installation de rejet simple se traduit par des contraintes supplémentaires au niveau de la conception. Bien qu'elles procèdent surtout du savoir-faire de l'installateur, elles méritent d'être précisées ici.

- L'installation de récupération d'énergie doit être conçue de façon qu'il n'y ait aucun risque de pollution de l'air introduit par des fuites d'air rejeté, notamment en cas d'utilisation d'un échangeur rotatif. En conséquence, au niveau de l'échangeur, **la pression statique dans la partie «air introduit» devra toujours être supérieure à la pression statique dans la partie «air rejeté».**

- L'encrassement des échangeurs provoque une chute sensible du

rendement de l'échange et du débit de l'air «traité», qui se traduit par une perte de l'efficacité du captage. Les échangeurs doivent donc être efficacement protégés contre l'encrassement par des filtres adaptés.

2.2.2. Mise en service

Des mesures aérauliques et thermiques pourront être effectuées sur l'échangeur afin d'apprécier son efficacité et sa rentabilité.

2.2.3. Surveillance et entretien

La surveillance des débits d'air traités par l'échangeur peut être effectuée à partir des dispositifs de mesure rapide présents sur les conduites de captage (chapitres 2.1.1 et 2.1.3). Les opérations de surveillance et d'entretien de l'installation de récupération d'énergie doivent être intégrées au plan de surveillance et d'entretien de l'installation de rejet et consignées à son dossier. En particulier, le **nettoyage** de l'échangeur et de ses filtres sera réalisé périodiquement.

2.3. Rejet après traitement de l'air pollué

Le traitement de l'air pollué, avant son rejet à l'extérieur du local, est obligatoire lorsque le rejet sans traitement provoque des niveaux de pollution, aux environs du local, incompatibles avec la réglementation protégeant l'environnement des locaux industriels.

2.3.1. Conception

Les systèmes de traitement de l'air sont généralement différents pour les polluants particuliers et pour les gaz et les vapeurs (l'annexe 2 décrit les principaux types d'épurateurs utilisables).

Outre les recommandations générales évoquées au chapitre 2.1.1, il est important de prendre en considération les points qui suivent :

- les **concentrations limites admises au rejet** doivent être fixées en

accord avec la réglementation du ministère chargé de l'environnement ;

- des **systèmes simples de détection des défaillances** du système de traitement doivent être utilisés (débitmètres, capteurs de pression statique ou de perte de charge...);

- la détection d'une **défaillance** donnera lieu au déclenchement d'une alarme et à l'arrêt de l'émission des polluants jusqu'au retour au fonctionnement normal;

- à la notice d'instructions citée au chapitre 2.1.1 doivent s'ajouter les éléments relatifs au choix du système d'épuration et à la solution retenue.

Les **spécifications** portant **sur la qualité de l'air** rejeté seront clairement indiquées, pour les conditions standard de fonctionnement et pour les cas où les caractéristiques de l'air pollué seraient susceptibles d'être modifiées à l'entrée de l'épurateur ;

- enfin, dans le cas de polluants particulièrement toxiques, il est souhaitable de prévoir des **contrôles continus de concentration au rejet**, car l'admission d'air extérieur risquerait d'être accidentellement polluée en cas de défaillance de l'épurateur non signalée ou signalée tardivement.

2.3.2. Mise en service et adaptation

Outre les mesures précisées au chapitre 2.1.2, d'autres mesures, renseignant sur le fonctionnement et l'efficacité du système de traitement, doivent être réalisées.

Elles porteront sur :

- les grandes caractéristiques du fonctionnement du système de traitement ;

- le niveau de concentration des polluants au rejet.

Au cas où les performances du traitement seraient inférieures aux prévisions, des adaptations devront impérativement être réalisées. Les mesures effectuées, qui seront consignées au dossier de l'installation, serviront également de référence pour les contrôles périodiques réalisés au cours du fonctionnement.

Enfin, les mesures précédentes devront également être effectuées chaque fois qu'un changement dans

la production ou la réglementation amènera à fixer d'autres conditions de fonctionnement.

2.3.3. Surveillance et entretien

La mise en œuvre d'une unité de traitement de l'air nécessite généralement une surveillance particulière. En effet, le fonctionnement correct d'un épurateur (dépoussiéreur, filtre, colonne de lavage, absorbeur, etc.) n'est possible que si tous les paramètres caractéristiques sont compris à l'intérieur de domaines bien précis (pertes de charge, débits, températures, pressions, etc.). À l'inverse, une anomalie, due par exemple au colmatage d'un élément filtrant sur un dépoussiéreur, peut avoir des conséquences néfastes sur la partie amont de la chaîne captage/épuration/rejet (entraînant par exemple une diminution de l'efficacité du captage des polluants émis par une machine ou un poste de travail).

Il convient donc d'**ajouter** au plan d'inspection, déjà prévu dans le cas du rejet simple ou du rejet avec récupération d'énergie, l'organisation de **visites régulières** des éléments du **système de traitement**, en portant particulièrement l'attention sur ceux pour lesquels une détérioration entraîne des effets sensibles et rapides sur l'environnement aux postes de travail. Ces visites pourront être l'occasion de relever un certain nombre de grandeurs significatives du fonctionnement du système et de les inscrire dans un registre.

Le **dossier complet** de l'installation, tenu à jour et pouvant être mis à disposition des organismes chargés de la sécurité du travail, comportera donc, outre la notice de calcul, la documentation technique ainsi que le registre de surveillance et de maintenance. Toutes les observations et la nature des opérations d'entretiens effectuées y seront consignées.

D'une manière générale, ce type d'installation est susceptible de convenir à un bon nombre de cas où les procédés industriels mis en œuvre laissent échapper des polluants, et en particulier des polluants toxiques.

2.4. Rejet avec récupération d'énergie et traitement de l'air rejeté

Ce type d'installation permet de cumuler les avantages des deux systèmes précédents: rejet avec récupération d'énergie et rejet après traitement de l'air pollué (capté auprès des différentes sources ou globalement dans l'atelier). Dans l'état actuel des techniques d'assainissement de l'air des locaux de travail, ce procédé paraît être le meilleur, car il présente des garanties sur la salubrité de l'air des ateliers et de l'environnement tout en limitant les dépenses d'énergie. Le système global est évidemment plus complexe et donc plus délicat à surveiller, puisque le nombre d'éléments est plus important. **Les recommandations qui peuvent être données à ce sujet regroupent celles des chapitres 2.1, 2.2 et 2.3.** Au niveau de la conception de l'installation, le problème de l'**ordre des unités d'épuration et de récupération** de chaleur n'est pas sans importance pour le bon fonctionnement de l'ensemble et il conviendra, dans les cas où le choix n'est pas évident, de faire figurer dans la note de calcul les raisons qui ont conduit à la solution retenue, en précisant les conséquences que pourrait avoir une déficience de la première unité sur le fonctionnement de l'autre et donc le fonctionnement global de l'installation.

2.5. Recyclage

L'efficacité et la fiabilité d'une installation de recyclage dépendent de nombreux éléments relatifs à son étude, son adaptation et au contrôle de son fonctionnement. Les points développés ici devront faire l'objet d'une attention particulière de la part des concepteurs et des exploitants.

2.5.1. Conception

Le recyclage de l'air après traitement est une technique complexe qui ne peut être mise en œuvre qu'après en avoir considéré tous les aspects. Il s'agit donc, dès la conception, d'adopter une démarche

rationnelle dont le respect conduira à la réalisation d'installations complètes et homogènes.

Le chapitre 3 dresse la liste des conditions qui doivent être satisfaites avant d'envisager le recours au recyclage.

En résumé, le recyclage n'est à envisager que si :

- tous les polluants sont identifiés ;
- toutes les sources de pollution sont connues et maîtrisées ;
- le « niveau de sécurité » pour chaque polluant et pour le mélange de polluants est connu ;
- un épurateur efficace existe pour chaque polluant ou mélange de polluants présent ;
- un système de mesure de la concentration de chaque polluant existe, compatible avec les niveaux de sécurité déterminés.

À ces conditions d'ordre général, la phase de conception d'une installation de recyclage doit ajouter :

- la fixation d'une concentration limite pour chaque polluant présent et pour leur mélange ;
- l'étude technique de l'installation ;
- la prévision du contrôle du fonctionnement, de l'entretien, de la conduite à tenir en cas de défaillance.

La pratique du recyclage nécessite donc, pour tous les polluants présents, la connaissance des VLEP (les valeurs réglementaires si elles existent, ainsi que les valeurs recommandées: VLCT, VLEP8h et éventuellement les limites d'explosivité). Ce procédé induit cependant un risque spécifique: celui de voir la concentration en polluant monter dangereusement en cas de défaillance du système d'épuration.

Il faut donc définir la notion de coefficient de sécurité appliqué aux valeurs limites; ce coefficient sera choisi d'une valeur telle que, si un incident survenait sur le dispositif d'épuration, la concentration, après l'incident et même après le déclenchement éventuel d'un système de sécurité, ne dépasserait en aucun point la valeur limite d'exposition retenue. Cette notion est reprise au chapitre 3.1 (point 6) et l'on parlera de valeur de contrôle (VC) prenant en compte ce coefficient de sécurité.

Par ailleurs, l'efficacité d'un épurateur n'est jamais totale; une fraction, même très faible, du ou des polluants est réintroduite dans l'atelier et se trouve diluée par la ventilation générale.

Pour certains types de polluants, tels que des produits cancérigènes ou allergènes, le principe même suivant lequel on assurerait le maintien à un certain niveau non nul de la concentration n'est pas satisfaisant d'un strict point de vue de la santé, puisqu'on a vu précédemment que, dans ce cas, il n'existait pas systématiquement de valeurs limites de sécurité «absolues». Ainsi, même si dans l'état actuel de la réglementation, le respect des valeurs limites réglementaires fixées par décret n'interdit pas la pratique du recyclage, on ne peut que recommander de ne pas retenir cette solution pour les produits reconnus cancérigènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction ou sensibilisants (par exemple ceux figurant dans la catégorie Ia et Ib du règlement européen CLP). Pour ces produits, et dans le cas où l'atelier est équipé d'un système de rejet après épuration avec ou sans récupération de chaleur, les systèmes de captage des polluants équipant toute source de pollution devront être aussi efficaces que possible. La recherche de la concentration minimale de ce type de polluant dans un atelier de travail peut constituer une règle de déontologie pour toutes les parties concernées.

Pour les produits suspects d'être cancérigènes pour l'homme, la réalisation d'un dispositif de recyclage ne devrait être envisagée qu'après une étude minutieuse pour chaque cas particulier.

Un autre point important doit être souligné: dans le cas de polluants particuliers, le recyclage risque d'induire une modification de la granulométrie des poussières en suspension et en particulier un **accroissement relatif de la concentration en fines particules**. La détermination de la concentration limite pratique doit tenir compte de ce facteur; les études toxicologiques et épidémiologiques s'intéressent à la réponse des individus à

l'aérosol tel qu'il est émis et on peut difficilement prévoir les changements dus à une modification des caractéristiques physiques de cet aérosol. En tout état de cause, il convient de **rejeter systématiquement une fraction de l'air épuré à l'extérieur ou d'associer le recyclage à un dispositif minimum de ventilation générale** pour limiter l'élévation de la concentration en éléments «ultrafins» ou en produits «secondaires» non retenus par les épurateurs utilisés.

Étude technique

L'étude technique comprend les aspects suivants: ventilation, traitement de l'air, détection des défaillances.

Pour la ventilation, les recommandations déjà faites à propos des installations de rejet (chapitre 2.1.1) et concernant les contrôles des pressions et des débits, la disposition des bouches de soufflage dans le local, le bruit et l'adaptation à des changements possibles dans l'émission et la qualité des polluants restent, bien entendu, valables.

Le recyclage ne se justifie qu'en période de chauffage. Le dispositif prévu par le concepteur pour assurer le rejet extérieur en période d'été peut également assurer le rejet en cas de défaillance de l'installation d'épuration. Évidemment, ce mode de fonctionnement ne peut être considéré que comme une solution d'attente et la remise en état du système d'épuration devra être effectuée le plus rapidement possible car la situation de «rejet de sécurité» occasionne éventuellement des risques de pollution exagérée de l'environnement et de réintroduction d'air pollué dans le local, à moins que le système de rejet de sécurité ne comporte un dispositif d'épuration.

Dans le cas du fonctionnement en configuration de rejet, l'équipement permettant d'introduire l'air neuf à l'intérieur de l'atelier (notamment dans le cas d'une entrée mécanique) doit pouvoir **supporter un débit plus important que le débit normalement prévu avec recyclage**. La capacité de chauffage de l'air introduit doit également être prévue en conséquence.

Pour l'unité de traitement de l'air, les recommandations, énoncées au chapitre 2.3.1 à propos du rejet, sont également valables; il convient donc de prévoir un certain nombre de contrôles simples des débits, des pressions statiques, etc.

Cependant, il n'est plus possible, dans le cas de **polluants toxiques** ou nocifs, de se limiter à ces contrôles simples; il est nécessaire de contrôler en plus, et cela **de manière permanente, la qualité de l'air à la sortie de l'épurateur, ou dans l'atelier, ou même les deux à la fois**. Le recyclage doit donc s'accompagner de systèmes de contrôle plus rigoureux, plus performants et les instruments de mesure doivent pouvoir **déclencher une alarme** en cas de dépassement de la concentration limite fixée et permettre dans les délais appropriés la **transformation** de la configuration de l'installation en celle d'une installation de rejet.

Comme pour les autres systèmes d'assainissement de l'air des locaux de travail, on établira une notice d'instructions complète, comportant toute la documentation technique de l'installation et les raisons des choix qui sont décidés. Une attention particulière sera portée à l'efficacité des systèmes de traitement de l'air, qui bien souvent sont essayés par les fabricants dans des conditions parfois très différentes des conditions réelles d'utilisation (nature des polluants, granulométrie, humidité, température, variations prévisibles de la concentration des polluants); ce système de traitement est évidemment une pièce maîtresse dans une installation de recyclage.

Prévision du contrôle de l'installation et des défaillances

Les contrôles de l'installation, et en particulier ceux pratiqués sur l'unité d'épuration, doivent être prévus dès la phase de conception de l'installation (les diverses méthodes de contrôle de la qualité de l'air sont discutées dans le chapitre 3 et dans l'annexe 3). Les appareils de mesure correspondants pourront être parfois des **matériels relativement complexes, nécessitant un étalonnage et une maintenance spécifiques**, et il faudra, dans ce cas,

faire appel à du personnel spécialement formé à cette tâche (ingénieur de sécurité, technicien qualifié) ou à un organisme compétent.

Comme les installations de rejet, une installation de recyclage devra être **régulièrement suivie et entretenue** selon les modalités prévues par les constructeurs; la fiabilité de l'ensemble dépendra étroitement du soin avec lequel ces vérifications auront été prévues, aussi bien du point de vue technique que sur le plan du personnel affecté à ces tâches.

Malgré toutes les précautions prises, une **défaillance** responsable de la diffusion d'un polluant toxique pourrait avoir lieu accidentellement; il convient donc de définir les mesures de prévention utiles visant à protéger le personnel, parmi celles-ci, l'**évacuation** du local pourra éventuellement être envisagée.

2.5.2. Mise en service et adaptation

La mise en service devra être accompagnée de mesures complètes qui renseignent sur les **possibilités réelles** de l'installation. Au cas où celles-ci seraient en retrait par rapport aux prévisions, des adaptations devront impérativement être réalisées.

Les mesures effectuées, consignées au dossier de l'installation, serviront également de référence pour les contrôles périodiques réalisés au cours du fonctionnement.

En dehors de celles préconisées au chapitre 2.1.2, des mesures complémentaires doivent être effectuées:

- débit d'air neuf introduit dans les locaux;
- efficacité minimale des systèmes d'épuration et, dans le cas de poussières, efficacité par tranche granulométrique;

- concentration en poussières sans effet spécifique ou concentration en autres polluants en différents points caractéristiques de la pollution dans l'atelier et dans les gaines de recyclage ou à leur sortie dans un écoulement canalisé.

Ces mesures permettront d'établir une relation entre les niveaux de

concentration aux postes de travail et aux endroits prévus pour les détecteurs de pollution, moyennant l'introduction d'un coefficient de sécurité.

Par exemple, dans le cas d'un détecteur de pollution placé dans une gaine de soufflage d'air épuré (fig. 2), une adaptation entre sa mesure C_d et les mesures aux postes de travail C_{p1} à C_{p6} devra être réalisée afin que l'alarme se déclenche lorsque la limite fixée risquera d'être dépassée au niveau des postes de travail.

Les mesures précédentes devront également être effectuées chaque fois qu'un changement dans la production amènera à fixer d'autres conditions de fonctionnement (taux de pollution admis, débits de ventilation, changements dans la configuration ou la destination du local...).

2.5.3. Surveillance et entretien

De même qu'il a été recommandé l'établissement d'une note de calcul de l'installation, dans laquelle seront explicitement prévus les problèmes de maintenance, l'ensemble des opérations réellement effectuées et l'ensemble des mesures seront reportées dans les consignes d'utilisation, qui permettront de suivre l'évolution de l'installation au cours du temps et de décider éventuellement de la remise en état ou du remplacement de certains de ses éléments.

En dehors des opérations périodiques déjà mentionnées au chapitre 2.1.3 et auxquelles il faut ajouter l'examen annuel des épurateurs, on doit effectuer au minimum tous les six mois:

- le contrôle de la concentration en poussières sans effet spécifique ou en autres polluants dans les gaines de recyclage ou, à leur sortie, dans un écoulement canalisé;

- le contrôle de tous les systèmes de surveillance mis en œuvre.

Toutefois, la périodicité des visites de surveillance devrait être adaptée aux besoins et pourra varier entre une fois par semaine pour les installations nécessitant une surveillance attentive (polluants très toxiques, colmatage rapide des filtres...) et une fois tous les deux mois par exemple.

(Art. R. 4222-20, R. 4222-2, circ. du 9 mai 1985 et art. 2 et 4 de l'arr. du 8 octobre 1987)

2.5.4. Informations sur l'installation

En dehors des informations déjà citées au chapitre 2.1.4, le dossier de l'installation devra également faire mention des mesures précises à prendre en cas de panne du système de ventilation:

- mesures permettant l'arrêt du recyclage;
- mesures permettant l'arrêt de la production des polluants, s'ils ne peuvent être rejetés dans l'atmosphère;
- mesures de sauvegarde et d'évacuation, si l'arrêt de la production des polluants n'est pas possible immédiatement.

(Art. R. 4212-7, R. 4222-21, circ. du 9 mai 1985 et art. 2 et 4 de l'arr. du 8 octobre 1987)

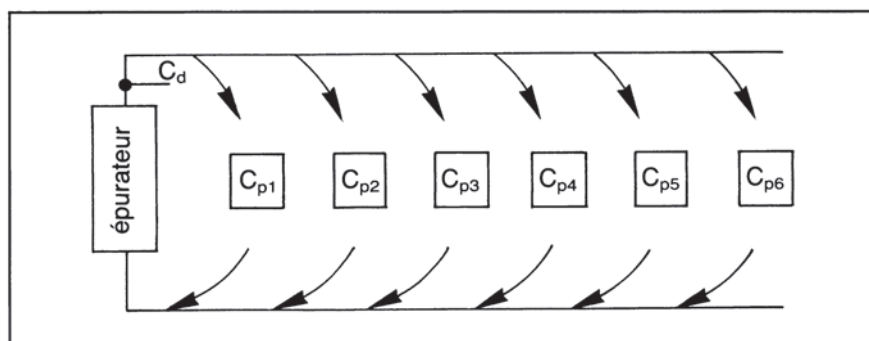


Figure 2

2.6. Conclusion

Le tableau II récapitule les recommandations données dans ce chapitre. À la lecture de ce tableau, il apparaît que le procédé du recyclage impose plus de contraintes que les autres procédés, surtout en ce qui concerne la surveillance du fonctionnement. Cela ne surprend pas de la part d'un procédé dont l'efficacité et la fiabilité ne sont pas «naturelles», mais reposent sur un fonctionnement sans faiblesse de tous les éléments de l'installation. Pour cette raison, le recyclage ne devrait être envisagé que lorsque le problème est suffisamment simple pour que les contraintes imposées restent compatibles avec les économies d'énergie prévisibles.

3. Protocole visant à déterminer l'opportunité de l'installation d'un dispositif de recyclage

Ce protocole a essentiellement valeur d'information. Il regroupe un certain nombre de réflexions et de questions que doivent se poser l'industriel et le préventeur avant d'envisager l'installation d'un dispositif de recyclage de l'air. Il est inspiré d'une étude

faite aux États-Unis par le NIOSH⁽²⁾ (voir bibliographie).

Les problèmes posés par la technique du recyclage sont absorbés par étapes successives, à la suite desquelles il doit être possible de juger de l'opportunité de l'installation d'un tel dispositif, en tenant compte des facteurs d'hygiène du travail, de la réglementation en vigueur, des facteurs économiques et des caractéristiques des équipements nécessaires.

3.1. Première étape : étude préalable

Cette étape doit permettre de juger rapidement si l'on peut envisager

(2) NIOSH = National institute for occupational safety and health.

TABLEAU II

Résumé des recommandations relatives aux procédés d'assainissement de l'air

N.B. pour le procédé de rejet avec récupération d'énergie et traitement de l'air pollué prendre en compte l'ensemble des recommandations faites pour le rejet avec récupération et pour le rejet avec épuration

Technique	Conception	Mise en service	Surveillance et contrôle
Rejet simple	Prévoir les conditions d'émission des polluants. Éloigner les points de rejet extérieurs des entrées d'air neuf. Prévoir une augmentation des débits. Se conformer aux normes antibruit. Établir une note de calcul. Établir un plan d'inspection et d'entretien.	Mesures permettant d'évaluer le degré d'adaptation de l'installation : – débits de captage ; – niveaux de concentration à l'arrivée d'air frais, aux postes de travail et au rejet. Remaniement de l'installation en cas de besoin.	Visites régulières des éléments de l'installation. Mesures périodiques des polluants aux postes de travail.
Rejet avec récupération d'énergie	En plus des recommandations relatives au rejet simple : – prévoir les dispositions éliminant les risques de contamination de l'air neuf par l'air rejeté ; – protéger les échangeurs par des filtres.	Mesures complémentaires facultatives permettant d'apprécier l'efficacité et la rentabilité du récupérateur.	Visites régulières et éléments de l'installation. Mesures périodiques des polluants aux postes de travail.
Rejet après traitement de l'air pollué	En plus des recommandations relatives au rejet simple : – tenir compte de la réglementation concernant la protection de l'environnement ; – prévoir des systèmes de détection des défaillances ; – prévoir un plan d'inspection et d'entretien du système de traitement.	Mesures complémentaires permettant de vérifier l'efficacité du traitement de l'air. Contrôle des débits de captage, unité de traitement à pleine charge. Adaptations éventuelles.	Visites régulières des éléments de l'installation. Mesures périodiques des polluants aux postes de travail. Mesures régulières des concentrations au rejet. Registre des mesures et des opérations effectuées.
Recyclage	En plus des recommandations ci-dessus : – fixer une concentration de sécurité pour chaque polluant ; – disposer convenablement les bouches de soufflages ; – prévoir un système de rejet de sécurité de l'air épuré ; – prévoir un contrôle continu ou séquentiel de la qualité de l'air recyclé.	Mesures permettant d'évaluer le degré d'adaptation de l'installation : – débits de captage et recyclage ; – grandeurs caractéristiques du fonctionnement du système de traitement. Établissement d'une relation entre les niveaux de pollution aux postes de travail et aux emplacements prévus pour les capteurs. Remaniement de l'installation en cas de besoin.	Visites régulières de surveillance. Contrôle continu ou séquentiel des concentrations. Vérification et étalonnage des appareils de contrôle. Contrôle complet périodique de l'installation. Registre des mesures et des opérations effectuées, archivage des enregistrements délivrés par les appareils de surveillance de la pollution.

raisonnablement l'installation d'un dispositif de recyclage: elle doit conduire à rejeter dès le début toute solution susceptible d'augmenter les risques professionnels ou toute solution apparaissant comme non justifiée sur le plan économique. Les conditions évoquées ci-dessous doivent toutes être remplies pour avancer dans la suite du protocole; la non-satisfaction d'un seul de ces points est une condition suffisante de rejet.

1. Faire un bilan précis de la consommation d'énergie utilisée pour rendre confortable l'atmosphère sur les lieux de travail. Étudier la faisabilité technique et économique de toutes les solutions de rejet extérieur (fig. 1a à 1d) avec ou sans récupération d'énergie. Dans la majorité des cas, il sera possible de trouver une solution acceptable. Dans le cas contraire, une solution de recyclage pourra être envisagée, qui devra répondre aux critères définis dans les paragraphes suivants.

2. Identifier tous les polluants: nature, état physique, concentration, propriétés chimiques, caractéristiques toxicologiques. Une première classification pourrait être opérée en cas d'émissions multiples: toxiques, fibrosants, cancérigènes, allergènes, produits explosifs ou inflammables. Les caractéristiques sont les propriétés physiques, chimiques et toxicologiques des polluants présents sous forme de gaz, vapeurs ou aérosols (poussières, gouttelettes).

Pour les gaz et vapeurs, il importe de connaître: la toxicité (CL50, DL50...), les valeurs limites de concentration à caractère réglementaire imposées par la législation en France et à l'étranger (ministère chargé du travail, ministère chargé de l'environnement, UE, OSHA, EPA⁽³⁾...) et, éventuellement, les valeurs préconisées par divers organismes compétents en matière d'hygiène du travail ou de protection de l'environnement (ACGIH⁽³⁾...), il est également

utile de connaître leurs propriétés physiques pour concevoir une installation ou pour prévoir certains inconvénients liés à un mauvais fonctionnement: tension de vapeur, point d'éclair, etc.

Pour les aérosols, il importe de connaître les éléments suivants: toxicité du produit dispersé, composition chimique des poussières, densité, forme, solubilité, répartition granulométrique, interactions possibles avec des gaz ou vapeurs, etc.

D'une manière générale, la recherche du maximum d'informations sur les polluants doit être entreprise avant même toute étude technique.

Tous les polluants doivent être identifiés sans exception; en cas de doute, il est nécessaire de procéder à des prélèvements d'atmosphère et de pratiquer une recherche analytique des polluants susceptibles d'être présents; cette détermination ne pourra être faite que par des organismes qualifiés en matière d'hygiène et sécurité du travail.

D'autre part, une étude prévisionnelle des niveaux de pollution autour des sources doit être conduite dans les conditions prévues pour le fonctionnement habituel des appareils de ventilation; toute installation de recyclage est incompatible avec l'existence de sources de pollution non maîtrisées, en raison du faible taux de renouvellement en air frais et du risque d'augmentation sensible des concentrations ambiantes en polluants.

3. Il faut se demander s'il existe un **niveau de sécurité** pour chacun de ces polluants et pour leur mélange; cette question a été discutée à propos des limites d'exposition (chapitre 2.5.1). Ainsi pour les allergènes et pour beaucoup des produits reconnus cancérigènes pour l'homme, un tel niveau de sécurité n'existe pas, par conséquent la solution du recyclage ne peut être que fortement déconseillée.

4. Pour les polluants identifiés, existe-t-il un **épurateur efficace** permettant

d'épurer l'air qu'ils ont pollué, et la nature des produits permet-elle de faire un traitement global ou au contraire exige-t-elle une épuration sélective?

- Dans le cas des **gaz et vapeurs**, l'épuration passe par l'utilisation d'absorbants ou d'incinérateurs. Le cas des mélanges est en général plus délicat à traiter.

- Dans le cas des **particules**, on peut utiliser pour les solides des systèmes de dépoussiérage associés ou non, et pour les liquides des dévésiculateurs. L'efficacité d'un système de dépoussiérage devra être de préférence mesurée par des procédures conventionnelles, à l'aide du produit à traiter (fumées de soudage, poussières brutes, etc.). Cette mesure devra être conduite à un ou plusieurs débits réalistes par rapport au débit réel d'utilisation.

- Dans le cas de **mélanges de gaz ou vapeurs et de particules**, la réalisation d'un épurateur efficace peut être techniquement assez complexe donc d'un prix de revient élevé.

En résumé et dans l'état actuel des techniques d'épuration, il semble bien que le recyclage ne puisse être indiqué que pour certaines poussières et certains gaz (uniques ou mélanges particuliers).

5. La question suivante concerne l'existence d'une **méthode de mesure des concentrations** en polluants, dans une gamme de concentrations entourant assez largement la valeur limite d'exposition, et l'existence d'appareils de mesure correspondants, permettant de préférence le contrôle continu en temps réel de la qualité de l'air recyclé ou de l'air aux postes de travail. Dans le cas de mélanges de gaz, il ne suffit pas toujours de suivre l'évolution d'un polluant repère; le temps de réponse de l'appareil de mesure devrait être aussi faible que possible et, en tout cas, faible devant le temps de réponse de l'installation elle-même. Si plusieurs polluants à caractère toxique sont présents, il faut disposer d'appareils de surveillance spécifiques

(3) UE = Union européenne; OSHA = Occupational safety and health administration; EPA = Environmental protection agency; ACGIH: American conference of governmental industrial hygienists.

de l'atmosphère, donnant l'alarme et commandant automatiquement le rejet de sécurité en cas d'anomalie.

Il faut aussi retenir qu'une grande dispersion des sources dans un atelier et un niveau de fluctuations élevé de celles-ci entraîneront des investissements plus importants, non seulement pour le captage des polluants, mais aussi pour les appareils de contrôle.

6. Si les réponses aux questions précédentes sont toutes positives, il est possible de continuer l'examen détaillé des étapes devant conduire ou non à retenir le principe de l'installation d'un dispositif de recyclage. Avant toutes choses cependant, la notion de VLEP étant retenue, il convient de définir la notion de valeur de contrôle (VC) : il s'agit de la valeur de concentration en polluant, compatible avec la sécurité, et qui correspond à la concentration maximale normalement tolérée lorsque le système d'épuration fonctionne et lorsque les sources ont chacune un débit d'émission de polluants dont les caractéristiques en fonction de temps sont proches des conditions normales. En annexe 3, on explique que cette valeur doit être inférieure à la VLEP pour que, si un incident survient brutalement sur l'épurateur, le système de détection de la pollution puisse réagir dans un temps raisonnable et commander un dispositif d'alarme et de réponse du système avant que la concentration ne dépasse la VLEP.

On peut écrire dans ces conditions : $VC = VLEP / n$, (n supérieur à 1).

La fixation d'une valeur minimale de n (coefficient de sécurité déjà évoqué au chapitre 2.5.1) doit être faite en tenant compte des caractéristiques des polluants, des conditions de ventilation (débits utilisés, emplacement des bouches de soufflage de l'air épuré, fluctuations du débit d'émission des polluants...) et du temps de réponse du système global à tout incident de fonctionnement. La détermination de cette valeur minimale sera faite, par conséquent, à partir de critères purement scientifiques et techniques. Par contre, la fixation d'une valeur de n au-dessus de cette valeur minimale pourrait être établie sur une base

contractuelle entre les différentes parties concernées par l'hygiène et la sécurité dans l'entreprise. Elle assurerait ainsi une marge de sécurité supplémentaire pour tenir compte par exemple des paramètres qu'il est parfois difficile d'intégrer avec précision aux calculs de l'installation, tels que le dépassement accidentel des caractéristiques nominales de fonctionnement de l'installation.

La valeur de contrôle devrait être remise en cause à chaque changement des caractéristiques de l'atelier où serait installé le dispositif de recyclage.

3.2. Deuxième étape : choix des méthodes et des équipements de surveillance

Une ou plusieurs anomalies de fonctionnement d'un système de recyclage peuvent conduire à des niveaux de concentrations critiques. Le but de cette étape est de recenser les méthodes compatibles avec les spécifications de sécurité, sans faire encore le choix définitif, pour assurer le contrôle permanent de l'installation et définir des « stratégies de réponse » en cas d'incident. Ce problème peut être appréhendé de deux manières différentes.

On peut en effet :

- de préférence pratiquer le contrôle de la concentration au niveau de l'air recyclé ;
- ou pratiquer le contrôle de l'atmosphère ambiante.

Le contrôle au rejet permet de bénéficier d'une sensibilité plus importante des appareils en l'absence de dilution et d'un temps de réponse court. Le contrôle de l'ambiance permet en revanche de s'assurer plus facilement des bonnes conditions de captage des polluants.

Les procédures de surveillance et de prise de décisions mettent en jeu plusieurs alternatives qui sont discutées dans l'annexe 3.

Le choix entre système automatique et système manuel dépend essentiellement de la nature du polluant. Le système manuel ne devrait en aucun

cas être utilisé dans le cas de produits toxiques.

Le choix entre le contrôle de la concentration ambiante et le contrôle en sortie de l'épurateur est plus difficile. Si on choisit le contrôle en sortie d'épurateur, il faut établir, au moyen de mesures *in situ*, la relation entre la concentration à la sortie de l'épurateur et la concentration ambiante au niveau des postes de travail et l'utiliser en ajoutant un coefficient de sécurité pour déterminer le seuil de déclenchement de l'alarme.

3.3. Définition – Calcul de l'installation – Mise en route et surveillance

La figure 3 présente le schéma de principe de l'installation de recyclage. On note en particulier le dispositif de dérivation, qui permet de passer de la configuration de recyclage à celle de rejet (en cas d'incident sur le système d'épuration ou en dehors des périodes de chauffage).

On se reportera au chapitre 2 pour ce qui est des recommandations. Le calcul complet d'une installation est l'affaire du spécialiste ; cependant le choix devra se faire en général parmi plusieurs solutions qui devront être optimisées pour pouvoir les comparer objectivement. La surveillance de l'installation devra être continue et assurée par du personnel responsable et formé à cette tâche ; en particulier, l'entretien des matériels est un impératif rigoureux.

Toutes les informations nécessaires sont réunies dans le dossier de l'installation, qui comportera :

- la description de l'installation ;
- la note de calcul établie lors de la conception ;
- les résultats du contrôle effectué à la mise en service ou après modification ;
- les ajustements et adaptations réalisés à la suite de ce contrôle ;
- le détail du plan de surveillance et d'entretien ;
- le détail des travaux d'entretien ou de remise en état effectués ;
- les résultats des contrôles périodiques ;

- les modifications éventuelles de l'installation, par exemple consécutives aux conditions de dégagement des polluants;

- les mesures permettant l'arrêt du recyclage;

- les mesures permettant l'arrêt de la production des polluants, s'ils ne peuvent être rejetés dans l'atmosphère;

- les mesures de sauvegarde et d'évacuation, si l'arrêt de la production des polluants n'est pas possible immédiatement.

Le dossier de l'installation peut être consulté par les personnes intérieures ou extérieures à l'entreprise, ayant autorité en matière d'hygiène du travail.

4. Conclusion générale

Deux procédés élémentaires permettent d'éliminer les polluants captés: le rejet simple vers l'extérieur et le rejet après épuration de l'air pollué. Ce deuxième procédé est évidemment préférable pour des raisons liées à la protection de l'environnement; l'épuration de l'air rejeté est souvent

obligatoire pour satisfaire les textes réglementaires en vigueur. Dans ces deux cas, le fonctionnement correct des installations fait appel à des contrôles périodiques de leur état et à des opérations régulières de maintenance.

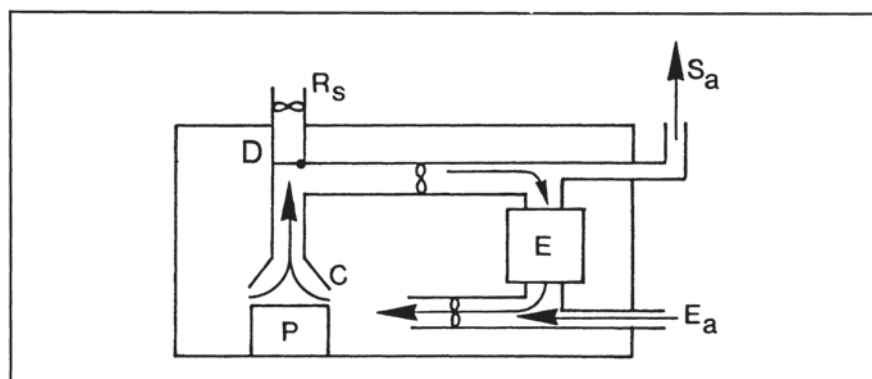
En période hivernale, le réchauffage de l'air neuf introduit et de l'air ambiant implique des dépenses énergétiques importantes. La diminution de ces dépenses est possible, soit en limitant la fuite des calories à l'extérieur due à l'air pollué rejeté, soit en recyclant une partie de l'air pollué après son épuration.

La récupération de la chaleur se réalise grâce à un transfert thermique dans un échangeur. Les échangeurs possibles sont de type à plaques, rotatifs, à double batterie ou à caloducs. Des pompes à chaleur peuvent également être utilisées.

Le bon fonctionnement des échangeurs nécessite généralement l'élimination des polluants dans l'air sortant, en particulier des polluants particuliers (liquides, poussières), afin d'éviter leur encrassement; ces appareils nécessitent également un contrôle et un entretien régulier. Dans certains types d'industrie, il faut mentionner la possibilité de récupérer de

la chaleur pour le chauffage des locaux au niveau même de certains procédés de transformation ou de fabrication.

Le **recyclage de l'air pollué** après traitement est une solution *a priori* intéressante sur le plan énergétique, l'appoint de chaleur étant limité à l'air neuf qui est nécessaire pour assurer le renouvellement de l'air. Sur le plan de l'hygiène du travail, ce procédé pose en revanche des problèmes nouveaux dont la complexité conduit à le déconseiller dans les cas où les conditions évoquées au chapitre 3.1 ne seraient pas satisfaites. **Sa mise en œuvre doit s'accompagner impérativement de mesures de protection rigoureuses: contrôle permanent de la qualité de l'air, opérations régulières de maintenance, information du personnel, possibilité de rejeter l'air à tout moment à l'extérieur.** Pratiquement, compte tenu de l'état actuel de la technologie, cette solution ne devra être retenue que dans les cas simples pour lesquels les risques sont parfaitement connus et limités. Pour les autres cas, on se tournera de préférence vers les autres systèmes de récupération d'énergie.



P : Poste de travail
C : Dispositif de captage
D : Dispositif de dérivation
E : Épurateur

E_a : Entrée d'air
 S_a : Sortie d'air
 R_s : Rejet de sécurité

Figure 3. Schéma de principe d'une installation de recyclage

Annexe 1

Systèmes de récupération de la chaleur

La récupération de la chaleur s'effectue à partir de sources de chaleur destinées à être perdues et qui peuvent être considérées comme gratuites. Dans le cas traité ici, la récupération de la chaleur associée au rejet de l'air pollué, la source de chaleur gratuite est le plus souvent constituée par l'air de ventilation extrait du local et qui a été chauffé à son introduction pour assurer le confort des travailleurs. Plus rarement, la source de chaleur est constituée par des rejets thermiques à température plus élevée (air ou eau de refroidissement, produits de combustion...). Cette chaleur prélevée au rejet est utilisée pour réchauffer l'air de ventilation introduit dans le local.

La loi naturelle d'écoulement de la chaleur impose que celle-ci passe d'une source chaude à une source froide. Ce principe est mis en pratique par les échangeurs thermiques classiques.

L'intérêt économique d'un échangeur classique s'apprécie au moyen :

- de la **puissance transférée instantanée** : elle est déterminée par le calcul de la perte de chaleur de l'air extrait ou de gain de chaleur de l'air introduit ;

- de son **efficacité**, qui se définit comme le rapport de la puissance transférée à la puissance théoriquement transférable dans les mêmes conditions de fonctionnement.

D'un point de vue pratique, l'efficacité d'un échangeur, qui croît avec sa taille, est limitée à une valeur qui correspond à l'amortissement le plus rapide de l'investissement.

Au niveau de l'échangeur, le transfert de la chaleur peut s'effectuer de plusieurs manières en utilisant des supports différents :

- la convection-conduction (échangeur à plaques) ;
- l'accumulation de la chaleur dans un matériau (échangeur rotatif) ;
- un fluide caloporteur sans changement d'état (échangeur à double batterie) ;

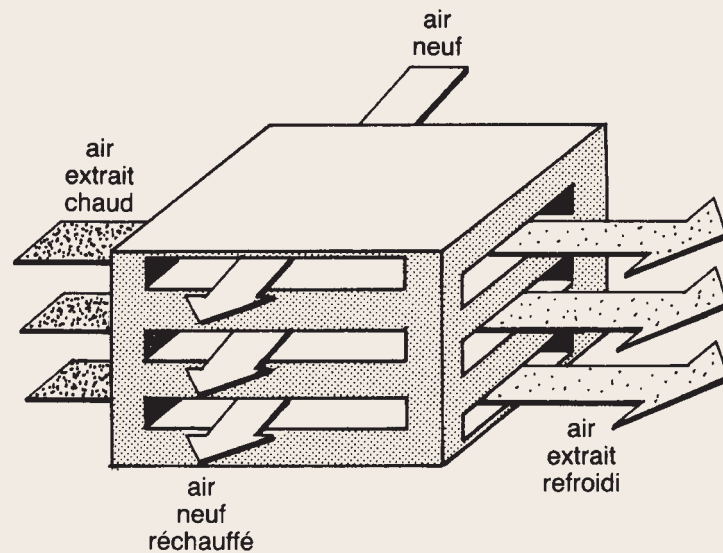


Figure 4. Schéma d'un échangeur à plaques

- un fluide caloporteur avec un changement d'état (échangeur à caloducs).

À côté de ces échangeurs classiques, on peut également citer la pompe à chaleur, qui réalise un procédé de récupération à système thermodynamique.

Quelques informations relatives au fonctionnement et aux conditions d'emploi de ces systèmes de récupération d'énergie sont présentées ci-dessous.

A. Les échangeurs classiques

1. Échangeur à plaques (fig. 4)

Description, fonctionnement

Des plaques minces sont disposées parallèlement à intervalles réguliers. Un certain nombre de passages d'air de quelques millimètres chacun sont réalisés. L'air extrait circule dans un sens et cède de la chaleur par convection aux plaques qui la restitue suivant le même mécanisme à l'air neuf qui circule perpendiculairement au premier (courants croisés) ou en sens inverse (contre-courant).

Les matériaux constitutifs des plaques sont choisis en fonction de

l'action éventuellement corrosive de l'air. Les matériaux les plus employés sont l'aluminium, l'acier, l'acier inoxydable, le verre, le PVC, l'Inconel.

Conditions et précautions d'installation

Les gaines d'air extrait et neuf doivent être contiguës. Sensible à l'encrassement, cet échangeur doit être protégé par des filtres. La différence des pressions statiques entre les canaux d'air extrait et neuf ne peut excéder 700 à 1000 Pa sous peine de déformation des plaques.

Températures d'emploi

Jusqu'à 200 à 300 °C.

Efficacité

Jusqu'à 60 %.

Principaux avantages

Simplicité, séparation étanche entre les flux d'air traités, aucune dépense énergétique pour le fonctionnement, réversibilité.

2. Échangeur rotatif (fig. 5)

Description, fonctionnement

Une roue, constituée par un matériau accumulateur de chaleur et perméable à l'air, tourne de façon continue autour d'un axe parallèle aux flux d'air neuf et d'air extrait qui circulent en sens inverse. La roue, divisée en deux secteurs par le carter, est traversée alternativement par ces deux flux. L'air extrait traverse une moitié de la roue en cédant une partie de sa chaleur à la surface d'échange qui transfère après rotation cette chaleur à l'air neuf traversant l'autre moitié de la roue. Pour limiter la pollution de l'air neuf par l'air usé, un secteur de purge réalise une sorte de «by-pass» ayant pour effet de nettoyer le média.

La vitesse de rotation de la roue peut être modulée de façon à faire varier le rendement de l'échange.

Différents types de média accumulateurs peuvent être utilisés. Leur nature est soit :

- une matière fibreuse imprégnée ou non d'un absorbant ;
- synthétique ;
- métallique à pouvoir hygroscopique ou non.

Leur structure est soit tissée, soit à nid d'abeilles.

Conditions et précautions d'installation

Les gaines d'air extrait et neuf doivent être contiguës.

Cet échangeur, dont la structure comporte de très fins canaux, est sensible à l'encrassement et doit être efficacement protégé par des filtres.

Pour limiter les risques de pollution de l'air neuf par l'air extrait, il est nécessaire que la pression statique dans la gaine d'air neuf soit supérieure à celle qui existe dans la gaine d'air extrait.

Les matériaux constituant le système d'échange ne devraient pas par eux-mêmes apporter de pollution (média d'amiante par exemple).

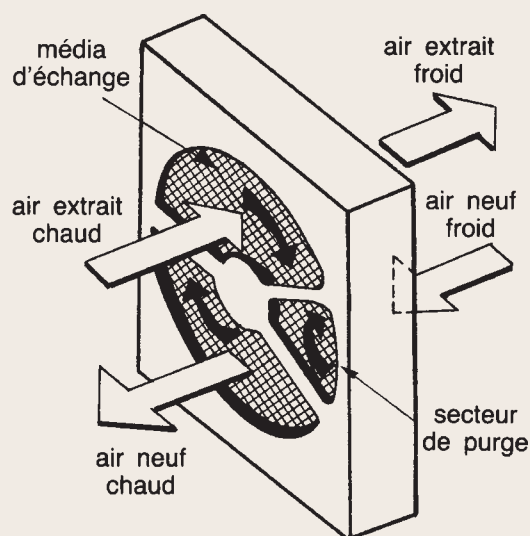


Figure 5. Schéma d'un échangeur rotatif

Températures d'emploi

Couramment jusqu'à 350 °C.
Avec certains matériaux, jusqu'à 1000 °C.

Efficacité

70 à 80 %.

Principaux avantages

Régulation facile, faible dépense énergétique pour le fonctionnement, réversibilité, possibilité de transfert de masse d'eau avec média hygroscopique.

3. Échangeur à double batterie (fig. 6)

Description, fonctionnement

L'air extrait traverse une batterie à ailettes, dite «de récupération», en y abandonnant une partie de sa chaleur. Un fluide intermédiaire, généralement de l'eau glycolée, transporte cette énergie à une autre batterie à ailettes, dite «de restitution», traversée par l'air neuf.

Les batteries de récupération et de restitution peuvent être uniques ou composées de plusieurs batteries disposées en série, ou en parallèle lorsqu'il existe plusieurs sources chaudes

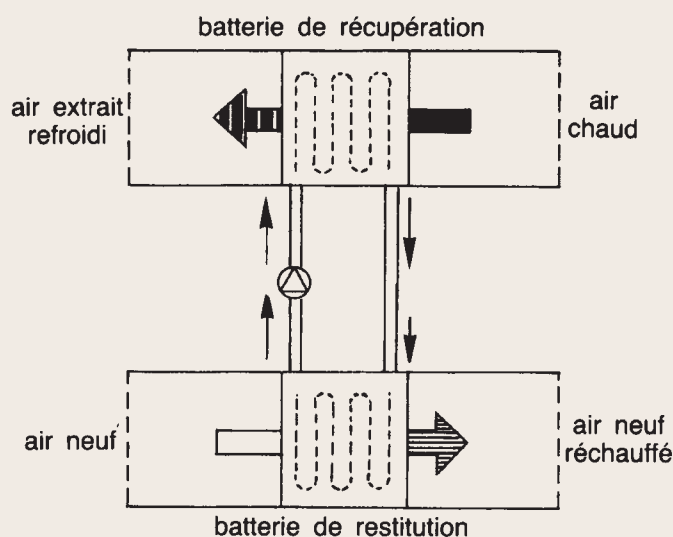


Figure 6. Schéma d'un échangeur à double batterie

et froides. La circulation du fluide caloporteur est assurée par un groupe motopompe.

Les batteries d'échange sont généralement constituées de tubes de cuivre à ailettes d'aluminium.

Conditions et précautions d'installation

Les conduits d'air neuf et extrait peuvent être éloignés. Les batteries à ailettes sont sensibles à l'encrassement. La conduite de fluide caloporteur doit être soigneusement calorifugée.

Températures d'emploi

Limitées par l'ébullition du fluide caloporteur (pour l'eau glycolée sous pression environ 100 °C).

Efficacité

Jusqu'à 50 %.

Principaux avantages

Seul système bien adapté aux conduites éloignées et aux sources chaudes et froides multiples, pas de contamination de l'air neuf, réversibilité.

4. Échangeur à caloducs (fig. 7 et 8)

Description, fonctionnement

Il existe deux types de caloducs : horizontal ou vertical.

Un échangeur est constitué d'une batterie regroupant un certain nombre de caloducs disposés parallèlement sur plusieurs rangs.

Pratiquement, chaque caloduc est baigné sur la moitié de sa longueur par l'air extrait, sur l'autre moitié par l'air neuf.

Un **caloduc horizontal** est constitué d'un tube métallique étanche contenant un fluide subissant des changements d'états (vaporisation et liquéfaction). Sa paroi intérieure est tapissée d'un média capillaire.

Sous l'effet de la chaleur apportée par l'air extrait à l'extrémité du caloduc appelée évaporateur, le fluide

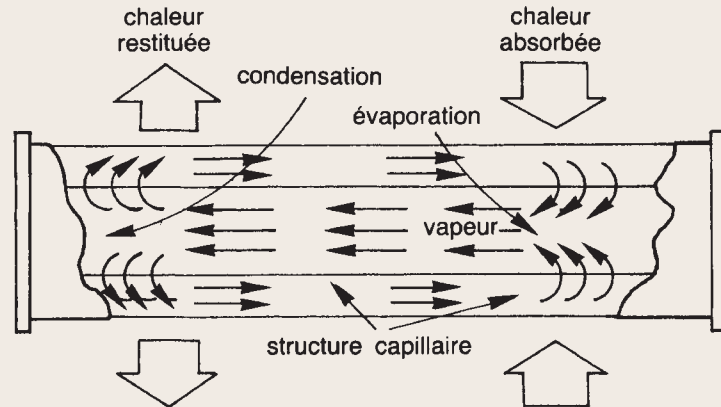


Figure 7. Schéma d'un caloduc horizontal

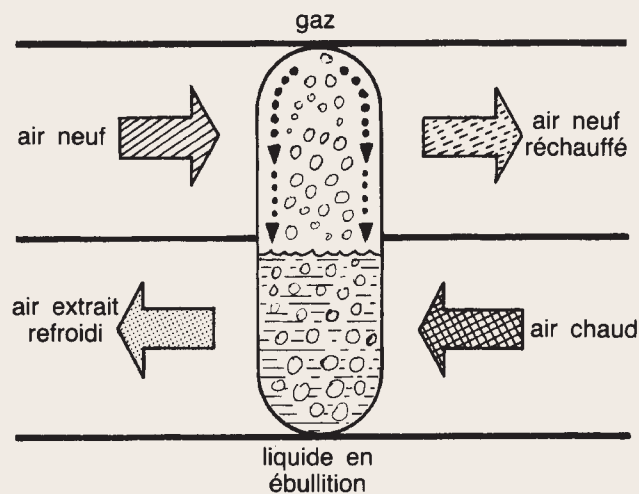


Figure 8. Schéma d'un caloduc vertical

s'évapore et tend à occuper tout le volume libre dans l'enveloppe. Le gaz se liquéfie à l'autre extrémité du caloduc (ou condenseur) en abandonnant sa chaleur latente à l'air neuf. Le liquide ainsi formé retourne à l'évaporateur grâce au média capillaire. Un transfert de chaleur continu de l'évaporateur vers le condenseur est ainsi réalisé.

L'inclinaison du tube (jusqu'à 6°) favorise ou contrarie le retour du liquide, ce qui a pour effet de réguler la capacité de transfert du caloduc, donc son efficacité. Le caloduc horizontal est réversible, c'est-à-dire que chaque extrémité peut jouer

indifféremment le rôle d'évaporateur ou d'absorbeur.

Le **caloduc vertical** diffère du caloduc horizontal par sa position et par l'absence de média capillaire. Le retour du liquide à l'évaporateur s'effectue par ruissellement sur la paroi interne du tube. Ce type de caloduc ne permet ni régulation, ni réversibilité (l'évaporateur est toujours constitué par l'extrémité basse).

Le choix des matériaux constitutifs de l'enveloppe et du média capillaire ainsi que du fluide caloporteur est fonction des conditions d'utilisation des caloducs.

Nature de l'enveloppe: cuivre, aluminium, acier.

Nature du média capillaire (caloduc horizontal): tamis métallique fibreux, fibre de verre, toile métallique, toile de verre.

Nature du fluide caloporteur: tous fluides présentant une tension superficielle, une masse volumique et une chaleur latente élevées ainsi qu'une viscosité faible (azote, propane, fréon, méthanol, eau, sodium, etc.).

Conditions et précautions d'installation

Les conduits d'air neuf et extrait doivent être contigus.

Les batteries à ailettes sont sensibles à l'encrassement.

Les batteries de caloducs horizontaux à inclinaison variable sont raccordées aux gaines par des manchettes souples.

Températures d'emploi

Le fluide caloporteur est choisi en fonction de la température d'emploi du caloduc. Exemple: ammoniac entre -70°C et $+60^{\circ}\text{C}$, méthanol entre -45°C et $+120^{\circ}\text{C}$, eau entre $+60^{\circ}\text{C}$ et $+230^{\circ}\text{C}$, lithium entre $+600^{\circ}\text{C}$ et $+1500^{\circ}\text{C}$.

Efficacité

Vertical : 50 %.

Horizontal : 60 à 75 %.

Principaux avantages

Séparation étanche entre le flux d'air traités, aucune dépense énergétique pour le fonctionnement, encombrement relativement réduit. Caloduc horizontal : réversibilité, régulation facile.

B. La pompe à chaleur

Contrairement aux échangeurs classiques qui puisent de la chaleur à une source chaude pour la transférer à une source froide, la pompe à chaleur prélève de la chaleur à une source froide pour la transférer à une source chaude.

Cette opération, qui va dans le sens inverse de la loi naturelle d'écoulement de la chaleur, ne peut se réaliser qu'à condition de fournir une certaine énergie au système, en l'occurrence au compresseur de la pompe à chaleur.

Le principe du fonctionnement de la pompe à chaleur est identique à celui du groupe frigorifique, à ceci près que dans un groupe frigorifique la chaleur utile est celle qui est prélevée à la source froide, alors que pour la pompe à chaleur la chaleur utile est celle qui est cédée à la source chaude.

Une pompe à chaleur se compose (fig. 9) :

- d'un **évaporateur** constitué d'une batterie d'échange où le fluide frigorigène de la pompe prélève de la chaleur à la source froide en se vaporisant ;

- d'un **compresseur** nécessaire à la circulation du fluide frigorigène ;

- d'un **condenseur** constitué d'une batterie d'échange où le fluide frigorigène de la pompe cède de la chaleur à la source chaude en se liquéfiant ;

- d'un **organe de détente** nécessaire à la fermeture du cycle thermodynamique du fluide frigorigène. Si Q_1 est la puissance prélevée à la source froide, W l'équivalent calorifique de la puissance de compression du fluide frigorigène, alors Q_2 puissance calorifique apportée à la source chaude, est égale à $Q_1 + W$.

On remarque ainsi que, moyennant une certaine dépense électrique au compresseur, on peut transférer de la chaleur d'un milieu disposant de calories gratuites et renouvelables à un autre milieu où la chaleur est utile, même si ce second milieu est à une température supérieure à celle du premier. L'intérêt économique et énergétique de la pompe à chaleur s'apprécie au moyen de son **coefficient de performance (COP)** qui se définit comme le rapport de l'énergie d'appoint de la source chaude (Q_2) à l'énergie dépensée au compresseur (W). À titre indicatif, comme l'énergie électrique dépensée au compresseur est onéreuse et « noble » et que l'énergie produite à la source chaude pourrait provenir de combustibles meilleur marché que l'électricité, il est nécessaire que des pompes à chaleur fonctionnent avec un coefficient de performance supérieur ou égal à 3 pour que leur emploi soit justifié.

Outre leur intérêt économique, les pompes à chaleur offrent d'autres avantages :

- leur réversibilité (elles peuvent pour la plupart fonctionner indifféremment en pompe à chaleur ou en groupe frigorifique) ;

- la non-contamination de l'air introduit par l'air extrait pollué du fait de l'absence de paroi intermédiaire entre les sources froide et chaude.

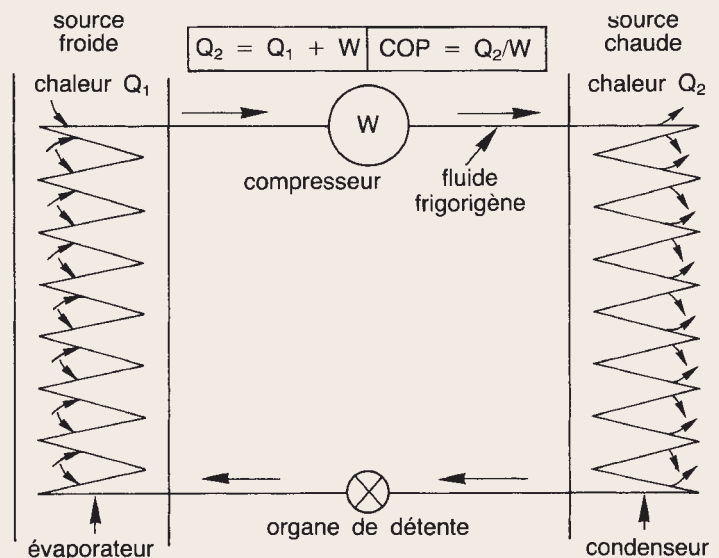


Figure 9. Schéma de fonctionnement de la pompe à chaleur

Annexe 2

Sélection des types d'épurateurs utilisables

Plusieurs mécanismes d'épuration sont possibles et peuvent éventuellement être combinés.

Pour les polluants particuliers les principaux mécanismes sont :

- **la filtration** : par exemple, sur des produits tissés, des papiers; ce mécanisme est applicable à l'enlèvement des poussières en suspension et dans certains cas des gouttelettes liquides. Les épurateurs utilisant ce mécanisme sont des dépoussiéreurs, des filtres, des dévésiculeurs;

- **la centrifugation** : ce mécanisme est utilisé couramment dans les cyclones où les particules sont précipitées sur les parois sous l'effet de la force centrifuge et éliminées; l'efficacité de ce mécanisme est, en général, faible pour les fines particules mais il est intéressant dans la mesure où il peut être utilisé en amont d'un épurateur plus efficace;

- **l'abattage par voie liquide** : c'est une sorte de lavage du gaz; les particules en suspension sont entraînées par une pluie de liquide (eau contenant éventuellement des additifs) à l'intérieur d'une cabine. Cette méthode est souvent assez efficace vis-à-vis des particules assez grossières; l'air traité ressort également fortement humide, ce qui peut poser des problèmes lors de sa réinjection dans l'atelier ou lors d'une étape suivante de purification;

- **la précipitation électrostatique** : les particules en suspension porteuses de charges électriques sont entraînées dans un champ électrique de valeur élevée obtenu entre des électrodes soumises à une haute tension continue; les particules sont alors précipitées sur un support et éliminées.

Pour les gaz et vapeurs, l'épuration peut être obtenue grâce à deux mécanismes qui ont aussi deux procédés unitaires de séparation utilisés particulièrement dans l'industrie chimique : l'absorption et l'adsorption.

L'absorption d'un constituant dans un solvant est le transfert de ce

constituant de la phase gazeuse dans laquelle il est dispersé vers la phase liquide. Le transfert dépend à la fois des propriétés thermodynamiques des constituants en présence et de leurs mélanges, et de paramètres cinétiques mettant en jeu notamment l'aire interfaciale de contact entre les phases. L'opération est généralement conduite dans une colonne où les phases circulent à contre-courant et où la surface totale d'échange de matière est augmentée grâce à un garnissage. Une unité complète d'absorption nécessite une installation de régénération du solvant; de plus, si le solvant est volatil, il est nécessaire avant d'envisager le recyclage de l'air, de le débarrasser du nouveau polluant qu'il contient.

L'adsorption : dans cette méthode on exploite la faculté qu'ont certains solides de retenir en surface des molécules étrangères, et cela de manière sélective. Les matériaux solides utilisés sont souvent le charbon actif, l'alumine, le gel de silice... sous forme de garnissages de colonnes dans lesquelles on laisse passer l'air pollué.

Le mécanisme étant un mécanisme de surface, on augmente l'aire de contact solide-gaz en opérant avec un solide très divisé (poudre-granulés) et de structure souvent poreuse. Le gaz traverse le lit verticalement de haut en bas (procédés à lit fixe) ou de bas en haut (lit fluidisé). Dans tous les cas, l'adsorption est limitée dans le temps en raison de la rapide saturation de la surface de contact; il faut alors interrompre le procédé et régénérer le lit de produit adsorbant.

En présence de plusieurs polluants, il faut aussi prendre garde au fait que certains produits légers peuvent être déplacés par des produits plus lourds et remis par conséquent en circulation bien avant la saturation complète du lit.

Un autre mécanisme d'épuration, difficilement envisageable avec une technique de recyclage mais par

contre réalisable dans un système de rejet, est l'incinération, au cours de laquelle les polluants gazeux ou particuliers sont dégradés chimiquement sous l'action d'une haute température.

Les épurateurs envisageables doivent faire l'objet d'un examen complet de leurs propriétés.

- **Efficacité globale vis-à-vis des polluants présents**. Il n'est pas possible de se contenter ici de l'efficacité annoncée par certains fabricants pour certains éléments d'épuration, tout d'abord parce qu'il existe plusieurs manières de définir cette efficacité, ensuite parce que les conditions d'essai de ces éléments d'épuration ne sont pas forcément les mêmes que celles qui seront rencontrées réellement dans l'atelier ou l'usine. Enfin, dans une situation réelle, la notion d'efficacité n'est pas la seule à considérer; la concentration en aval de l'épurateur est une notion fondamentale pour apprécier son degré d'adaptation. L'efficacité d'un épurateur s'exprime par son rendement, sa perméance ou son coefficient d'épuration.

Pour les épurateurs d'efficacité élevée, on utilise de préférence la notion de coefficient d'épuration défini par le rapport de la concentration du polluant à l'entrée et de la concentration à la sortie.

L'efficacité varie tout d'abord avec le polluant considéré mais aussi, dans le cas de la filtration, avec le temps; un filtre n'a pas une efficacité constante en cours de fonctionnement et il est nécessaire, pour envisager un recyclage, de compter au départ sur une efficacité minimale.

- **Débits disponibles pour le traitement de l'air** : ce sont les volumes d'air qui pourront être épurés avec l'efficacité annoncée par unité d'épuration et par unité de temps.

- **Encombrement du matériel**.

- **Spécificité** : c'est l'aptitude de l'épurateur à retenir un seul ou plusieurs

polluants ou familles de polluants. Une grande spécificité des matériels et la présence de plusieurs substances dont on veut se débarrasser obligeront à prévoir l'association de plusieurs unités élémentaires, entraînant corrélativement des investissements importants.

– **Modes de pannes et de déficiences:** processus suivant lequel les performances du matériel d'épuration peuvent être diminuées, ainsi que celles des systèmes de captage à la source. Par exemple, dans les dépoussiéreurs à manches, largement répandus par ailleurs dans le monde industriel, la charge excessive d'une manche ou d'une série de manches peut entraîner, en raison de l'augmentation de résistance à l'écoulement, une baisse de débit venant à altérer sérieusement l'efficacité de captage d'un dispositif placés sur une machine; une déficience de l'épurateur, par exemple consécutive à un mauvais calcul de la fréquence de colmatage, implique donc ici une déficience du captage d'où une élévation de la concentration de poussières en suspension dans une zone de travail, déficience qui risque de passer inaperçue sans moyen de contrôle, ou dans le cas particulier du contrôle à la seule sortie de l'épurateur. Toujours avec le même exemple, une panne franche peut consister en la rupture d'une manche; cette fois le débit ne sera pas perturbé mais l'air pollué ne va pas être traité et les poussières, en particulier les poussières respirables, pourront être recyclées.

– **Facilité de détection d'un mauvais fonctionnement:** cette détection peut être assurée par le contrôle d'un paramètre caractéristique de l'épurateur, par exemple la pression statique en amont d'un dépoussiéreur, ou un débit de liquide sur un laveur de gaz. La détection indirecte d'une déficience ou

d'une panne avant même le repérage d'une anomalie au niveau de la qualité de l'air traité est souhaitable mais non à elle seule suffisante.

– **Fiabilité:** cette qualité est fondamentale sur le plan de la justification économique du recyclage. Toute installation peu fiable mais conforme à l'esprit du protocole présenté plus haut (chapitre 3), c'est-à-dire en particulier permettant de prendre rapidement des décisions de sauvegarde en cas d'incident (by-pass, arrêt des machines ou des procédés polluants), serait vite inutilisable et conduirait à des investissements sans espoir d'amortissement. Le matériel d'épuration utilisé pour un recyclage d'air doit être impérativement de qualité éprouvée et conforme à un cahier des charges strict.

– **Facilité de maintenance de l'appareillage:** la maintenance d'une installation d'épuration est une opération normale qui doit être effectuée périodiquement par un agent qualifié qui doit par ailleurs consigner ses vérifications sur un cahier de maintenance mis à disposition des personnes chargées du contrôle des règles d'hygiène du travail. Cette maintenance peut nécessiter l'arrêt momentané de l'installation; la facilité et la rapidité avec lesquelles elle peut être effectuée est aussi un critère de décision non négligeable.

– **Récupération des polluants et impact sur le personnel ou l'environnement:** lors des opérations de maintenance ou pendant le fonctionnement de l'installation, les polluants piégés doivent être évacués à l'extérieur de la zone de travail; cette récupération peut elle-même mettre en danger les agents affectés à cette tâche et il est important de prendre en considération ce facteur lors de l'avant-projet d'installation.

– **Modification des caractéristiques de l'air épuré:** l'air à la sortie du système d'épuration, bien que débarrassé de ses substances toxiques, peut être sensiblement différent de l'air extérieur; il peut contenir par exemple plus d'humidité (utilisation de laveurs), d'ozone (dépoussiéreurs électrostatiques) et il faut étudier l'impact éventuel de ces modifications sur les conditions ambiantes.

– **Coûts:** investissement et fonctionnement (énergie, maintenance).

La combinaison de plusieurs unités d'épuration (semblables ou de types différents) peut être intéressante sur le plan de l'efficacité et des débits traités. On ne peut pas donner de recommandations générales sur ce problème qui doit être étudié cas par cas, mais on peut toutefois faire un certain nombre d'observations.

– Quand plusieurs rejets doivent être épurés et recirculés, on obtiendra de meilleures conditions de sécurité en installant des dispositifs d'épuration en parallèle (par exemple: un pour chaque rejet), puis en regroupant les courants épurés avant renvoi dans l'atelier.

– Quand il y a nécessité de prévoir plusieurs épurateurs en série (présence de polluants gazeux et particulaires à la fois) l'ordre de placement des unités n'est généralement pas indifférent.

– La redondance d'unités semblables en série n'est pas en général économiquement satisfaisante, bien que bonne pour la sécurité. Il peut être intéressant de protéger la vie des unités par des unités de pré-épuration, et de faire succéder à l'unité principale une unité de sécurité qui agit, en cas d'incident, sur les deux premières.

Systèmes destinés à la surveillance du fonctionnement d'une installation de recyclage

1. Système automatique / Système manuel

Système automatique: pas d'intervention d'un opérateur, contrôle continu ou semi-continu (par exemple: séquentiel); ce système est adapté à une mise en alerte en « temps réel » lors de toute défaillance du système de recyclage.

Système manuel: nécessite un certain degré d'intervention de la part d'un opérateur (prise d'échantillon, conduite d'un prélèvement ou d'une analyse, lecture et interprétation de résultats de mesures...).

La classification des systèmes de surveillance est ainsi fondée sur le mode d'action globale de la chaîne: détection – analyse – interprétation – alarme. Un appareil de mesures sophistiqué peut très bien correspondre à un système manuel si l'interprétation des résultats qu'il fournit nécessite l'intervention d'un spécialiste.

Dans le choix de ces systèmes intervient une grandeur importante: le temps critique de réponse. Supposons que la concentration en un point de la zone de travail soit stationnaire et égal à C_1 , et qu'à l'instant $t = 0$ un incident se produise sur le système d'épuration, la concentration au point considéré va croître jusqu'à une valeur stationnaire C_2 en suivant approximativement une loi exponentielle (fig. 10):

$$C(t) = C_1 + (C_2 - C_1) [1 - \exp(-t/t_0)].$$

T_0 est une constante permettant de caractériser la rapidité avec laquelle la concentration en polluant va monter au point considéré: c'est la **constante de temps** de l'installation complète de ventilation (ventilation générale + ventilation locale + recyclage). Le **temps critique de réponse** est l'intervalle de temps au bout duquel, à partir du même instant de référence $t = 0$, la concentration instantanée $C(t)$, ou la concentration moyenne par rapport

au temps, atteint une certaine valeur limite. Au-dessus de ce temps critique, même si l'alarme est déclenchée, le personnel risquera d'être exposé dangereusement aux produits toxiques, surtout si la valeur limite d'exposition envisagée est une valeur plafond.

Dans l'exemple de la figure 10, on a imaginé un contrôle continu de la concentration instantanée, qui a déclenché le rejet à l'extérieur de l'air épuré, dès le dépassement de la valeur de contrôle (VC) fixée, à la suite d'un incident sur l'épurateur. Dans ces conditions, la concentration moyenne pondérée dans le temps ne dépassera jamais la VC. On peut également envisager un temps critique de réponse plus long en ne provoquant le déclenchement de l'alarme qu'à partir d'une valeur de la concentration instantanée supérieure à la VC, mais telle que la concentration moyenne pondérée dans le temps soit au plus égale à la VC. Cette dernière éventualité ne doit pas être retenue si le polluant possède une valeur limite d'exposition de court terme (VLCT).

Cette valeur limite, qu'on pourra appeler valeur de contrôle, sera prise

inférieure à la VLEP et égale à $VLEP/n$ ($n > 1$), afin de rendre raisonnable le délai de réponse et ne pas provoquer inutilement un dépassement de la VLCT en cas d'incident: la détermination du temps critique de réponse peut se faire au cours d'une étude de mise en régime de l'installation ou par une analyse en régime transitoire. Compte tenu de ces considérations, un système de surveillance automatique doit satisfaire la condition suivante: la somme des intervalles de temps entre les échantillonnages et le moment où une réponse d'urgence peut être déclenchée doit être inférieure au temps critique de réponse.

Le choix d'un système manuel, du fait qu'il implique la possible erreur humaine, n'est recommandé que si les conditions suivantes sont satisfaites:

- la condition précédente est applicable;
- le temps critique de réponse est dans tous les cas de quelques heures;
- les seuls polluants présents sont des nuisances et non des produits toxiques;
- si les polluants sont des gaz ou vapeurs non toxiques mais asphyxiants

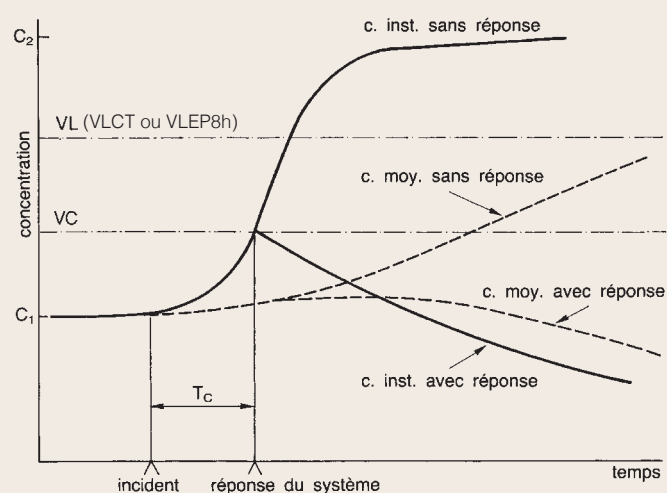


Figure 10. Évolution de la concentration en polluant avec et sans réponse du système (rejet de l'air pollué)

(par défaut d'oxygène), un détecteur continu à gaz combustible ou un analyseur de défaut d'oxygène peut suffire. Mais dans ce cas, on ne trouvera pas d'épurateur et le recyclage doit être abandonné.

Si l'une des conditions énumérées ci-dessus est remplie et si un système de contrôle manuel est adopté, les étapes suivantes doivent malgré tout être programmées.

- Un protocole écrit de surveillance doit être rédigé et la responsabilité d'un employé spécialement nommé doit être engagée.

- Tous les employés d'un atelier où est mis en œuvre un dispositif de recyclage doivent être informés de l'impact possible d'une défaillance du système et des mesures à prendre en cas d'alarme (évacuation, surveillance du bon état des dispositifs de by-pass...).

- Toutes les observations doivent être consignées par écrit et régulièrement transmises au service de l'usine chargé de la sécurité.

2. Contrôle d'ambiance / Contrôle de la sortie de l'épurateur

Le **contrôle d'ambiance** présente plusieurs désavantages :

- le système de contrôle doit tenir compte des fluctuations possibles de concentrations dues au fonctionnement même des procédés industriels avant de déclencher éventuellement une alarme ;

- du fait de la dilution du polluant dans l'air ambiant, un système de contrôle d'ambiance possédera un temps de réponse plus long qu'un système branché à la sortie de l'épurateur (sur le circuit d'air traité).

Pour qu'un système de contrôle de l'atmosphère ambiante soit approprié, les conditions suivantes doivent être respectées, à moins qu'aucun polluant ne soit toxique :

- les fluctuations de concentration en polluants dues au fonctionnement normal des procédés de l'atelier doivent être connues ;
- les pics de concentration doivent

être inférieurs au niveau correspondant au temps de réponse critique défini par l'analyse du système en régime non permanent ;

- des capteurs d'ambiance doivent être situés aux points « sensibles » (déterminés par exemple à l'aide de traceurs utilisés en ventilation), c'est-à-dire les points susceptibles d'être les plus affectés par une défaillance du système de recyclage.

Le **contrôle en rejet** présente l'avantage de mesurer des concentrations en polluant dont les fluctuations sont amorties par le système d'épuration ; d'autre part, il n'est jamais nécessaire de multiplier les points de prélèvement (réduction de l'investissement). Par contre un tel système de contrôle devra comporter non seulement un ou plusieurs dispositifs de mesure de concentration mais aussi des dispositifs de mesure de débit de rejet, car par exemple une baisse de débit due au colmatage d'un élément filtrant de l'épurateur va entraîner une baisse de l'efficacité de captage des polluants à la source et une augmentation de la concentration ambiante, tout en montrant une diminution de la concentration en polluant dans l'air épuré.

Ce type de contrôle est recommandé si toutes les défaillances ou pannes des systèmes de captage et d'épuration peuvent être détectées (concentrations, débits). La concentration d'intervention doit être déterminée à partir d'une étude préalable de la relation avec la concentration ambiante.

3. Système spécifique / Système non spécifique

Les **systèmes spécifiques** fournissent généralement plus d'information et peuvent aider au diagnostic d'une déficience, mais demandent plus de compétences pour analyser les résultats (notamment dans le cas des mélanges).

Ils peuvent être utilisés si :

- l'identité de tous les polluants est connue ;

- chaque polluant dont le niveau de concentration peut dépasser une valeur acceptable est contrôlé en permanence ;

- la violation de la limite permise déclenche une procédure d'urgence.

Les **systèmes non spécifiques**, quant à eux, doivent satisfaire les conditions suivantes :

- la caractéristique mesurée de l'air ambiant (conductivité thermique, résistivité électrique...) doit changer de manière significative avec la concentration de chaque polluant ;

- il doit être possible de s'assurer que le niveau de concentration de sécurité sélectionné permet effectivement le déclenchement d'une alarme.

En résumé

Chaque système de surveillance et de contrôle de la qualité de l'air peut être classé dans l'une des catégories précédentes, définies à partir de la considération du degré d'automatisme, de la position et du principe de fonctionnement. Pour chaque situation, le choix entre plusieurs systèmes possibles doit faire intervenir, en outre, des critères de commodité, de disponibilité du matériel (ou de pièces de rechange) et de prix.

4. Réactions à une ou plusieurs défaillances du système de captage

Comme on l'a vu antérieurement, la vitesse avec laquelle les réponses peuvent être (ou doivent être) déclenchées en cas d'anomalie jouera sur les performances requises du système de surveillance ; l'inverse est également vrai. De fait, il apparaît nécessaire d'adopter et de définir un plan de réponses à appliquer dès la conception d'un système de recyclage. Une seule alternative de réponse apparaît possible.

By-pass de l'air rejeté de l'épurateur

Il faut alors prévoir l'installation d'un dispositif permettant d'évacuer à l'extérieur l'air rejeté, dont les caractéristiques ne sont plus conformes au cahier des charges établi. Ce dispositif peut être automatique ou manuel (manœuvre exécutée par un employé ou déclenchement d'une alarme

sonore par exemple). Les systèmes automatiques présentent au moins deux avantages :

– ils éliminent le risque d'absence de réaction par absence même momentanée de l'agent chargé de cette opération ;

– ils ont un temps de réponse rapide.

Pour des produits toxiques un système automatique devrait s'imposer.

Arrêt des activités polluantes

Il peut être suivi, selon la toxicité des polluants, d'une évacuation des locaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Partridge L.J., Nayak P.R., Stricoff R.S., Hagopian J.H., *A recommended approach to recirculation of exhaust air*, Cincinnati, DHEW (NIOSH) Publication n° 78-124, 1978.
- *The recirculation of industrial exhaust air. Proceedings of a symposium sponsored by the NIOSH*, oct. 77, Cincinnati, DHEW (NIOSH) publication n° 78-141, 1978.
- Bullock L.F., *Validation of a recommended approach to recirculation of industrial exhaust air*, vol. II, Cincinnati, DHEW (NIOSH) publication n° 79-143 B, 1979.
- Holcomb M.L., Scholz R.C., *Evacuation of air cleaning and monitoring equipment used in recirculation systems*, Cincinnati, DHHS (NIOSH) publication n° 81-113, 1981.
- *Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France*, Paris, INRS, 2012, ED 984.
- *Guide pratique de ventilation n° 0 – Principes généraux de ventilation*, Paris, INRS, 1988, ED 695.

COLLECTION DES GUIDES PRATIQUES DE VENTILATION

0. Principes généraux de ventilation	ED 695
1. L'assainissement de l'air des locaux de travail	ED 657
2. Cuves et bains de traitement de surface	ED 651
3. Mise en œuvre manuelle des polyesters stratifiés	ED 665
4. Postes de décochage en fonderie	ED 662
5. Ateliers d'encollage de petits objets (chaussures)	ED 672
6. Captage et traitement des aérosols de fluides de coupe	ED 972
7. Opérations de soudage à l'arc et de coupage	ED 668
8. Espaces confinés	ED 703
9. 1. Cabines d'application par pulvérisation de produits liquides	ED 839
9. 2. Cabines d'application par projection de peintures en poudre	ED 928
9. 3. Pulvérisation de produits liquides. Objets lourds ou encombrants	ED 906
10. Le dossier d'installation de ventilation	ED 6008
11. Sérigraphie	ED 6001
12. Seconde transformation du bois	ED 750
13. Fabrication des accumulateurs au plomb	ED 746
14. Décapage, dessablage, dépolissage au jet libre en cabine	ED 768
15. Réparation des radiateurs automobiles	ED 752
16. Ateliers de fabrication de prothèses dentaires	ED 760
17. Emploi des matériaux pulvérulents	ED 767
18. Sorbonnes de laboratoire	ED 795
19. Usines de dépollution des eaux résiduaires et ouvrages d'assainissement	ED 820
20. Postes d'utilisation manuelle de solvants	ED 6049
21. Ateliers de plasturgie	ED 6146
22. Laboratoires d'anatomie et de cytologie pathologiques	ED 6185



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00
www.inrs.fr • info@inrs.fr

Édition INRS ED 657

2^e édition (1989) • réimpression décembre 2014 • 1 000 ex. • ISBN 978-2-7389-1678-5

