

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement
Entreprise GENERAL ELECTRIC

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie de l'environnement

Etude et proposition d'un système d'extraction des émanations des vapeurs acides non contrôlées de la station de décapage chimique d'ALGESCO GE

OURABAH Abdelmalek

MEGARI Mohamed Anis

Présenté et soutenu publiquement le 13/07/2021

Composition du jury :

Présidente	Mme. Naima DJELLOULI	Maitre de Conférences B	ENP, Alger
Promoteur	M. Yacine KERCHICH	Maitre de Conférences A	ENP, Alger
Examineur	M. Amar SELATNIA	Professeur	ENP, Alger
Invité	M. Abderrezak AKRETCHE	Process engineer	ALGESCO, Alger

ENP 2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Entreprise GENERAL ELECTRIC

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie de l'environnement

Etude et proposition d'un système d'extraction des émanations des vapeurs acides non contrôlées de la station de décapage chimique d'ALGESCO GE

OURABAH Abdelmalek

MEGARI Mohamed Anis

Présenté et soutenu publiquement le 13/07/2021

Composition du jury :

Présidente	Mme. Naima DJELLOULI	Maitre de Conférences B	ENP, Alger
Promoteur	M. Yacine KERCHICH	Maitre de Conférences A	ENP, Alger
Examineur	M. Amar SELATNIA	Professeur	ENP, Alger
Invité	M. Abderrezak AKRETCHE	Process engineer	ALGESCO, Alger

ENP 2021

ملخص

الغرض من هذا العمل هو معالجة الأبخرة الحمضية المنبعثة دون ضوابط في محطة التخلييل الكيميائية لشركة ALGESCO وللقيام بذلك ، اقترحنا نظاما لاستخراج الأبخرة الحمضية بمساعدة جهاز استشعار مع فتحة امتصاص يتبعها عمود امتصاص مع التعبئة. من أجل تقدير تركيزات الانبعاثات الغازية الحمضية المنبعثة (HF, HCl, H₃PO₄) في منطقة التخلييل الكيميائي. قمنا بعمليتين للقياس. وأظهرت النتائج أن التركيزات المقاسة كانت أقل كثيراً من قيم حد التعرض المهني لمدة 8 ساعات (VLEP-8 h). ويستند تصميم عمود الامتصاص إلى خليط الترددات العالية في الهواء فقط. وكان من المفترض أن يكون تركيز الترددات العالية في خيوط المخلل الكيميائية أكبر من 100 VLEP-8h. وتم تأكيد النتائج النظرية وإقرارها بواسطة برنامج المحاكاة ASPEN HYSYS V10. الكلمات المفتاحية: عمود الامتصاص ، الملوثات ، تدفق الغاز ، الامتصاص.

:الكلمات المفتاحية

بخار حمضي، الملوثات، عمود التعبئة ، تخطيط، تدفق الغاز ، الامتصاص.

Abstract

The objective of the present work was to treat acid vapors emitted in an uncontrolled way in the stripping station in ALGESCO. To do so, we proposed an extraction system for those vapors using a sensor with a suction slot then we treat them with a packed absorption column. To estimate the concentration of the fugitives acid gazes (HF, HCl, H₃PO₄) in the stripping station, two-measurement campaign were made. The results showed that the concentration are way below the professional exposure limit value in 8 hours (OELV-8h). The design of the absorption column was based only for the air-HF mixture. We supposed the HF concentration 100 times more than the PLEV-8h. The theoretical results were confirmed and validated by the simulation software ASPEN HYSYS V10.

Key words: acids vapors, pollutant, packed column, design, gas flow rate, absorption.

Résumé

Le présent travail a pour but de traiter les vapeurs acides émises de façon non contrôlées dans la station de décapage chimique d'ALGESCO. Pour ce faire, nous avons proposé un système d'extraction des vapeurs acides à l'aide d'un capteur avec fente d'aspiration suivi d'une colonne d'absorption à garnissage. Pour l'estimation des concentrations des émissions fugitives des gaz acides (HF, HCl, H₃PO₄) au niveau de la zone de décapage chimique, deux campagnes de mesures ont été effectuées. Les résultats obtenus ont montré les concentrations mesurées étaient largement inférieurs aux valeurs limites d'exposition professionnelle sur 8 heures (VLEP-8h). Le dimensionnement de la colonne d'absorption a été basé seulement sur le mélange air-HF. La concentration du HF au niveau des bacs de décapage chimique était supposée 100 fois supérieures à la VLEP-8h. Les résultats obtenus théoriquement ont été confirmés et validés par le logiciel de simulation ASPEN HYSYS V10.

Mots clés : vapeurs acides, polluant, colonne à garnissage, dimensionnement, débit de gaz, absorption.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma mère, ma source de vie, d'amour et d'affection.

A mon père pour son soutien, ses sacrifices et la confiance qu'il m'a accordée.

A mon repère et confident, mon très cher frère Danil.

A la mémoire de mes deux oncles bien aimés Didine et Si Kamel.

A Anis, cher ami avant d'être binôme.

*A mes chers amis : Moh, Otba, Ramzi, Nacim, Rami, Meziane, Dalil
et Ishak.*

A toutes mes plus belles rencontres au sein du CAP.

Que le fait d'être lue puisse être et rester ma plus belle rétribution.

Abdelmalek

Je dédie ce travail

A

Mon très cher père et ma très chère mère

Pour leur soutien, les sacrifices et tous les efforts consentis

Pour mon éducation et ma formation.

A

Mes deux prunelles de mes yeux, mes deux chères sœurs.

A

Malek mon cher ami et binôme.

A

Mes chers amis de Blida Anis, Aziz, Taki, Islem, Housseem, Mehdi, Mosaab.

A

Mon camarade de classe et ami, Youcef de Dellys.

Anis

Remerciements

Louange à Dieu seul, clément et miséricordieux

Tous d'abord, nous adressons nos reconnaissances et vifs remerciements à notre encadreur Monsieur Yacine Kerchich, qui nous a assistés durant toute cette période de stage avec son soutien moral et ses précieux conseils afin de mener à bien notre projet de fin d'études, dans l'espérance qu'il soit à la hauteur de ses attentes.

Nos sincères remerciements vont à Monsieur le Président Directeur Général Bahi BELLATACHE, Monsieur Abderezzak Akretche, Mesdames Nabila Beladjal et Nacera Ourabah pour leurs assistances techniques et morale qu'ils nous ont prodiguées pour l'élaboration du présent travail.

Nous saisissons cette occasion pour destiner à nos professeurs ayant contribué à notre formation nos remerciements les plus sincères, ainsi qu'aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.

Que toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de notre projet, veuille trouver ici le témoignage de gratitude et de remerciements.

Abdelmalek et Anis

Table des matières

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
1. Chapitre 1 : Revu de Littérature	
1.1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE :	19
1.1.1. General Electric :	19
1.1.2. Présentation de l'organisme d'accueil ALGESCO :	21
1.2. Généralités sur la pollution de l'air intérieur	26
1.2.1. Polluants de l'air intérieur	26
1.2.2. Sources de pollution	32
1.3. Techniques de quantification des émissions diffuses et fugitives	34
1.3.1. Définitions :	34
1.3.2. Principes de quantification des émissions diffuses et fugitives :.....	36
1.4. Techniques de traitement des fumées :	38
1.4.1. Systèmes de traitement de l'air - cas d'absorption : transfert gaz-liquide.	38
1.4.2. Différents types de contacteur gaz-liquide :	39
1.4.3. Modélisation du transfert de matière :	45
2. Chapitre 2 : Méthodes et outils utilisés	
2.1. Stratégie d'échantillonnage :	50
2.1.1. Description de la stratégie d'échantillonnage :.....	50
2.1.2. Mesurage des vapeurs acides de la station de stripping d'ALGESCO :	53
2.1.3. Echantillonnage et analyse de l'air :.....	53
2.1.4. Méthode d'extraction des gaz acides :	55
2.1.5. Dimensionnement du système de canalisation des vapeurs acides :	56
2.1.6. Etude de la colonne à garnissage :	59
2.1.7. Simulation sur Aspen HYSYS :	72
3. Chapitre 3 : Résultats et interprétation	
3.1. Résultats :	74
3.1.1. Analyse des vapeurs acides au niveau de l'enceinte de stripping d'ALGESCO :.....	74
3.1.2. Dimensionnement du système de canalisation des vapeurs acides :	75
3.1.3. Etude de la colonne à garnissage :	76
3.1.4. Simulation sur ASPEN HYSYS :	85

3.2. Description du procédé proposé pour l'entreprise ALGESCO :	91
Conclusion générale	93
Références bibliographiques	94
Annexe	97

Nomenclature

Notations latines

a_p	Surface spécifique	$m^2 \cdot m^{-3}$
$C_{A,0}$	Concentration du soluté A loin de l'interface	$mol \cdot m^{-3}$
$C_{A,i}$	Concentration du soluté à l'interface gaz-liquide	$mol \cdot m^{-3}$
$C_{B,0}$	Concentration du soluté B loin de l'interface	$mol \cdot m^{-3}$
C_G	Concentration molaire ou concentration massiques en phase gaz	$mol \cdot m^{-3}$ ou $g \cdot L^{-1}$
C_G^*	Concentrations de la phase gaz en équilibre thermodynamique avec une phase liquide	$mol \cdot m^{-3}$
$C_{G,i}$	Concentration à l'interface côté gaz	$mol \cdot m^{-3}$
C_L	Concentration molaire ou massique en phase liquide	$mol \cdot m^{-3}$
C_L^*	Concentration de la phase liquide en équilibre thermodynamique avec une phase gazeuse	$mol \cdot m^{-3}$
$C_{L,i}$	Concentration à l'interface côté liquide	$mol \cdot m^{-3}$
d	Diamètre de la colonne	m
d_e	Diamètre équivalent	m
D	Diffusivité massique moléculaire	$m^2 \cdot s^{-1}$
$D_{A,G}$	Coefficients de diffusion du soluté A en phase gaz	$m^2 \cdot s^{-1}$
$D_{A,L}$	Coefficients de diffusion du soluté A en phase liquide	$m^2 \cdot s^{-1}$
$D_{B,L}$	Coefficients de diffusion du soluté B en phase liquide	$m^2 \cdot s^{-1}$
g	Accélération de la pesanteur	$m \cdot s^{-2}$
G	Débit massique ou molaire du gaz	$g \cdot s^{-1}$ ou $mol \cdot s^{-1}$
G'	Débit massique de gaz par unité de surface	$g \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ ou $mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
Ha	Nombre de Hatta	--

H_e	Constante de Henry du soluté dans le solvant	Pa
HUT_G	Hauteur d'unité de transfert côté film gazeux	m
HUT_L	Hauteur d'unité de transfert côté film liquide	
HUT_{OG}	Hauteur d'unité de transfert globale de la phase gazeux	m
HUT_{OL}	Hauteur d'unité de transfert globale de la phase liquide	m
K_G	Coefficient global de transfert de matière côté gazeux	$m. s^{-1}$
k_G	Coefficient de transfert de matière en phase gazeux	$m. s^{-1}$
K_L	Coefficient global de transfert de matière côté liquide	$m. s^{-1}$
k_L	Coefficient de transfert de matière en phase gazeux	$m. s^{-1}$
N_A	Flux transféré par unité d'aire d'échange	$kmol. m^{-2}. s^{-1}$
k_2	Constante cinétique de second ordre	$L. mol^{-1}. s^{-1}$
L	Débit massique ou molaire du liquide	$g. s^{-1}$ ou $mol. s^{-1}$
L'	Débit massique de liquide par unité de surface	$g. s^{-1}. m^{-2}$
k	Pente de la droite opératoire	—
K	Pente de la droite d'équilibre	—
N	Densité du flux molaire	$mol. m^{-2}. s^{-1}$
NUT_G	Nombre d'unité de transfert côté film gazeux	—
NUT_L	Nombre d'unité de transfert côté film liquide	—
NUT_{OG}	Nombre d'unités de transfert global de la phase gazeux	—
NUT_{OL}	Nombre d'unités de transfert global de la phase liquide	—
p	Pression partielle dans la phase gazeuse	Pa
P	Pression totale du système	Pa
P_A	Pression partielle du composé A dans la phase gaz	Pa
$P_{A,i}$	Pression partielle du composé A dans la phase gaz, à l'interface	Pa
p_i	Pression partielle dans la phase gaz, à l'interface	Pa
p^*	Pression partielle dans la phase gaz, à l'interface, à l'équilibre avec un liquide de titre x	Pa

p^{sat}	Pression de vapeur saturante du soluté	Pa
Q	Débit volumique de gaz	$m^3 \cdot s^{-1}$
S	Aire de la section	
t	Temps	s
T	Température	K
U	Vitesse maximale d'engorgement de la phase gazeuse	$m \cdot s^{-1}$
V	Volume de la colonne	m^3
x	Titre molaire d'une espèce en solution	—
x_i	Titre molaire à l'interface coté liquide	—
y	Titre molaire d'une espèce en phase gazeuse	—
y_i	Titre molaire à l'interface coté gaz	—
Z	Hauteur utile de la colonne	m

Symboles grecs

μ_G	Viscosité du gaz	$Pa \cdot s$
μ_L	Viscosité du liquide	$Pa \cdot s$
ε	Fraction de vide en volume	—
ρ	Masse volumique	$Kg \cdot m^{-3}$
Ψ	Terme correctif pour les liquides visqueux de densité différente de celle de l'eau	—

Notation des composés

H_2O	Eau
HF	Acide fluorhydrique
H_3PO_4	Acide phosphorique
$NaOH$	Hydroxyde de sodium
HCl	Acide chlorhydrique

Indice

e	Caractérise la phase qui rentre dans la colonne
s	Caractérise la phase qui sort de la colonne

Symboles fonctionnels

\int	Opérateur « intégrale »
\ln	Logarithme népérien
d	Opérateur différentielle

Abréviations et acronymes

GE	General Electric
COV	Composés organiques volatils

Liste des figures :

Figure 1-1: Organigramme d'ALGESCO.	21
Figure 1-2: Processus de décapage chimique.	25
Figure 1-3: Cuve de base de l'installation de décapage.	26
Figure 1-4: Origine des particules selon leur granulométrie (CITEPA, 2013).	29
Figure 1-5: Pénétration des particules dans le système respiratoire, adaptée de (Le Coq, 2006).	30
Figure 1-6: Sources de polluants intérieures aux bâtiments.	33
Figure 1-7: Sources de polluants extérieures aux bâtiments.	34
Figure 1-8: Emissions canalisées, diffuses et fugitives.	35
Figure 1-9: Principe de la méthode hotte/cheminée mobile.	36
Figure 1-10: Principe de la mesure en toiture.	37
Figure 1-11: Principe de la mesure au vent/sous le vent.	38
Figure 1-12: contact entre les 2 phases.	39
Figure 1-13: Représentation d'un plateau à chicanes.	43
Figure 1-14: Equipements d'un laveur à pulvérisation.	44
Figure 1-15: modèle du double film [7]	47
Figure 2-1: Schéma décisionnel d'évaluation de l'exposition.	50
Figure 2-2: Pompe à prélèvement d'échantillons.	53
Figure 2-3: Station de prélèvement 1.	54
Figure 2-4: Station de prélèvement 2.	55
Figure 2-5: Schéma de la démarche suivie.	55
Figure 2-6: Dimensions du bac.	56
Figure 2-7: Vue de face de la table aspirante placée au-dessus du bac.	56
Figure 2-8: Vue arrière de la table aspirante.	57
Figure 2-9: Modèle d'extracteur (25).	58
Figure 2-10: Colonne à garnissage (28).	59
Figure 2-11: Courbe d'équilibre gaz-liquide à $T=25^{\circ}\text{C}$ et $P=1\text{ atm}$	61
Figure 2-12: Abaque généralisé représentant l'engorgement et les pertes de charge au sein d'un garnissage (34).	64
Figure 2-13: Bilan de la colonne d'absorption (35).	65
Figure 2-14: Calcul du nombre d'unités de transfert par intégration graphique (35).	68
Figure 3-1: Schéma de la colonne d'absorption.	76
Figure 3-2: Calcul du taux du solvant molaire minimum.	77
Figure 3-3: Abaque de Sherwood et al modifié par Eckert donnant A en fonction de B.	79
Figure 3-4: Droite d'équilibre.	82
Figure 3-5: Sélection des composés.	85
Figure 3-6: Choix du modèle thermodynamique.	86
Figure 3-7: Paramètres du liquide en entrée.	86
Figure 3-8: Paramètres du gaz en entrée.	87

Figure 3-9: Compositions en fractions molaire du gaz en entrée	87
Figure 3-10: Composition en fractions molaire du liquide en entrée.....	88
Figure 3-11: Paramétrage de la colonne d'absorption.....	88
Figure 3-12: Choix et caractéristiques du garnissage.....	89
Figure 3-13: Design final de la colonne.....	89
Figure 3-14: Schéma final de la colonne d'absorption.....	90
Figure 3-15: Composition dans toutes les phases.	90
Figure 3-16: Comparaison des débits massiques dans toutes les phases.....	91
Figure 3-17: Schéma représentatif du procédé proposé.	92

Liste des tableaux :

Tableau 1-1: Liste des principaux contacteurs gaz-liquide.	40
Tableau 1-2: Caractéristiques de quelques garnissages en vrac.	42
Tableau 1-3: Caractéristiques des différents régimes et choix des contacteurs gaz-liquide à partir de la détermination du nombre Hatta.	48
Tableau 2-1: Plan d'échantillonnage.	53
Tableau 2-2: Polluants ciblés par l'échantillonnage.	54
Tableau 2-3: pression partielle de HF vapeur en fonction des fractions molaires de HF liquide.	60
Tableau 2-4: Fractions molaires de HF vapeur en fonction des fractions molaires de HF liquide.	61
Tableau 3-1: Résultats de la quantification.	74

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

De nos jours les conséquences liées à la pollution de l'air sont pratiquement constatées à tous les niveaux et ils se manifestent par exemple à l'échelle planétaire par les changements climatiques et l'effet de serre et, à l'échelle locale des environnements urbains ou industriels par la pollution de l'air ambiant extérieur, et à l'échelle de l'environnement de l'individu, par la pollution de l'air intérieur. Des études européennes ont montré que généralement les individus dans les pays industrialisés passent la plupart de leur temps (en moyenne 80 %) dans des milieux clos ou semi clos (logements, lieux de travail, écoles...). Dans ces espaces, l'inhalation des polluants présents dans l'air peuvent provoquer des effets sur le confort et la santé des personnes, d'une simple gêne (odeur, irritation des yeux et de la peau) au développement de maladies respiratoires pour les personnes sensibles [1].

Ces dernières années et avec le développement du niveau de vie et l'évolution des normes et réglementations liées à la conception, aux procédés de fabrication et à la qualité des produits à utiliser, la question de la relation entre les paramètres de l'environnement intérieur et la performance est aujourd'hui posée. Pour mieux satisfaire les exigences d'occupation, différents aspects de l'environnement intérieur des locaux sont pris en compte selon deux notions : le confort (l'ambiance thermique, acoustique, visuel) et la qualité de l'air (aspect sanitaire et confort olfactif). Ainsi, par exemple dans le logement ou les bureaux, des centrales de traitement d'air (CTA) peuvent être mises en place dans les systèmes de ventilation pour répondre à ces exigences, qui sont différentes selon le type de local, son utilisation, son niveau de confort et ses objectifs de qualité de l'air [2]. Dans les ateliers et les locaux de travail, des systèmes d'extractions de gaz généralisés, spécifiques et de ventilations sont installés pour préserver la santé des travailleurs [3]. L'air pollué extrait est selon la réglementation en vigueur nationale ou internationale doit subir un traitement avant son rejet dans l'atmosphère.

Selon la réglementation Algérienne, le décret exécutif n° 06-138 du 15 avril 2006, Art. 2, précise que par émission polluante dans l'air, "il y a lieu d'entendre l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs particules liquides ou solides, tout rejet de ces matières par des sources fixes et notamment par les installations industrielles".

Cette définition nous mène à dire que pour caractériser une situation de pollution atmosphérique, il faut prendre en compte tous les constituants qui se présentent sous forme de gaz, fumées, vapeurs ou de particules.

Les rejets dans l'atmosphère ou l'air ambiant de ces derniers peuvent être soit des émissions canalisées à travers une conduite, tuyauterie et cheminée, soit des émissions fugitives liées aux pertes de confinement ou d'étanchéité (fuites) ou des émissions diffuses dont l'introduction des polluants dans l'atmosphère dans un espace géographique donnée provient de différentes parties [4].

Pour lutter contre la pollution de l'air, et empêcher l'émission dans l'atmosphère de polluants qui peuvent nuire à la santé humaine et son environnement il est nécessaire d'installer des systèmes d'extraction et de traitements des fumées afin de se conformer à la réglementation et aux normes de rejets atmosphériques.

Les systèmes de traitement de fumées sont des procédés qui permettent d'épurer les fumées avant émission dans l'atmosphère via la cheminée. De nos jours il existe plusieurs techniques pour réduire la pollution à l'émission. Ces techniques peuvent être selon le type de gaz à traiter soit des systèmes de dépoussiérage (venturi, filtres à manches, ...), des électrofiltres secs ou humides, des systèmes d'adsorption (charbon actif) ou des systèmes de neutralisation par voie sèche, humide et semi humide [5].

Plusieurs entreprises Algériennes sont actuellement certifiées ou engagées pour mettre en place un système de management intégré (SMI) sous ces trois référentielles, ISO 9001 (le management de la qualité), ISO 14001 (le management de l'environnement) et OHSAS 18001 (le management de la santé et sécurité au travail). Ce système incite les entreprises à améliorer en continu le système de management et respecter la réglementation en vigueur.

Dans ce contexte et afin de préserver la santé des travailleurs et se conformer aux exigences réglementaires environnementales en matière de rejets gazeux atmosphériques, l'entreprise d'ALGESCO (Algerian Engineering Services Company) a envisagé d'analyser la qualité de l'air ambiant intérieur et installé un système d'extraction des vapeurs acides non contrôlées au niveau de la zone de décapage chimique.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la pollution de l'air intérieur par des vapeurs acides émises au niveau de la zone de décapage chimique et dimensionnement d'un système d'extraction et d'absorption de gaz pollués.

L'étude réalisée est constituée de six parties :

- La première partie est une présentation générale des activités de l'entreprise d'ALGESCO.
- La deuxième partie concerne une synthèse bibliographique sur la pollution atmosphérique en général et la pollution de l'air ambiant en milieu de travail.
- La troisième partie est consacrée à la description des techniques de quantification des émissions diffuses et fugitives.
- La partie quatre présente les différentes techniques de traitement de fumées.
- La cinquième partie décrit la méthodologie expérimentale adoptée pour la caractérisation de la pollution de l'air intérieur et le dimensionnement du système d'extraction et de traitement des gaz acides.
- La sixième partie traite les résultats et présente les dimensions du système d'extraction et de la colonne d'absorption.
- Enfin, la conclusion générale récapitule les résultats essentiels de cette étude en insistant sur les points forts du procédé de traitement des effluents gazeux proposé. Des perspectives de continuité de ce travail sont également proposées.

Chapitre 1 : Revu de Littérature

1.1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE :

1.1.1. General Electric :

1.1.1.1. Historique :

Les origines de GE remontent à Thomas Edison qui crée l'Edison Electric Light Company en 1878. En 1892, elle fusionne avec Thomson-Houston Electric Company pour donner naissance à la General Electric Company.

La fusion de ces sociétés a permis de renforcer le groupe et de poursuivre dans la voie de l'innovation comme avec la construction de la plus grande locomotive électrique au monde en 1895, ou l'invention de matériel d'imagerie médicale.

En 1911, GE acquiert le National Electric Lamp Association et renforce le pôle (éclairage) de son activité.

Dans les années 1980, la société a continué son expansion et sa diversification dans le plastique, le nucléaire ou encore l'assurance vie. D'autres fusions-acquisitions ont lieu jusqu'aux années 2000 avec des entreprises telles Sophia, Amex Life, Deutsch Financial Services, Triple G System Group, Boeing Capital, Delta Bank...

C'est en 2005 que GE décide de restructurer son activité et de l'organiser en 5 segments différents :

Infrastructures :

- Finance, commerce
- Services financiers
- Assurance santé
- NBC Universel and industriel

Les activités de GE sont réparties selon 5 pôles :

- 30,9 % services financiers
- 27,4 % fabrication d'équipements professionnels
- 24 % fabrication de technologies professionnelles
- 12,3 % fabrication de technologie médicale
- 5,4 % fabrication d'équipements pour particuliers et professionnels
- activités dans l'audiovisuel

Forte de la diversité des produits et services qu'elle propose, la société General Electric Company a su se positionner sur différents secteurs où les prestations proposées sont innovantes et lui permettent d'être leader sur les différents segments de marchés concernés. La firme possède aujourd'hui 36 filiales dans plus de 142 pays et compte plus de 300 000 employés, avec plus de 250 milliards de dollars de capitalisation.

1.1.1.2. Les plus importantes unités du groupe GE :

Comme on avait dit General Electric a de nombreuses filiales dans différents domaines chacune vise à apporter un plus ou même être le leader mondial dans ce domaine, On site parmi ces unités :

1. Energy connections : GE Energy Connections propose une vaste gamme d'équipements intégrés et de systèmes pour assurer une distribution sûre et fiable de l'énergie partout dans le monde.
2. Healthcare : GE fait partie des plus grands fournisseurs de technologies médicales de pointe pour les cliniques et hôpitaux dans le monde.
3. Capital : GE Capital est une filiale de General Electric qui fédère les services financiers du groupe.
4. Oil & Gaz : GE Oil & Gaz propose de nombreux équipements et services pour l'industrie du pétrole et du gaz naturel.
5. Aviation : GE aviation est le principal fournisseur mondial de réacteurs d'avions et propose des moteurs pour la majorité des avions de transport civil.
6. Transportation : GE Transportation fabrique du matériel pour le chemin de fer, la marine, les mines, le forage et les usines de production électrique.

1.1.2. Présentation de l'organisme d'accueil ALGESCO :

1.1.2.1. Présentation générale :

Algesco (Algerian Engineering Services Company), fruit d'un partenariat avec Sonatrach et Sonelgaz, un centre d'excellence spécialisé dans l'offre de service d'entretien et d'optimisation de turbines, compresseurs et auxiliaires pour l'industrie pétrolière et gazière Algérienne, Considéré comme la plus importante infrastructure de ce type à l'échelle mondiale, le centre de service de turbomachines d'Algesco a ouvert ses portes au début des années 1993 à l'origine situé à Hassi R'mel, puis transféré au nouveau site industriel Boufarik en 2010. Sur une superficie de 18300 m² avec un atelier de 5300 m² et une élévation de 12m, le centre compte 900 m² d'entrepôt, 1000 m² de baie de réception, il est aussi équipé d'une grue de 12 T. Guidé par plus de 220 employés spécialisées dans la réparation, l'ingénierie... Occupant 680 m² de surface de bureaux.

1.1.2.2. Organigramme de la société ALGESCO :

La structure d'ALGESCO est une structure fonctionnelle qui peut être représentée par l'organigramme suivant :

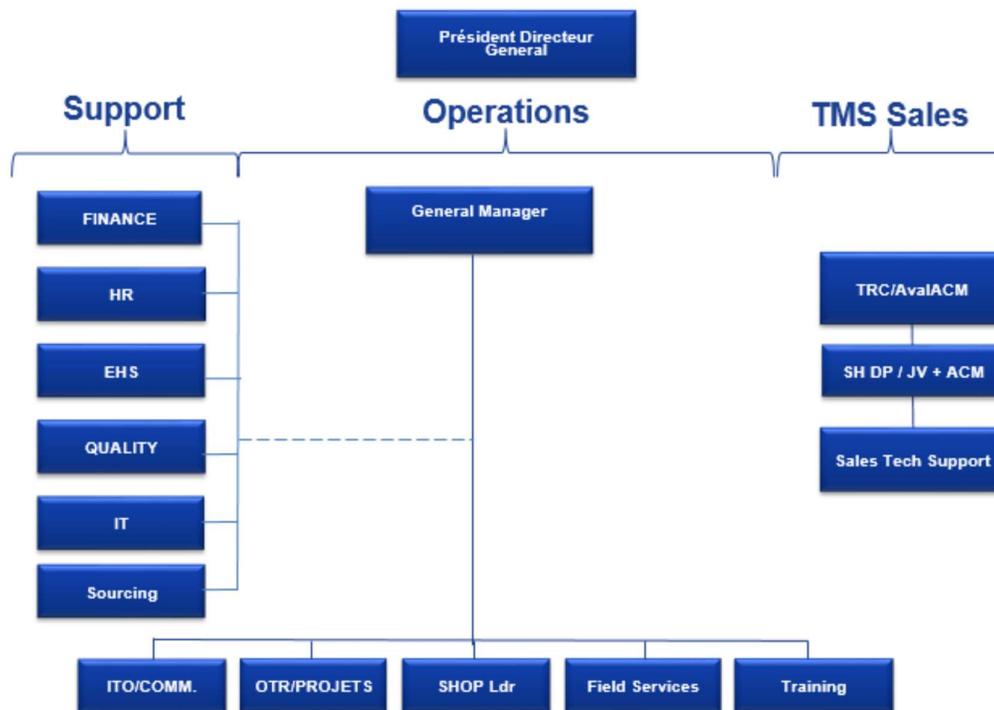


Figure 1-1: Organigramme d'ALGESCO.

Cette structure repose sur la division fonctionnelle de l'autorité et de la pluralité du commandement. Ainsi tous les employés sont dépendants de plusieurs chefs, chacun n'ayant autorité que dans son domaine de compétence. Cette division permet une meilleure spécialisation du personnel chacun selon ses compétences.

1.1.2.3. Tâches et activités principales :

La réparation est parmi les principales activités d'Algesco, l'atelier fait la réparation complète et la révision des GE et Non GE équipements plus précisément les Turbines à gaz, TurboExpanders, Compresseurs Centrifuges et Alternatifs plus les Turbines à vapeur. Un service sur site est aussi offert par le centre avec des capacités locales de :

- 29 Ingénieurs du Field Service : Mécanique et Contrôle.
- 70 Techniciens : Mécanique et Instrumentation.
- 5 Fonctions d'assistance + Support Technique de GE O&G HQ.
- Des Interventions de type (Frame 3, 5, PGT10, PGT25, BCL, SRL, ST).
- Inspection principale / Inspection du chemin gazeux chaud / Inspection de la combustion/ Revêtement et inspection de la pièce de transition/ Inspection boroscopique/ Démarrage/ installation et mise en service.

De plus, Algesco assure une expertise locale pour le dépannage et le support technique ceci en recueillant et analysant toute information sur les machines pour mieux connaître les produits et services de ses clients.

Un Centre de Formation est disponible au niveau du centre avec une capacité de former sur place jusqu'à 500 stagiaires par an, en offrant des cours de formation sur mesure : technique, maintenance, Leadership, HSE.

Un réel transfert de technologie dans le pays est en cours de développement à travers l'implantation d'un Centre Local RM&D dédié à l'Algérie, Une technologie de suivi et de diagnostic à distance opérationnelle 24h/24 et 7j/7 pour la surveillance de toute la flotte installée dans le pays.

ALGESCO donne aussi l'accès aux dernières technologies qu'offre GE en proposant les différents produits General Electric au marché Algérien.

1.1.2.4. HSE :

L'hygiène, la sécurité et l'environnement sont au cœur de la mission d'ALGESCO. Sa priorité est d'améliorer continuellement les normes d'hygiène, de sécurité et d'environnement. A l'aide de la méthode Lean six sigma le centre recueille les suggestions et les propositions de ses opérateurs, contremaîtres et employés afin de prévenir et éviter tout accident et améliorer les conditions ergonomiques de travail.

1.1.2.5. DESCRIPTION DU PROCEDE DE DECAPAGE CHIMIQUE DE L'ENTREPRISE :

1.1.2.5.1. Procédé de décapage chimique :

Le décapage chimique est l'une des activités de traitement des pièces des turbines au sein du centre de turbo-machinerie de General Electric. Elle implique l'utilisation de plusieurs substances chimiques à caractère dangereux. De ce fait, elle représente la seule opération qui se déroule dans un local en dehors de l'atelier de maintenance et réparation des turboréacteurs de l'entreprise.

Le décapage chimique est un procédé ayant pour but l'élimination des anciens revêtements thermiques d'une pièce. Il constitue l'une des premières étapes par lesquelles passe la pièce dans le procédé de maintenance ou réparation chez (aubes, ailettes).

1.1.2.5.2. Description du process de décapage chimique :

Il s'agit d'un stripping chimique sur pale de turbines qui se déroule dans une installation automatique en ligne avec un robot. La productivité de l'installation est fonction du temps d'immersion dans la cuve de décapage. La puissance électrique nécessaire pour les équipements de l'installation est de 146.9 kW.

Le décapage chimique est un processus d'élimination d'anciens revêtements thermiques ainsi que des oxydes couvrant la partie inférieure des ailettes des turbines. Ces dernières sont des pièces qui se fixent sur la partie statorique de la turbine et qui servent à comprimer les gaz chauds injectés. Leur revêtement composé de poudre de métaux (Nickel, Aluminium, Chrome...) et censé résister à la chaleur, finit par s'user et perd de son efficacité avec le temps, d'où la nécessité de le retirer et de procéder à un nouveau revêtement afin de garantir la protection et la longévité de la pièce.

L'élimination des revêtements et des oxydes se fait par immersion des pièces dans des bains acides (acide chlorhydrique, acide phosphorique et acide fluorocilicique). Le décapage se fait par des réactions électrochimiques ayant lieu sur la surface de la partie immergée, le caractère corrosif de l'acide fragilise les liaisons entre la pièce et le revêtement et décompose ce dernier permettant ainsi de le retirer.

La pièce est ensuite introduite dans une cuve d'eau déminéralisée pour le rinçage, puis dans une cuve contenant une solution basique de soude caustique (NaOH), cette étape permet de neutraliser les résidus d'acide subsistant sur la surface de la pièce. Par la suite, la pièce subit un nettoyage par ultrason dans le but d'éliminer les résidus de métaux dans les microfissures de la pièce, là où l'acide n'a pas pu pénétrer.

En dernier lieu, la pièce est séchée dans une autre cuve dans laquelle se trouve deux ventilateurs dotés de résistances.

Nous avons établi un schéma descriptif dans la Figure 6 pour mieux visualiser les étapes et les équipements qu'il faut.

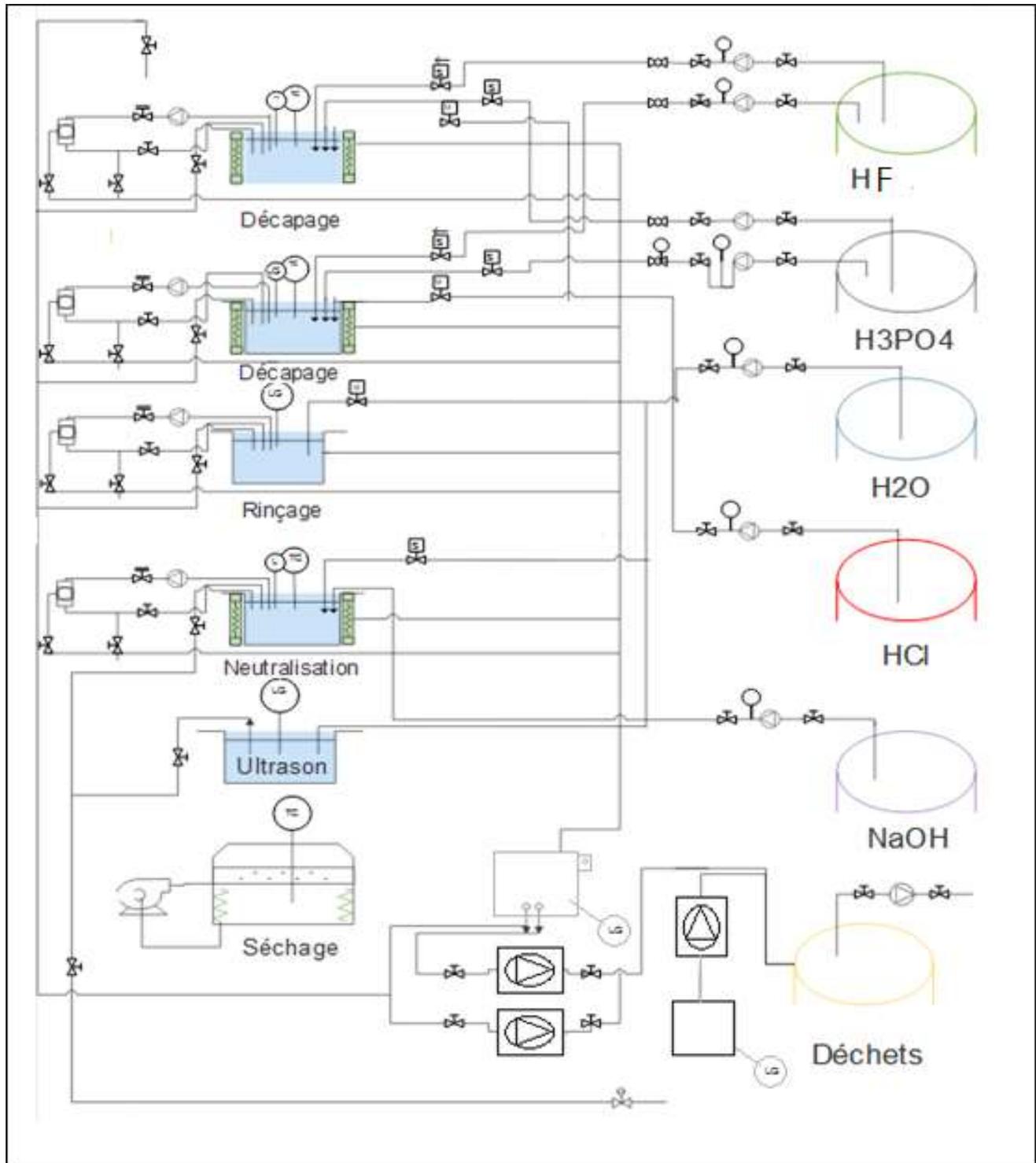


Figure 1-2: Processus de décapage chimique.

1.1.2.5.3. Matériaux et dimensions des bacs :

Les dimensions de la cuve et du panier sont représentées sur la figure suivante :

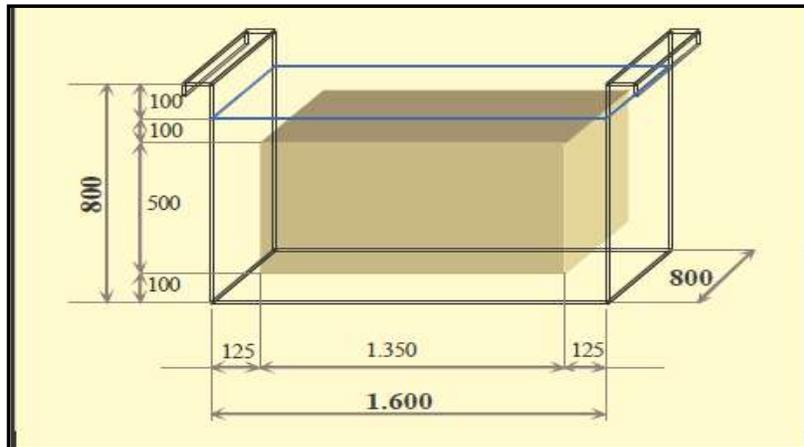


Figure 1-3: Cuve de base de l'installation de décapage.

1.2. Généralités sur la pollution de l'air intérieur

1.2.1. Polluants de l'air intérieur

Plusieurs éléments chimiques, physiques ou biologiques sont responsables de la dégradation de la qualité de l'air intérieur et susceptibles d'engendrer des problèmes sanitaires. Cette présente section a pour but de présenter les différents polluants qui peuvent être présents dans l'air ambiant intérieur ainsi que leurs effets sur la santé.

1.2.1.1. Gaz inorganique

Les gaz inorganiques sont des composés constitués de chaînes carbonées et sont principalement issus de minéraux. Sont donc inclus dans ces composés chimiques inorganiques le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x), l'ozone (O_3), l'ammoniac (NH_3), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF_6) etc...[6].

Sources : ils peuvent être de sources naturelles (volcans, feux de forêt, orage, certaines activités microbiennes, etc.) ou de sources anthropiques (procédés de combustion, transports, agriculture, industries, etc.).

Effets des polluants : certains polluants agissent sur le réchauffement climatique en appauvrissant la couche d'ozone et en participant à l'effet de serre. Ils peuvent aussi avoir des effets sur la santé provoquant entre autres des malaises, des asphyxies en remplaçant l'oxygène à forte concentration, certains peuvent également avoir des effets cancérigènes notamment les PFC. D'autres de ces composés sont bien connus pour leurs effets sur la santé humaine, la plupart étant irritants ou toxiques. Certains peuvent être mortels (CO , NH_3 , etc.) lors d'expositions prolongées. Sur l'environnement, les principaux effets sont l'eutrophisation (NH_3 et NO_x) et l'acidification de l'environnement (SO_x , etc.).

1.2.1.2. Gaz organique

A l'inverse des composés inorganiques, les gaz organiques sont issus de matières organiques et par conséquent ils comportent la plupart du temps des chaînes carbonées. Ils peuvent être divisés en deux groupes : les composés organiques volatils (COV) et les composés organiques semi-volatils (COSV).

1.2.1.2.1. Les composés organiques volatils (COV)

Les COV se trouvent à l'état de vapeur dans l'atmosphère à cause de leur pression de vapeur saturante, supérieure à 10 Pa. Ils sont répartis en trois grandes familles chimiques : les aliphatiques (formaldéhyde, etc.), les aromatiques (benzène, toluène, etc.) et les halogènes (trichloréthylène, etc.).

Sources : dans la nature ils sont principalement issus des forêts et du métabolisme des êtres vivants. Les sources anthropiques majeures de COV sont les transports et l'industrie, qui font intervenir notamment les opérations de combustion (carburants), d'évaporation de solvants (peintures, encres, colles, etc.), et certaines réactions biologiques.

Effets des polluants : chez l'Homme, ils peuvent provoquer différents troubles soit par inhalation, notamment pour les aromatiques et les oléfines, soit par contact avec la peau par exemple pour les aldéhydes. Ils peuvent provoquer des troubles cardiaques, digestifs, rénaux et nerveux. Certains COV, comme le benzène, peuvent aussi être cancérigènes, tératogènes ou mutagènes.

Dans l'environnement, ils peuvent réagir avec les oxydes d'azote, sous l'effet du rayonnement solaire, pour former de l'ozone troposphérique (pollution photochimique). Par conséquent, les COV sont aussi des gaz à effet de serre indirect [6] – [7].

1.2.1.2.2. Les composés organiques semi-volatils (COSV)

Les COSV sont assimilés aux polluants organiques persistants (POP) qui ont pour particularité d'être peu dégradables et d'avoir un temps de vie relativement long dans l'environnement. Ils sont composés des dioxines et furanes, de l'hexachlorobenzène (HCB), des polychlorobiphényles (PCB), et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Sources : les sources sont principalement anthropiques lors de combustions incomplètes et dans certaines industries, notamment dans les aciéries. Les sources naturelles sont les feux de forêt et les éruptions volcaniques.

Effets des polluants : les POP ont des effets sur l'environnement et la santé par leur caractère persistant. La plupart des COVS sont cancérigènes et/ou perturbateurs endocriniens.

Cas particulier des molécules odorantes : ces polluants font partis d'un sous-ensemble des COV et des composés inorganiques volatils. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories : les composés soufrés (H_2S , mercaptans, sulfures, etc.), les composés azotés (NH_3 , amines, etc.) et les composés oxygénés (acides gras volatils, esters, etc.).

Sources : dans la nature ils sont surtout issus des volcans, et de la fermentation de molécules organiques (protéines, cellulose, etc.) en anaérobiose. Ils sont également produits de manière anthropique par l'agriculture, l'industrie ou de source domestique.

Effets des polluants : en raison des faibles concentrations rencontrées, il n'y aurait pas d'effets directs des odeurs sur la santé humaine. Cependant, il convient alors de parler de nuisances olfactives dont les riverains de l'émission s'habituent difficilement, engendrant alors de nombreuses plaintes [7].

1.2.1.3. Métaux lourds

(Cuivre, nickel, zinc, plomb, mercure, cadmium, etc.) et les métalloïdes (arsenic, béryllium, sélénium, etc.) se présentent dans l'air seuls ou associés à des degrés d'oxydation variables ou sous forme organométallique. Ils sont présents dans l'environnement sous deux formes selon les métaux : la forme volatile par exemple pour le mercure et la forme solide associée aux particules comme pour le plomb.

Sources : les métaux lourds sont d'origine naturelle (érosion des sols, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.) ou anthropique (production d'énergie par combustion, pyrométallurgie, incinération des déchets, etc.).

Effets des polluants : ils agissent à la fois de manière directe et indirecte, c'est-à-dire après transfert de phases : air/eau ou air/matières solides [7]. Chaque métal génère des effets différents sur la santé humaine et l'environnement [6].

1.2.1.4. Particules et aérosols

Les poussières et les aérosols comprennent à la fois les particules solides minérales, les particules organiques, les micro-organismes généralement fixés aux particules, mais aussi les gouttelettes liquides [7]. La classification selon leur taille est effectuée de la manière suivante [6]:

- Les Particules Totales en Suspension (appelées TSP pour Total Suspended Particulates) regroupent l'ensemble des particules quelle que soit leur taille ;

- Les PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} et PM_{0.1} sont les particules dont le diamètre aérodynamique est respectivement inférieur à 10 µm, 2,5 µm, 1 µm et 0,1 µm.

Les particules comprises entre 2,5 et 10 µm sont appelées des particules grossières. Les particules de moins de 2,5 µm sont nommées particules fines et incluent les particules ultrafines de diamètre inférieur à 0,1 µm. (Les particules de petites tailles représentent environ 99 % des poussières rencontrées dans l'atmosphère, car leur vitesse de sédimentation est pratiquement nulle ($< 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$) [7]. Les compositions chimiques des particules sont généralement les suivantes:

- des sels sous la forme nitrates, sulfates, carbonates, chlorures, etc ;
 - des composés carbonés organiques ou organic carbon, notés OC en anglais : HAP, oxydes, composés organiques condensables, etc ;
 - des éléments sous forme de traces tels que les métaux lourds, etc ;
 - du carbone suie ou black carbon (BC). Sources : les particules peuvent avoir différentes origines illustrées **Figure 1-4** :
- une origine mécanique c'est-à-dire par effritement de matière, broyage, concassage, transport de matériaux pulvérulents, érosion des sols, etc. Ces particules sont généralement de taille comprise entre quelques micromètres et quelques centaines de micromètres ;
 - une origine chimique ou thermique. Les particules se forment par changement d'état de la matière via le phénomène de nucléation qui est provoqué par réactions chimiques ou par évaporation à haute température suivie d'une condensation. Le spectre granulométrique de ces particules varie de quelques nanomètres à quelques dixièmes de micromètres ;
 - une origine biologique notamment les pollens, les champignons, bactéries, etc.

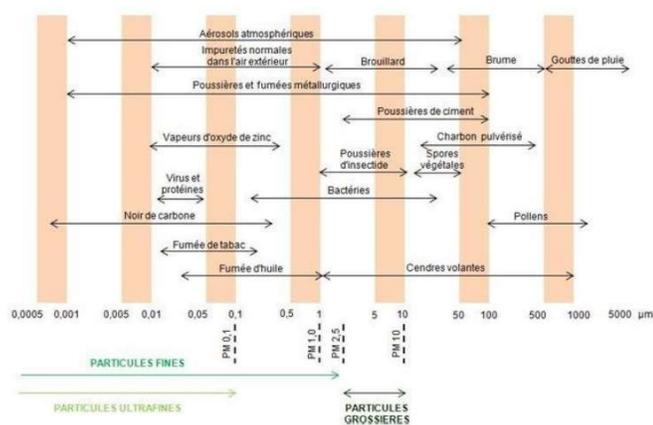


Figure 1-4: Origine des particules selon leur granulométrie (CITEPA, 2013).

Ainsi, les sources des émissions de particules proviennent, soit de sources naturelles, soit des activités humaines, pour lesquelles les émissions de particules dépendent fortement des équipements de dépoussiérage, des procédés et des conditions opératoires. Les principales sources anthropiques d'émission de particules sont les industries lourdes comme la sidérurgie, les cokeries, la chimie et la pétrochimie, etc., des activités liées au génie civil et aux bâtiments par exemple la démolition d'immeubles, l'incinération d'ordures ménagères ou encore les émissions automobiles, notamment les particules issues des freins ou de la combustion dans des moteurs Diesel. Les aérosols liquides sont eux générés par des pulvérisations d'eau ou de solutions, comme par exemple pour les tours aéroréfrigérantes [7]. Les sources naturelles d'émission de particules sont fortement liées aux conditions climatiques et naturelles comme les feux de forêts, les éruptions volcaniques, les pollens, etc.

Effet du polluant : du point de vue de la santé, pour des raisons physiologiques et psychologiques, la pollution par les particules a été très tôt ressentie par les populations. Leur rôle a été démontré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les sujets sensibles. Les particules les plus « grosses » ($> 10 \mu\text{m}$), visibles à l'œil nu, ne sont pas les plus inquiétantes pour la santé. Retenues par les voies aériennes supérieures Figure 1-2 (nez, gorge), elles ne pénètrent pas dans l'appareil respiratoire. Les particules de diamètre compris entre 2,5 et $10 \mu\text{m}$ atteignent les parties supérieures du système respiratoire (voie aérienne inférieure, **Figure 1-5**) et peuvent être éliminées par filtration des cils de l'arbre respiratoire et la toux. Les particules les plus fines ($< 2,5 \mu\text{m}$) sont les plus dangereuses. Capables de pénétrer au plus profond de l'appareil respiratoire, elles atteignent les voies aériennes terminales ou alvéolaires, où elles se déposent par sédimentation ou pénètrent dans le système sanguin.

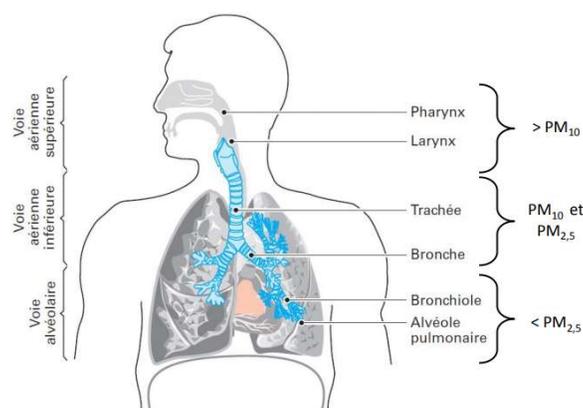


Figure 1-5: Pénétration des particules dans le système respiratoire, adaptée de (Le Coq, 2006).

Les poussières et aérosols ont sur l'homme un impact direct (respiration, visuel) et un impact indirect, du fait de l'association entre particules et polluants ou micro-organismes. En effet, des métaux lourds, du benzopyrène issue des émissions de moteurs Diesel, et des dioxines et furanes peuvent être adsorbés sur les particules solides en suspension. Les particules sont aussi un vecteur primordial pour le transport et la diffusion des microorganismes tels que les bactéries, les virus etc... [7]. Du point de vue environnemental, les particules en suspension peuvent réduire la visibilité et influencer le climat en absorbant et en diffusant la lumière. En se déposant, elles contribuent à la dégradation physique et/ou chimique des matériaux. Par exemple, les particules accumulées sur les feuilles des végétaux peuvent les étouffer et entraver la photosynthèse.

Cas particuliers des fibres : le terme fibre désigne une particule allongée dont la longueur est au moins trois fois supérieure au diamètre. Les fibres peuvent être classées selon leur nature chimique :

- minérales naturelles : wollastonite, sépiolite, etc ;
- minérales artificielles : laine de verre, laine de roche, fibre céramique réfractaire, fibre d'alumine, etc ;
- organiques naturelles : cellulose, coton, lin, etc ;
- organiques artificielles : viscose, acétate de cellulose, etc ;
- synthétiques : aramides, polyester, etc.

Les effets des fibres sur la santé et l'environnement sont sensiblement les mêmes que pour les particules. Parmi les différentes fibres, l'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande pour l'amiante une valeur crête maximale de 500 mg.m^{-3} pour une durée d'exposition de 10 min et une valeur moyenne de 120 mg.m^{-3} pour une durée d'exposition de 24 h [8].

1.2.1.5. Bio-contaminants

Parmi les particules d'origines biologiques ou bioaérosols, se trouvent des cellules bactériennes et fongiques, des particules virales, des fragments de cellules microbiennes et végétales, et des pollens. Le terme « aérosols microbiens » définit l'ensemble des particules bactériennes, fongiques et virales. Ces aérosols microbiens présentent généralement un diamètre compris entre $0,08 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$. Les bactéries aéroportées se présentent sous la forme de coques, bacilles ou spirales, mais le plus souvent les bactéries sont accrochées en amas de tailles variables [9]. Concernant les champignons et moisissures, leurs aérosolisations se fait par la production de spores.

Sources : les micro-organismes de l'environnement « naturel » sont émis par des mouvements climatiques, c'est-à-dire avec la pluie, le vent, l'agitation des lacs, des rivières et des océans etc. Les sources anthropiques favorisant la production de bio-aérosols dans l'environnement sont notamment l'agriculture, les élevages d'animaux et le traitement des déchets, notamment les stations d'épuration, les sites de compostage, etc. Dans l'environnement intérieur, la dissémination de micro-organismes bactériens est souvent imputable aux individus, l'homme étant probablement la plus importante source de contamination des lieux clos. En effet, son corps abrite un grand nombre de bactéries sur la peau, les muqueuses, dans le tractus respiratoire, la bouche, le conduit nasal et dans le tractus gastro-intestinal. Les sources hydriques telles que les fontaines décoratives, les douches, aquariums, évier, etc. sont également mises en cause dans les environnements intérieurs lors de problèmes liés aux aérosols microbiens, notamment les moisissures. Les plantes, la poussière, les animaux et les textiles, les systèmes de ventilation, l'environnement extérieur ou des activités domestiques courantes peuvent mettre en suspension dans l'air une certaine quantité de micro-organismes [6-9].

Effet du polluant : la présence d'aérosols microbiens est souvent incriminée dans des problèmes de santé, que ce soit par leur concentration totale ou par la présence de pathogènes.

La mise en contact avec quelques-unes de ces entités biologiques ainsi qu'avec des fragments microbiens, tels que des débris de membrane cellulaire, des métabolites microbiens comme les endotoxines, les mycotoxines et les composés organiques volatils, peut provoquer des effets néfastes sur la santé. Dans l'environnement intérieur, ils ont une influence significative sur l'intensité d'apparition de certains symptômes : irritation des muqueuses de la gorge, du nez, sécheresse et démangeaisons au niveau des yeux, difficultés respiratoires, maux de tête, difficultés de concentration ou fatigue [9].

1.2.2. Sources de pollution

Les sources de pollution dans l'air peuvent être classées en trois catégories : les sources issues de l'air intérieur qui sont liées au bâtiment, aux occupants et à leurs activités, les sources issues de l'air extérieur, et les sources liées à l'interaction ou la réactivité entre les différents polluants qui sont issues aussi bien de l'air intérieur qu'extérieur [6].

1.2.2.1. Sources intérieures de polluants

1.2.2.1.1. Sources liées au bâtiment

Une des principales sources de pollution issue de l'air intérieur provient des produits de construction, d'ameublement et de décoration. Ces derniers peuvent être responsables de l'émission de la plupart des composés organiques volatils, y compris les aldéhydes, et des particules dans un environnement intérieur. De fait, la connaissance des caractéristiques d'émission de ces produits en substances volatiles polluantes est fondamentale pour limiter cette source de pollution intérieure [10].

D'autre part, les appareils de combustion tels que le chauffage, ou encore la production d'eau chaude, émettent entre autres du monoxyde de carbone, des oxydes d'azote, des particules, et certains COV. Les équipements tels que les systèmes de ventilation et de climatisation traitant l'air, notamment des humidificateurs, filtres ou conduits, sont responsables de l'émission de poussières et micro-organismes (**Figure 1-6**). Des erreurs de conception et une mauvaise maintenance du système de ventilation peuvent être responsables jusqu'à 42 % des problèmes de pollution intérieure [11].

1.2.2.1.2. Sources liées à l'occupation

De par ses activités métaboliques, l'être humain constitue une source de pollution à la fois chimique et microbiologique. Le métabolisme énergétique du corps humain est à l'origine du rejet de chaleur latente, d'air saturé en vapeur d'eau (55 g.h⁻¹ de vapeur d'eau) et en gaz carbonique (33 g.h⁻¹ de CO₂) lors de la respiration (18 l.h⁻¹), qui augmente avec l'activité métabolique [12] cité par Dhalluin [13]. L'air expiré contient également des composés organiques volatils notamment des isoprènes, acétones, de l'éthanol et du méthanol, ainsi que dans une moindre mesure d'autres composés tels que les aldéhydes, les cétones, les méthyles, l'ammoniac etc...[14]. L'homme produit également des molécules odorantes et des bio-contaminants notamment par la transpiration [15]. Dans les lieux de travail les polluants émis par les différentes sources fugitives correspondent à la nature du procédé et produits utilisés.

A cette pollution « naturelle », s'ajoutent celles provoquées par les activités internes des occupants. En plus des polluants liés aux activités humaines, les plantes d'intérieur, les animaux domestiques et les insectes, notamment les acariens, présents dans l'environnement intérieur sont responsables de l'émission d'aérosols microbiens de type champignons, bactéries et virus, de pollens et d'allergènes (Figure 1-6) [10].

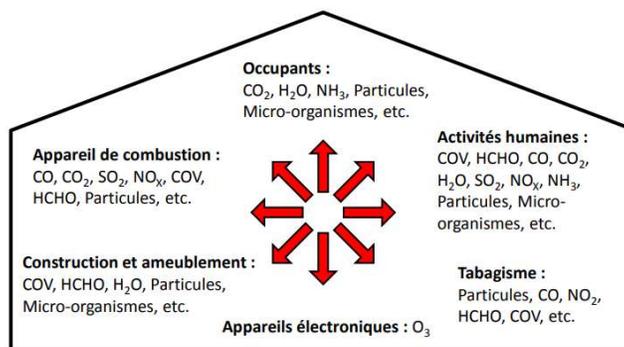


Figure 1-6: Sources de polluants intérieurs aux bâtiments

1.2.2.1.3. Sources extérieures de polluants

Les polluants issus de l'air extérieur du bâtiment sont transférés vers l'air intérieur à travers les ouvrants, les infiltrations dans les murs et les systèmes de ventilation. Le niveau de la pollution atmosphérique, extérieure au bâtiment (Figure 1-7), dépend notamment de [10] :

- l'activité anthropique, responsable de l'émission d'une grande partie des polluants atmosphériques dont les COV, le CO₂, le CO, les NO_x, les SO_x, etc. En particulier les activités liées aux industries, aux exploitations agricoles, et aussi aux transports ;
- du terrain sous-jacent, notamment pour la pollution au radon, hydrocarbures lors de friches industrielles, etc ;
- des activités « naturelles », en particulier le volcanisme, source naturelle des SO_x, des oxydes de carbones, des particules, etc., les feux de forêt qui produisent du CO₂, etc., et l'érosion des sols pour la mise en suspension de particules et poussières, etc.

Les conditions météorologiques ont également une influence sur la pollution atmosphérique. En particulier au niveau des concentrations en polluants, du transport des masses d'air polluées par le vent, de l'ensoleillement responsable de la pollution photochimique, des précipitations qui jouent sur le dépôt humide des polluants gazeux et particulaire, ou encore la stabilité de l'atmosphère dans le cas d'inversion thermique, qui peut causer la stagnation de la couche polluée. Les aérosols microbiens sont d'autant plus sensibles à ces paramètres en raison de leurs influences sur leur développement et leur croissance.

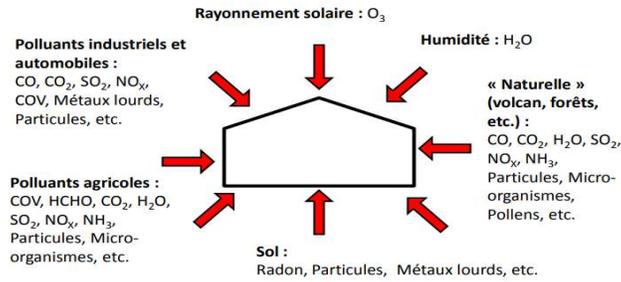


Figure 1-7: Sources de polluants extérieures aux bâtiments.

1.3. Techniques de quantification des émissions diffuses et fugitives

1.3.1. Définitions :

La notion d'émission canalisée est facile à appréhender ; il s'agit des émissions qui sont rejetées dans l'atmosphère à l'aide d'une conduite rigide telle qu'une cheminée ou tout autre moyen.

La notion d'émission dite traditionnellement « diffuse et/ou fugitive » est beaucoup plus complexe [4].

a. Émissions canalisées :

Rejet dans l'atmosphère à l'aide de toute sorte de conduite, canalisation ou tuyauterie (quelle que soit la forme de la section de cette conduite). Par conduite, canalisation ou tuyauterie on entend que le diamètre équivalent est raisonnablement inférieur à la longueur de cette conduite. (Si le diamètre équivalent est du même ordre de grandeur ou supérieur à la longueur, on parlera d'ouverture, ce qui est le cas de fenêtres, de Robertson, de lanterneaux, d'extracteurs avec ou sans ventilateur... ; dans ce cas, les émissions ne peuvent plus être considérées comme canalisées ; ce sont plutôt des émissions fugitives). En principe ces émissions canalisées ne posent pas de problèmes de mesure insurmontables [4].

b. Émissions fugitives :

Ici il s'agit de rejets de polluants dans l'atmosphère libre après que ceux-ci aient échappé à une tentative de captation à l'aide d'une hotte, d'un joint, ou de tout autre moyen qui aurait dû assurer la capture et la rétention de ces polluants. On parle d'émissions fugitives plus particulièrement pour les composés organiques volatils (COV) mais il existe également des exemples d'émissions d'autres polluants (poussières, odeurs...).

En examinant des méthodes de mesure qui ont été mises au point et qui sont utilisées depuis quelques années, on peut distinguer trois sortes d'émissions fugitives :

- les fuites proprement dites issues d'équipements divers : fuites au niveau des tuyauteries (joints aux brides), des machines tournantes (pompes, compresseurs...) des vannes ou des soupapes servant des gaz ou des fluides plus ou moins volatils.
- les fuites par les stockages de produits gazeux, liquides ou solides ;
- les fuites par certaines parties des procédés telles que des ouvertures de citernes pendant des opérations de chargement ou de déchargement.

c. Émissions diffuses :

Les émissions diffuses font appel à des considérations complètement différentes qui n'ont rien à voir avec le caractère canalisé ou fugitif de ces émissions.

Le mot diffus implique une notion géographique ou géométrique, puisqu'il signifie « provient de différentes parties ». Ce mot implique ainsi une notion d'échelle géographique ou géométrique.

Ainsi les émissions de poussières soulevées par le vent sur des stockages en plein air sont dites fugitives et diffuses à la fois ; en effet leur stockage est une façon de les maintenir en place donc de les tenir captives, malheureusement, grâce au vent ces poussières ont réussi à s'échapper; par ailleurs, ces émissions ne sont pas canalisées et elles se font à différents endroits des tas, elles sont donc aussi diffuses [4].

On voit donc que le qualificatif « diffus » peut sans inconvénient venir compléter les qualificatifs « canalisé » ou « fugitif » mais en aucune façon les remplacer.

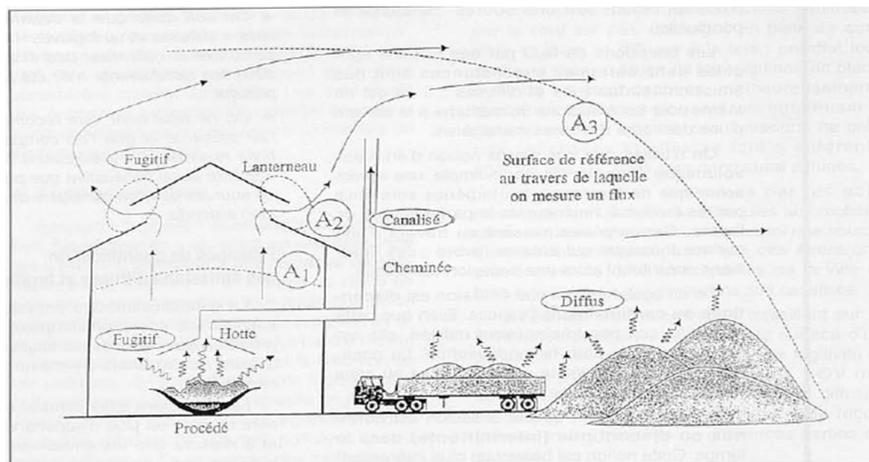


Figure 1-8: Emissions canalisées, diffuses et fugitives.

1.3.2. Principes de quantification des émissions diffuses et fugitives :

La quantification des émissions fugitives est toujours une opération complexe et coûteuse ; la précision des résultats est toujours très inférieure à celle des résultats de mesure des émissions canalisées.

Ces méthodes sont classées en trois catégories :

- « Ouasi-Stack Sampling Technique » (OSST) (en français : « hotte/cheminée mobile »).
- « Roof Monitor Sampling Technique » (RMST) (en français : « mesure en toiture »).
- « Upwind /Downwind Sampling Technique » (UDST) (en français : « au vent/sous le vent »).

a. « Ouasi-Stack Sampling Technique » (Hotte/Cheminée mobile) (Figure 1-9) :

Cette méthode consiste à coiffer la source à l'aide d'une hotte et d'une cheminée mobile afin d'aspirer la totalité des polluants.

Les émissions fugitives deviennent ainsi prisonnières canalisées, et on est ramené au problème classique de la mesure dans une conduite avec une section de mesure et des longueurs droites amont et aval idéales conformes aux normes AFNOR NF X 44051 et 052 ou à la standardisation ISO [4].

Cette méthode ne peut être utilisée que dans les cas où la source peut être physiquement isolée sans pour autant gêner les opérations de production.

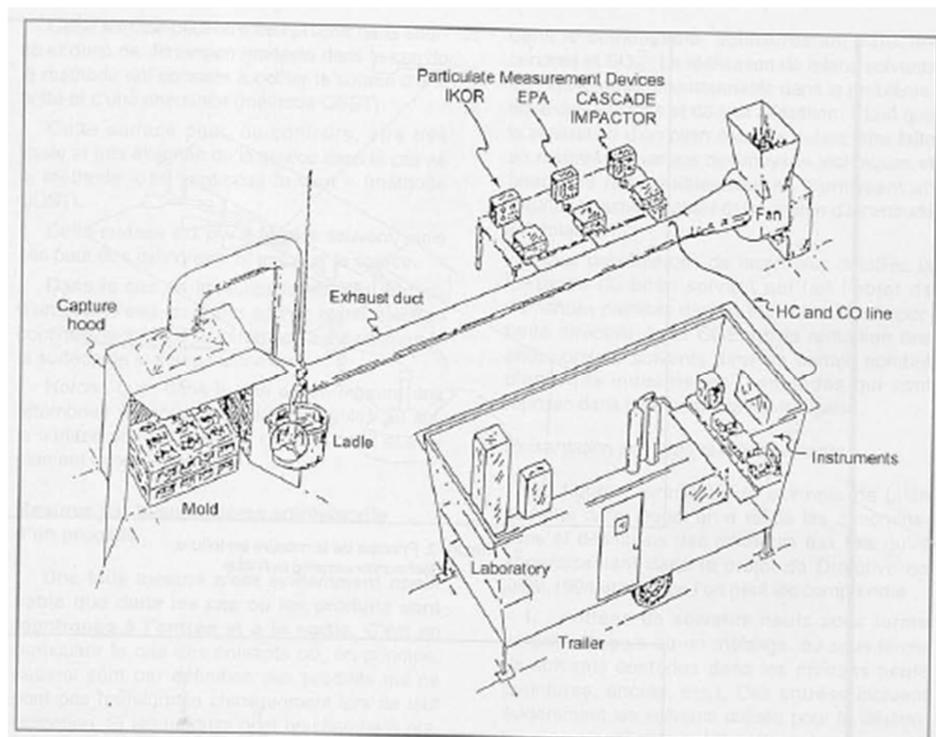


Figure 1-9: Principe de la méthode hotte/cheminée mobile.

b. « Roof Monitor Sampling Technique » (Mesure en toiture) (Figure 1-10) :

Cette méthode est utilisée dans le cas où les transferts de matières polluantes avec l'extérieur se font par un petit nombre d'ouvertures. On peut alors dire que la structure qui abrite la source (et qui peut être la toiture) joue le rôle d'une immense hotte emprisonnant les émissions avant leur rejet vers l'extérieur.

Les mesures se font dans les ouvertures qui peuvent être : des portes, des fenêtres, des lanterneaux, des " robertsons " ...

On ne dispose jamais des conditions idéales d'application des normes AFNOR NF X 44 051 et 052 ou des normes ISO.

La principale difficulté dans ce genre de mesure est de déterminer le nombre et l'emplacement des points de mesure des vitesses et des concentrations.

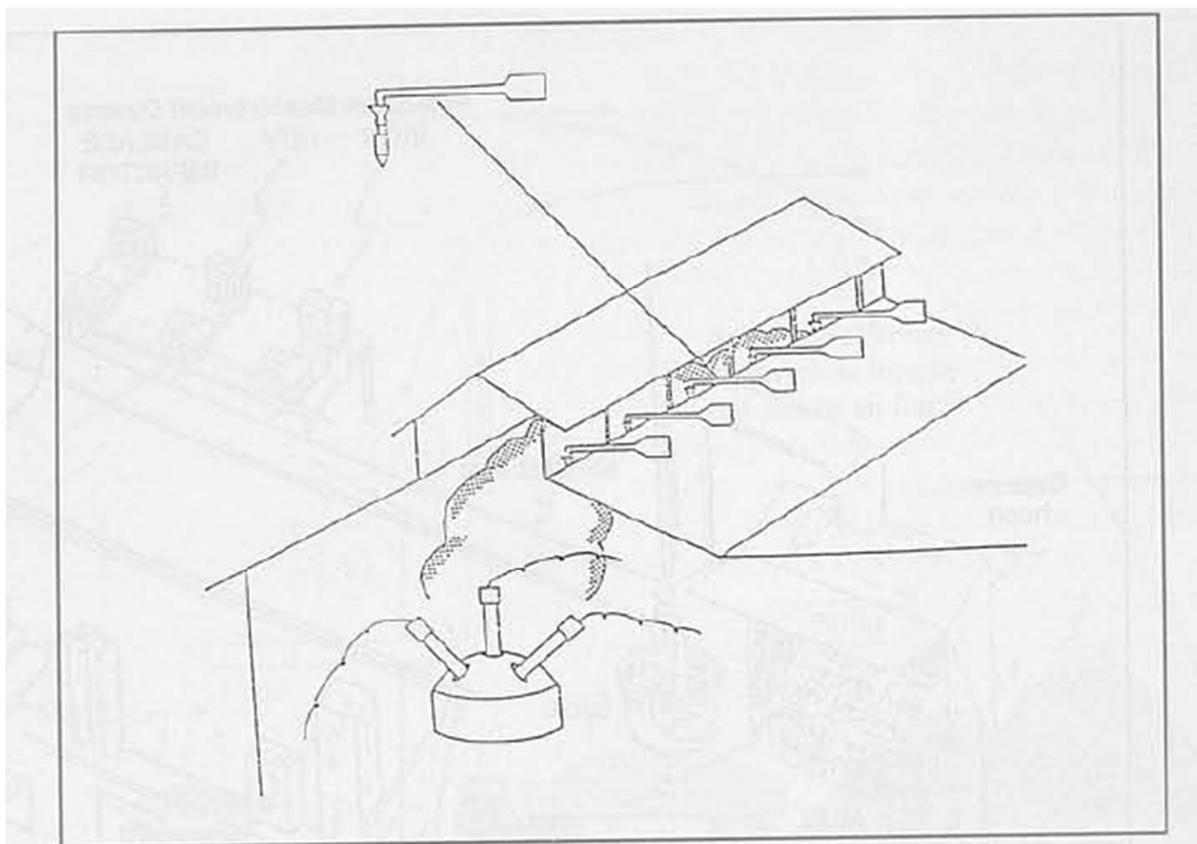


Figure 1-10: Principe de la mesure en toiture.

c. « Upwind/Downwind Sampling Technique » (au vent/sous le vent) (Figure 1-11) :

Cette méthode est utilisée dans le cas où les sources ne peuvent être confinées ni par une hotte ni par une toiture. La pollution se transporte dans l'atmosphère sous la forme d'un panache qui, souvent, rase le sol. Des mesures de concentrations de polluant et de vitesse de l'air sont faites au vent de la source et sous le vent, sur une surface de référence perpendiculaire au vent. Cette méthode paraît être la moins précise, mais elle est la plus universelle. L'influence des paramètres météorologiques est essentielle mais l'utilisation simultanée de traceurs ou de la modélisation inverse devrait apporter des simplifications notables [4].

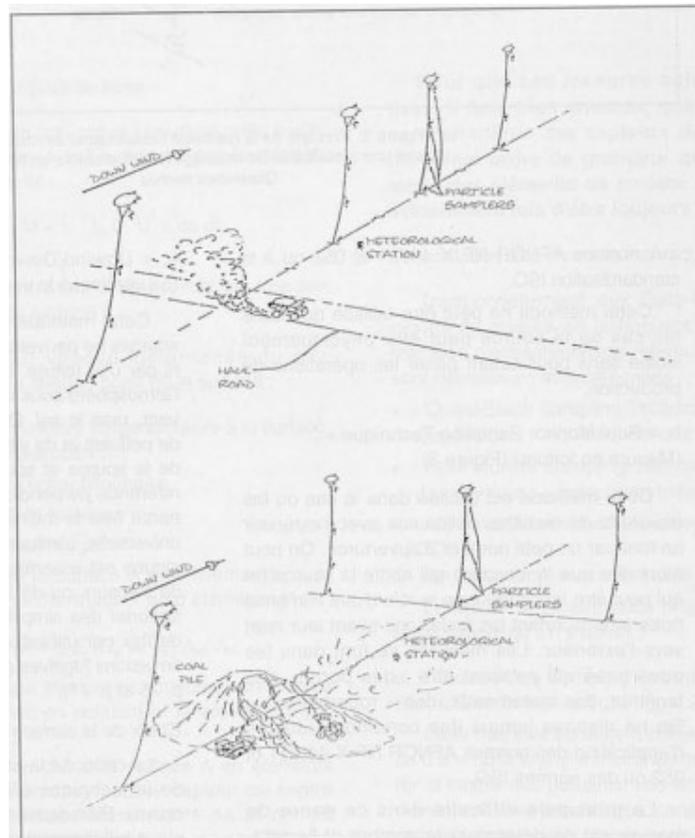


Figure 1-11: Principe de la mesure au vent/sous le vent.

1.4. Techniques de traitement des fumées :

1.4.1. Systèmes de traitement de l'air - cas d'absorption : transfert gaz-liquide

Parmi les procédés de traitement de l'air chargé en polluants, l'opération unitaire – absorption – réalisée au sein de contacteurs gaz-liquide, entre dans la catégorie des procédés

basés sur un transfert avec récupération directe et est comparable à l'adsorption gaz-solide ou à la condensation. Il s'agit en effet de proposer des solutions pour le traitement d'effluents gazeux contaminés tels que [7]:

- Des atmosphères contenant des composés organiques volatils (COV) de type composés oxygénés : acides gras volatils, alcools, cétones, dérivés chlorés.

Les émetteurs de COV sont essentiellement les transports et les industries utilisatrices de solvants :

- Les fumées de combustion issues des incinérateurs contenant NO_x, SO₂, HCl.
- Les gaz acides à base de HCl, HF, H₂S et CO₂.
- Des effluents contenant des composés odorants de type soufrés (H₂S, CH₃SH), azotés (NH₃, CH₃NH₂) ou oxygénés (acétone, acide acétique). Les principales sources sont les stations d'épuration d'eaux usées, les industries agroalimentaires (conserveries, équarrissages), les papeteries et les industries chimiques.

Au sens où nous l'entendons dans notre étude, l'absorption est l'opération unitaire dont le principe est basé sur le passage d'un ou de plusieurs constituants d'une phase gazeuse dans une phase liquide. Il s'opère des échanges (ou transferts) de matière entre une phase gazeuse et une phase liquide dont les compositions chimiques sont différentes. Ce transfert de matière mis en jeu s'effectue au sein de contacteurs (ou réacteurs) gaz-liquide dans lesquels les deux phases sont mises en contact pour favoriser les échanges de matière [16].

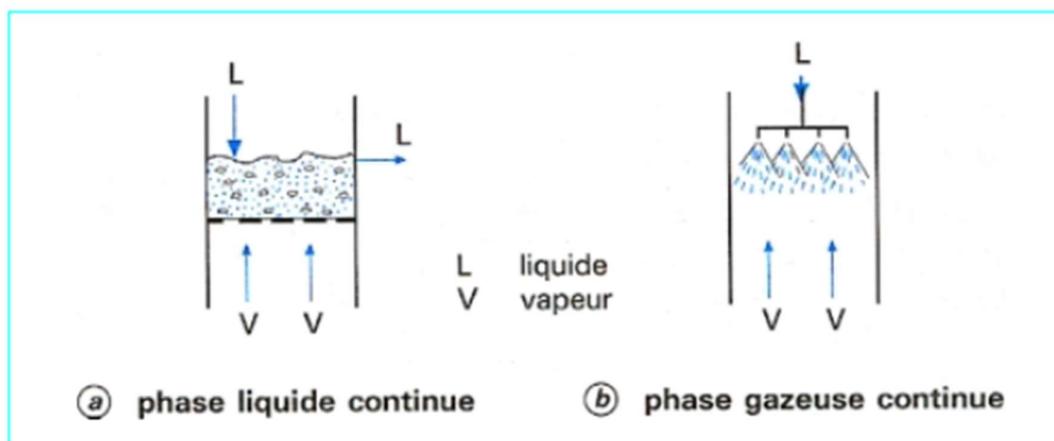


Figure 1-12: contact entre les 2 phases.

1.4.2. Différents types de contacteur gaz-liquide :

Il existe sur le marché industriel un grand nombre d'appareils de mise en contact d'un gaz et d'un liquide. L'ensemble de ces contacteurs peut être classé en deux grandes catégories,

selon le mode de dispersion des phases et selon le type d'inclusions (bulles, gouttes, film) présentes dans les contacteurs. Dans le (tableau 1-1) sont rassemblés les principaux contacteurs :

- Les contacteurs dans lesquels le gaz est dispersé sous forme de bulles.
- Les contacteurs dans lesquels le liquide est dispersé sous forme de gouttes et de film.

Le choix d'une technologie plutôt qu'une autre est basé sur l'application d'un certain nombre de concepts concernant les aspects hydrodynamique, réaction chimique et transfert de matière [17].

Le dimensionnement de ces contacteurs repose sur l'utilisation d'un certain nombre de concepts qui font appel :

- Aux équilibres thermodynamiques aux interfaces gaz-liquide, à savoir les solubilités des gaz au sein des liquides.
- Aux mécanismes et lois associées du transport des espèces au sein des phases ;
- Aux notions de coefficient de transferts (locaux et globaux).
- Au couplage entre les phénomènes de transport par diffusion et les cinétiques de réaction chimique (constante de vitesse, ordre de la réaction).
- Aux caractéristiques hydrodynamiques des inclusions présentes au sein des contacteurs.

Tableau 1-1: Liste des principaux contacteurs gaz-liquide.

Dispersion sous forme de bulles	Dispersion sous forme de gouttes et de film
Colonne à dispersion de bulles	Colonne à garnissage
Gazosiphon ou Airlift	Colonne à plateaux perforés
Réacteur agité mécaniquement	Colonne à pulvérisation
Lit fixe triphasique	Éjecteur et venturi
Mélangeur statique	Colonne à film tombant
Hydroéjecteur	Aérateur mécanique de surface

Le « mélange » de tous ces concepts fournira les outils nécessaires pour déterminer la taille de l'absorbeur. Dans le cas particulier du traitement des eaux usées gazeuses contaminées, le débit volumique est généralement très élevé (centaines voire milliers de mètres cubes par heure). De plus, la liste des contacteurs gaz-liquide effectivement utilisés est plus petite que la liste donnée dans le tableau 1, et dans la plupart des cas, elle se limite aux tours à garnissage ou à plateau et aux réacteurs de pulvérisation (tours de pulvérisation et injecteurs venturi).

1.4.2.1. Colonnes à garnissage :

La tour garnie est composée d'un cylindre qui comprend une entrée de gaz, un garnissage réparti en une ou plusieurs parties, une grille de support de garnissage et un éliminateur de brouillard (dévésiculeur) à la sortie qui peut arrêter les gouttelettes de liquide entraînées par le gaz. L'écoulement des phases se produit généralement à contre-courant.

Pour les colonnes ou laveurs à garnissage en vrac ou structuré, la vitesse est en général comprise entre 1 et 3,5 m/s. Les débits d'arrosage sont compris entre 15 et 100 m³/m² de section/h. La perte de charge, fonction de la vitesse du gaz, du débit d'arrosage et du type de garnissage est usuellement comprise entre 60 et 300 mm de colonne d'eau (CE), soit 600 à 3 000 Pa. Dans le domaine du nettoyage des gaz, les garnissages plastiques-en vrac de seconde et troisième génération, successeurs des anneaux Raschig et Pall, sont très utilisés. Ils sont moins onéreux que les garnissages structurés, sont plus faciles à remplacer en cas de bouchage et, étant en plastique, n'ont pas de problèmes de corrosion [7].

Un avantage supplémentaire est leur coefficient de transfert particulièrement élevé pour les autres polluants potentiellement présents, comme les gaz acides.

1.4.2.1.1. Garnissages :

Les garnissages sont de forme variable et peuvent être classés en deux grandes familles :

- Vrac : par exemple, anneaux Raschig, anneaux Pall, selles de Berl... en métal, en céramique ou matière plastique.
- Structuré (ou ordonné) : par exemple Sulzer BX, Montz B1-100.

Ils doivent produire une surface de contact la plus grande possible entre le liquide et le gaz, être inertes vis-à-vis des réactifs, créer une perte de charge raisonnable et être bon marché.

- Garnissages en vrac

Les garnissages en vrac sont caractérisés par plusieurs grandeurs liées à leur géométrie :

- Le diamètre d_p (m).
- L'aire interfaciale a^* (m².m⁻³).
- La porosité ε .
- Le facteur de garnissage F (m².m⁻³).

Pour le transfert de matière, c'est l'aire interfaciale réellement mouillée $a^0(m^2.m^{-3})$ par le liquide qui doit être prise en compte. Pour des systèmes air-eau, le rapport $\frac{a^0}{a^*}$ varie entre 0,4 et 0,7 [17].

Pour éviter des écoulements préférentiels dans la colonne, le rapport entre le diamètre de la colonne D et le diamètre du garnissage doit être compris dans l'intervalle 10 à 80. Le tableau 2 rassemble les caractéristiques géométriques de quelques garnissages.

- **Garnissages structurés**

Les garnissages structurés sont constitués de lamelles plissées selon un certain angle et empilées de manière à former des canaux ouverts. Ils sont construits en général sous forme de cylindres dont le diamètre est égal à celui de la colonne et dont la hauteur est comprise entre 0,15 et 0,30 m. Les valeurs des aires interfaciales sont importantes et indépendantes de la dimension du garnissage, contrairement aux garnissages en vrac dont a^* diminue avec l'augmentation de la taille. Ils sont en métal, en céramique, en matière plastique ou bien encore en tissu synthétique, ou en tissu métallique.

Tableau 1-2: Caractéristiques de quelques garnissages en vrac.

Types de garnissages	Diamètre	Aire interfaciale	Porosité	Facteur de garnissage
	(mm)	($m^2.m^{-3}$)	(%)	($m^2.m^{-3}$)
Anneaux Raschig acier	25	184	86	449
	38	128	90	272
	51	95	92	187
Anneaux Pallplastique	25	171	90	207
	38	131	91	128
	51	102	92	102
Selles de Berlécéramique	25	250	68	360
	38	151	71	215
	51	105	72	148

1.4.2.1.2. Diamètre de la colonne :

Le diamètre de la colonne dépend des débits des deux phases en présence et se calcule à partir des considérations hydrodynamiques liées à la perte de charge et aux conditions d'engorgement.

1.4.2.2. Colonnes à plateaux :

Le plateau à chicanes est constitué d'une plaque munie d'environ 30 000 orifices par m^2 surmontée d'un ensemble de chicanes où chaque chicane est placée immédiatement au-dessus

de chaque orifice. Le liquide de lavage s'écoule horizontalement sur le plateau en submergeant les chicanes. Sa profondeur est contrôlée par un déversoir.

Le gaz en écoulement ascendant est divisé en des milliers de petits jets par les orifices. Par un état de dépression, chaque jet entraîne une partie de liquide de lavage et crée une surface humide sur la chicane qui est placée au point de vitesse maximum du jet de gaz.

L'effet de choc sur cette surface humide entraîne une précipitation dynamique des particules solides et permet leur captation dans le liquide de lavage.

Chaque jet, au choc, forme de minuscules bulles de gaz qui s'élèvent, créant une turbulence dans la couche liquide et permettant un contact gaz-liquide très poussé.

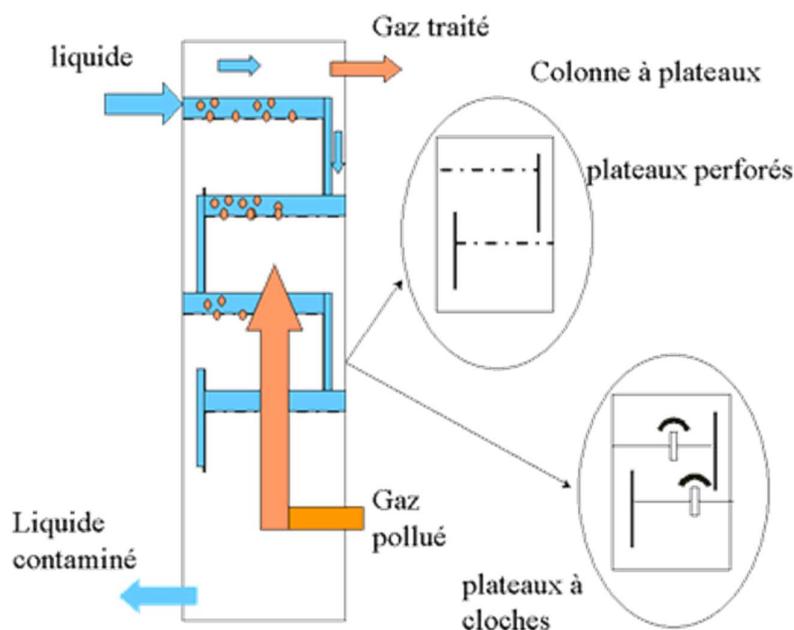


Figure 1-13: Représentation d'un plateau à chicanes

La disposition, le nombre, le type de plateaux, la perte de charge et la qualité de la solution de lavage sont autant de paramètres qui permettent une adaptation à chaque installation et confère au laveur un potentiel d'évolutivité avec les avantages suivants :

- Une perte de charges brusque qui génère un phénomène de détente et favorise la diffusion des polluants dans la solution de lavage.
- Un contact intime entre le gaz et la solution.
- Le temps de contact est constant et il n'y a pas de risque d'écoulement préférentiel.
- Très peu sensible à l'encrassement.

Généralement dans les colonnes à plateaux, l'efficacité et la perte de charge sont ainsi accrues, cette dernière pouvant dépasser 300 mm CE pour un laveur équipé de quelques plateaux. Pour des particules de 3 μm , on peut atteindre des efficacités de 99 % alors que dans le domaine sub-micronique cette efficacité est très faible. En règle générale, efficacité se

conjugue avec perte de charge. Certains développements récents ont abouti à des plateaux équipés de microcyclones qui donnent de très bonnes efficacités tant sur les poussières que sur les polluants gazeux, au prix d'une perte de charge importante. Dans les laveurs à plateaux, la vitesse des gaz est d'environ 2 à 2.5 m/s.

1.4.2.3. Réacteurs à pulvérisation :

Le principe de cette technologie est de créer une nappe de gouttes à haute vitesse dans une enceinte vide, perpendiculairement au flux à traiter. Le principal avantage de cette technique est d'éviter tout problème d'entretien qui peut survenir dans les colonnes à plateaux ou garnies. Il existe quatre grandes familles de réacteurs à pulvérisation [16] :

- Les réacteurs à pluie.
- Les réacteurs à pulvérisation transverse.
- Les réacteurs à colonnes de gouttes ou venturi.
- Les réacteurs évaporateurs.

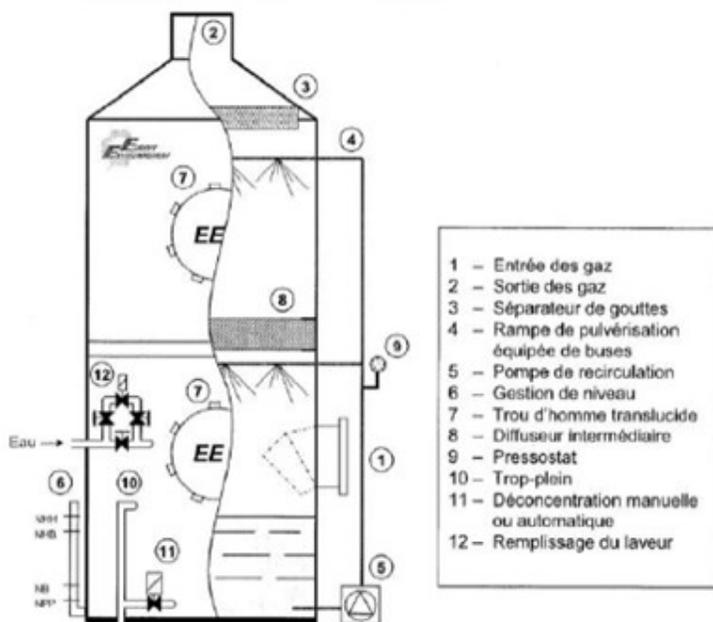


Figure 1-14: Equipements d'un laveur à pulvérisation.

1.4.2.3.1. Vitesse et débit :

Une des données dimensionnant les colonnes est la vitesse d'écoulement en phase gazeuse. En effet, celle-ci est en général comprise entre 0.7 et 2 m/s, afin que le temps de séjour dans le laveur soit suffisamment grand pour assurer un bon contact avec le liquide. Cette donnée est en général associée au rapport des débits de fumées à traiter (G – en m^3) et du débit de liquide de lavage (L – en litre).

En général, $\frac{L}{G} = 12 - 15 \text{ l. m}^{-3}$

Le débit de gaz à traiter permet alors de déterminer le débit de liquide à faire circuler dans la colonne. La surface de celle-ci peut être déterminée à partir du débit à traiter et de la vitesse d'écoulement gazeuse définie ci-dessous [5] :

$$\frac{\text{Débit de fumées (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\text{Vitesse d'écoulement en phase gazeuse (m. s}^{-1}\text{)}} = \text{Surface d'échange (m}^2\text{)} \quad [1.1]$$

La hauteur de la colonne est déterminée par le temps de contact nécessaire entre le gaz et le solide pour atteindre le taux d'épuration désiré, en considérant la vitesse d'écoulement en phase gazeuse.

Dans le cas d'une absorption physique, le temps de contact est déterminé à partir du flux de polluant transféré d'une phase à l'autre par unité de temps.

Le flux transféré, combiné à la quantité de polluants à éliminer et à la surface d'échange permet d'estimer la hauteur de colonne. En effet, la concentration de polluant dans la phase gazeuse et dans la phase liquide varie en fonction de la localisation dans la colonne, un calcul complexe est nécessaire.

Dans le cas d'une absorption par réaction chimique, la détermination du temps de contact est plus complexe. En effet, il faut ajouter au temps de transfert les paramètres liés à la vitesse et au taux de réaction de neutralisation des polluants dans la phase liquide. La détermination se fait, en général, à l'aide d'abaques

1.4.3. Modélisation du transfert de matière :

Le but final de la modélisation est de disposer d'outils fiables permettant de calculer les dimensions des contacteurs mis en œuvre pour une opération donnée de traitement d'effluent gazeux. Le point le plus important est la description des phénomènes au niveau de l'interface gaz-liquide, où deux régions (films) de faible épaisseur coexistent d'un côté et de l'autre de cette interface. Dans ces deux films sont localisées les résistances au transfert de matière. Le modèle le plus simple et le plus facile à utiliser est le modèle du double film de Lewis et Whitman (1924) [17].

Ce modèle peut s'appliquer à la fois dans le cas d'un transfert sans réaction chimique et dans le cas d'un transfert avec présence d'une réaction chimique totale ou partielle au sein du film liquide.

1.4.3.1. Absorption physique (sans réaction) :

Le modèle du double film (figure 1.15) est basé sur les hypothèses suivantes [18] :

- Entre les deux phases, il existe une interface sans épaisseur.
- Dans chacun des films immobiles, adjacents à l'interface, le transport du composé A se fait par diffusion moléculaire.
- L'épaisseur de chaque film dépend des conditions d'écoulement de chaque phase.
- À l'interface, les concentrations dans les deux phases sont en équilibre.

chaque film est caractérisé par un coefficient de transfert k_G et k_L .

- À l'extérieur des deux films, la turbulence est telle que les concentrations sont uniformes dans tout ou partie du volume des phases.
- Il n'y a pas de résistance au transfert interfaciale.
- Le déplacement des molécules s'effectue en régime permanent.

D'après la figure 1, les profils de concentration au sein des deux films sont linéaires et les expressions des flux de matière transférés s'écrivent de quatre façons différentes [18] :

$$N_A = k_G(C_G - C_{Gi}) = K_G(C_G - C^*_G) = k_L(C_{Li} - C_L) = K_L(C^*_L - C_L) \quad [1.2]$$

Avec :

N_A Flux transféré par unité d'aire d'échange ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

k_L coefficient de transfert du côté film liquide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

k_G coefficient de transfert du côté film gazeux ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

K_L coefficient global de transfert du côté liquide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

K_G coefficient global de transfert du côté gazeux ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

C_G concentration du composé A au sein du gaz ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$).

C_L concentration du composé A au sein du liquide ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$).

C_{Gi} concentration du composé A au sein du gaz au niveau de l'interface ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$).

C_{Li} concentration du composé A au sein du liquide au niveau de l'interface ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$).

À l'interface, les concentrations sont à l'équilibre et suivent la loi de Henry, à savoir qu'il y a proportionnalité entre la concentration du composé A dans la phase gazeuse et la concentration de A dissous dans la phase liquide [17] :

$$C_{Gi} = H_e C_{Li} \quad [1.3]$$

La combinaison des équations (1.2) et (1.3) permet de relier les coefficients globaux de transfert aux coefficients de transfert du côté film :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{H_e k_G}$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H_e}{k_L}$$

L'inverse des coefficients de transfert est assimilé à une résistance de transfert. Le double film se comporte donc comme s'il était constitué de deux résistances en série, une dans chaque film. L'ordre de grandeur des coefficients de transfert est de :

- $\approx 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ pour k_L
- $\approx 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ pour k_G

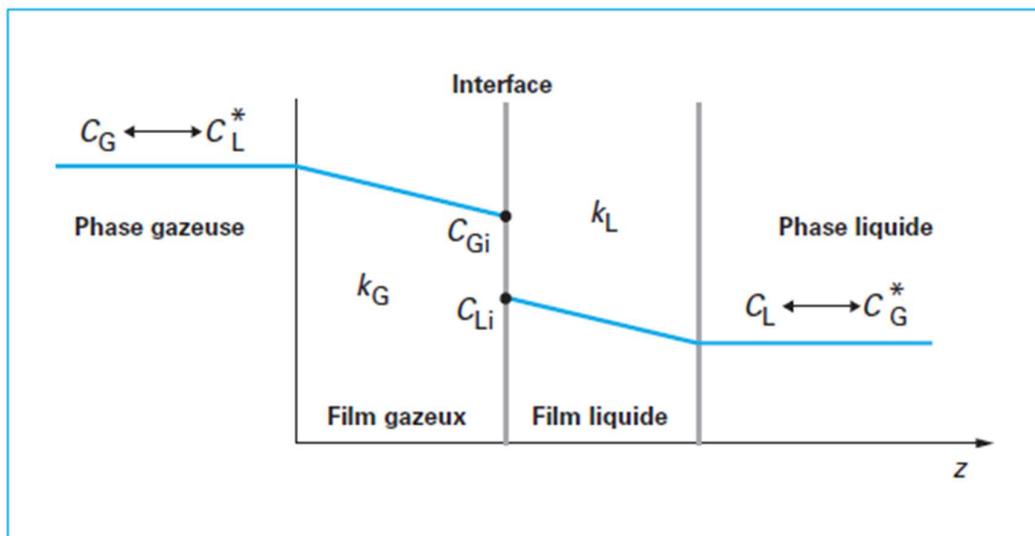


Figure 1-15: modèle du double film [7]

1.4.3.2. Absorption avec réaction chimique :

Considérons la situation suivante : le composé A, qui est passé de la phase gazeuse au sein de la phase liquide, réagit de façon irréversible avec un composé B dissous dans la phase liquide selon la réaction d'ordre 2 (de constante de vitesse k_2) :



Les expressions des vitesses de réaction s'écrivent :

$$r_A = k_2 C_A C_B$$

$$r_B = b k_2 C_A C_B$$

Avec r_A et r_B Vitesses des réactions ($\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_A et C_B Concentrations en composés A ou B ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

Il existe plusieurs situations possibles selon la compétition entre diffusion moléculaire au sein du film et vitesse de réaction chimique. Il faut donc savoir où a lieu la réaction chimique (au sein du liquide, en partie au sein du liquide et en partie dans le film liquide, dans le film liquide ou bien au niveau de l'interface [19]).

C'est l'étape la plus lente, entre la diffusion et la réaction, qui va définir les paramètres de la colonne. En général, les profils de concentrations ne sont pas linéaires. Le calcul du nombre de Hatta permet de définir le régime de la réaction. Nous considérerons que les ordres partiels des composés A et B sont égaux et valent 1.

$$H_a = \frac{\sqrt{k_2 C_{BL} D_{AL}}}{k_L} \quad [1.4]$$

Avec : C_{BL} la concentration de B dans la solution liquide (mol/L)

D_{AL} le coefficient de diffusion de A en phase liquide (m^2/s)

Tableau 1-3: Caractéristiques des différents régimes et choix des contacteurs gaz-liquide à partir de la détermination du nombre Hatta.

Nombre de Hatta	Caractéristiques du régime
$Ha < 0,3$	La réaction est très lente et a lieu uniquement au sein du liquide. Le profil de concentration de A dans le film est linéaire
$0,3 < Ha < 3$	La réaction est modérément rapide. Elle a lieu en partie dans le film et en partie au sein du liquide.
$Ha > 3$	La réaction est rapide et le composé A réagi exclusivement dans le film liquide.

Chapitre 2 : Méthodes et outils utilisés

2.1. Stratégie d'échantillonnage :

2.1.1. Description de la stratégie d'échantillonnage :

Avant de procéder à l'évaluation d'un milieu de travail, il est important de bien définir les objectifs de l'intervention et de suivre une démarche rationnelle. Le schéma décisionnel de la Figure 1 présente le cheminement logique d'une intervention qui vise à mesurer l'exposition des opérateurs à des contaminants présents dans leur milieu de travail. Le but de l'échantillonnage étant de comparer les concentrations du ou des contaminants auxquels peut être exposé le travailleur à des valeurs théoriques.

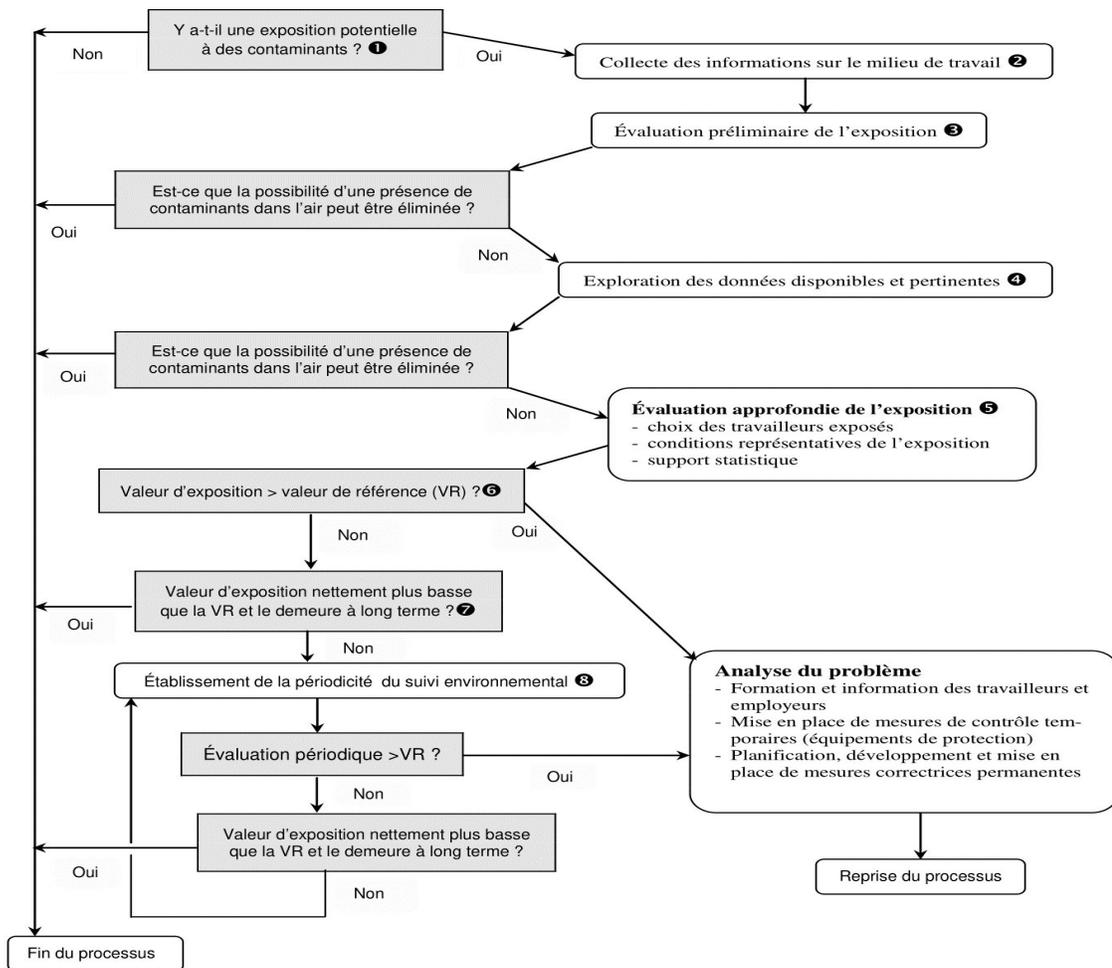


Figure 2-1: Schéma décisionnel d'évaluation de l'exposition.

2.1.1.1. Exposition potentielle à des contaminants :

La première étape d'évaluation d'un milieu de travail consiste à identifier les expositions potentielles à des contaminants. Cette identification s'obtient par consultation ou préparation d'une liste de tous les contaminants, produits et réactifs, qui peuvent contribuer à l'exposition du travailleur. Cette liste inclut, selon le cas, les produits de départ, les impuretés, les produits intermédiaires, finaux et secondaires.

2.1.1.2. Collecte des informations sur le milieu du travail :

La deuxième étape rassemble toutes les informations sur les procédés et procédures afin d'évaluer le potentiel d'exposition aux contaminants identifiés. Cette étape sert à décrire les éléments suivants :

- les tâches ;
- l'organisation du travail ;
- le ou les procédés ;
- la cartographie du milieu ;
- les moyens et les procédures de sécurité ;
- les sources d'émission ;
- la ventilation et autres moyens de contrôle à la source ;
- les durées d'exposition.

2.1.1.3. Évaluation préliminaire de l'exposition :

La troisième étape, l'évaluation préliminaire de l'exposition, cherche à relier les expositions potentielles et les informations sur le milieu de travail pour tenter d'établir la possibilité d'une exposition. Cette étape prend en considération les paramètres du procédé ou les modalités d'exécution du travail qui peuvent provoquer l'émission du contaminant dans l'environnement du travailleur. Ce sont dans le cas du procédé :

- la localisation et les caractéristiques de chaque source ;
- le nombre de sources d'émission ;
- les taux d'émission de chaque source ;
- la dispersion du contaminant par les déplacements d'air ;
- la nature et l'efficacité des moyens de contrôle (ventilation ou élimination à la source).

Les paramètres à considérer dans les modalités d'exécution des tâches sont, généralement :

- la proximité du travailleur des sources d'émission ;
- la durée de la présence du travailleur près des sources d'émission ;
- les modes opératoires qui peuvent causer ou augmenter les émissions.

2.1.1.4. Exploration des données disponibles et pertinentes :

Si l'évaluation précédente conclut à la possibilité de la présence de contaminant dans l'air, il est alors nécessaire de recueillir des informations quantitatives sur les expositions potentielles. Ces informations quantitatives sont obtenues à la quatrième étape par exploration des données disponibles et pertinentes provenant de résultats collectés précédemment dans le milieu même du travailleur, si l'exploration de ces données ne permet pas de comparer l'exposition aux valeurs de référence, il faut alors procéder à une évaluation approfondie de l'exposition.

2.1.1.5. Évaluation approfondie de l'exposition :

L'évaluation approfondie de l'exposition (étape 5) nécessite une démarche rigoureuse, considérant des bases statistiques afin d'assurer la représentativité des échantillonnages et l'interprétation correcte des résultats. Cependant, par souci d'efficacité et d'optimisation de l'utilisation des ressources, les exigences de l'évaluation approfondie de l'exposition peuvent être adaptées aux résultats de la comparaison des mesures de concentration avec les valeurs de référence. En effet, lorsque des données objectives indiquent qu'une exposition est nettement au-dessus ou en dessous des valeurs de référence, les exigences analytiques et statistiques peuvent devenir moins contraignantes et permettre l'utilisation de techniques faciles d'application quitte à sacrifier un degré, acceptable statistiquement, de précision et d'exactitude.

2.1.1.6. La périodicité du suivi environnemental :

La poursuite d'objectifs à long terme sur l'évaluation de l'efficacité des moyens de contrôle et d'élimination à la source ou l'obtention de résultats de valeur d'exposition qui sont près de la valeur de référence pose la question de la périodicité du suivi environnemental, généralement l'intervalle entre les évaluations d'exposition devrait tenir compte des facteurs suivants :

- cycles du procédé incluant les cycles d'opération normale et les cycles d'entretien ou de réparation ;
- conséquences de pannes des installations de contrôle ou d'élimination à la source ;
- proximité des concentrations ambiantes et des valeurs de référence ;
- efficacité des moyens de contrôle ;
- variabilité temporelle des résultats.

2.1.2. Mesurage des vapeurs acides de la station de stripping d'ALGESCO :

Dans le cadre de la réalisation de l'échantillonnage et de l'analyse des vapeurs d'acides dans l'air au sein de l'enceinte du local de stripping en service et à l'arrêt.

Un plan d'échantillonnage a été défini et transmis par la Station de stripping :

Tableau 2-1: Plan d'échantillonnage.

Zone	Conditions d'échantillonnage	Nombre d'échantillons	Paramètres recherchés
Quantification de la pollution de l'air			
Local de stripping	2 échantillons avec machines en service	4	<i>HBr</i> <i>HCl</i> <i>HF</i> <i>H₃PO₄</i> <i>HNO₃</i> <i>H₂SO₄</i>
	2 échantillons avec machines à l'arrêt		

2.1.3. Echantillonnage et analyse de l'air :

L'échantillonnage des vapeurs d'acides a été réalisée à l'aide d'un **échantillonneur actif (Gillian 5000)** muni d'un filtre de type « **Tube Washed Silica Gel (400/200 mg)** [20] placé aux deux extrémités du local de stripping.

Chaque pompe a préalablement été calibrée avec un échantillonneur représentatif on-ligne (Sensidyne Go-Cal Portable Calibrator).



Figure 2-2: Pompe à prélèvement d'échantillons.

Tableau 2-2: Polluants ciblés par l'échantillonnage.

Polluants ciblés par l'échantillonnage
Acide Bromhydrique (HBr)
Acide Chlorhydrique (HCl)
Acide Fluorhydrique (HF)
Acide Phosphorique (H_3PO_4)
Acide Nitrique (HNO_3)
Acide Sulfurique (H_2SO_4)

Au total (02) points d'échantillonnage ont été sélectionnés au niveau local de stripping :



Figure 2-3: Station de prélèvement 1.



Figure 2-4: Station de prélèvement 2.

La durée d'échantillonnage a été d'approximativement (04) heures, les filtres ont ensuite été conditionnés puis transférés puis analysés par le laboratoire SGS (Accrédité ISO 17025).

La méthodologie d'analyse utilisée par le laboratoire afin d'analyser les vapeurs d'acide est la méthodologie dictée par la norme NIOSH 7903 (Annexe).

2.1.4. Méthode d'extraction des gaz acides :

Afin d'assurer une étude cohérente et claire, nous avons proposé un schéma montrant la démarche que nous avons suivie durant notre étude.

Démarche de travail



Figure 2-5: Schéma de la démarche suivit

2.1.5. Dimensionnement du système de canalisation des vapeurs acides :

2.1.5.1. Dimensionnement de la table aspirante :

L'aspiration du gaz à partir du bac contenant les acides se fait à l'aide d'une table aspirante faite en résine, de largeur égalant celle du bac. La table aspirante est placée juste au-dessus du bac afin que l'aspiration soit quasi-totale.

Voici les dimensions du bac :

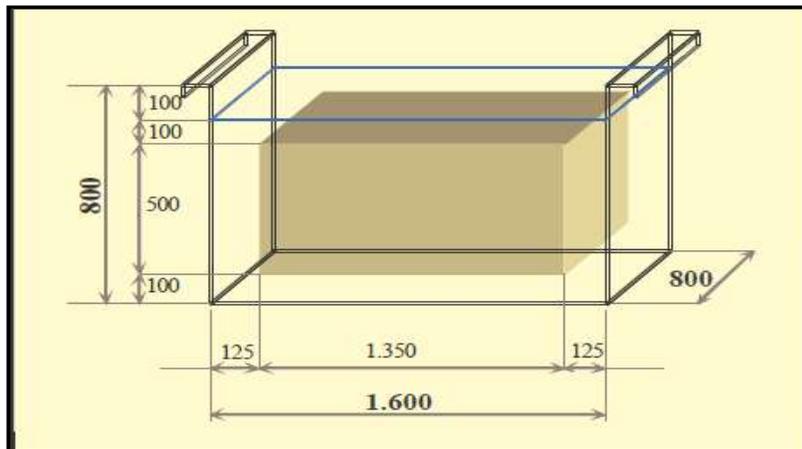


Figure 2-6: Dimensions du bac.

Voici le modèle qui illustre la table aspirante que nous proposons (SolidWorks) :

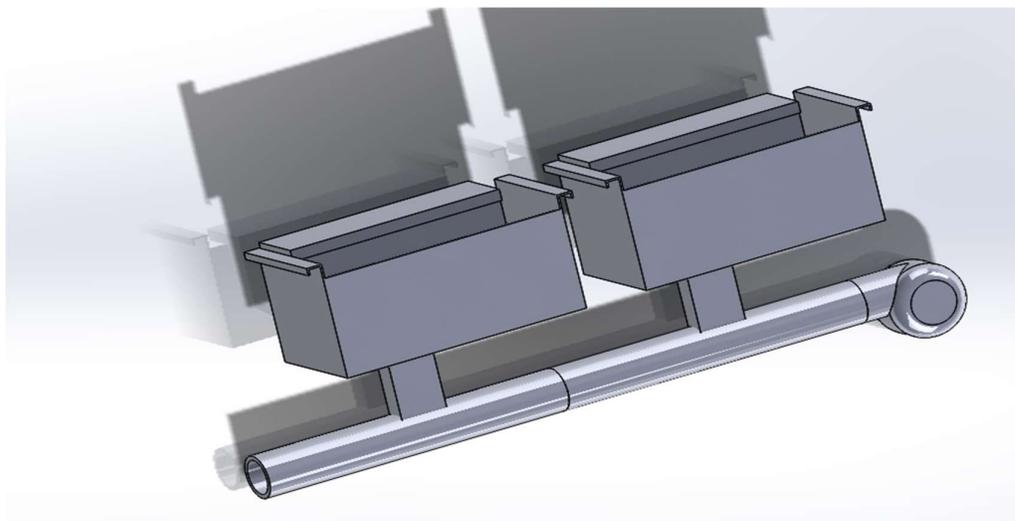


Figure 2-7: Vue de face de la table aspirante placée au-dessus du bac.

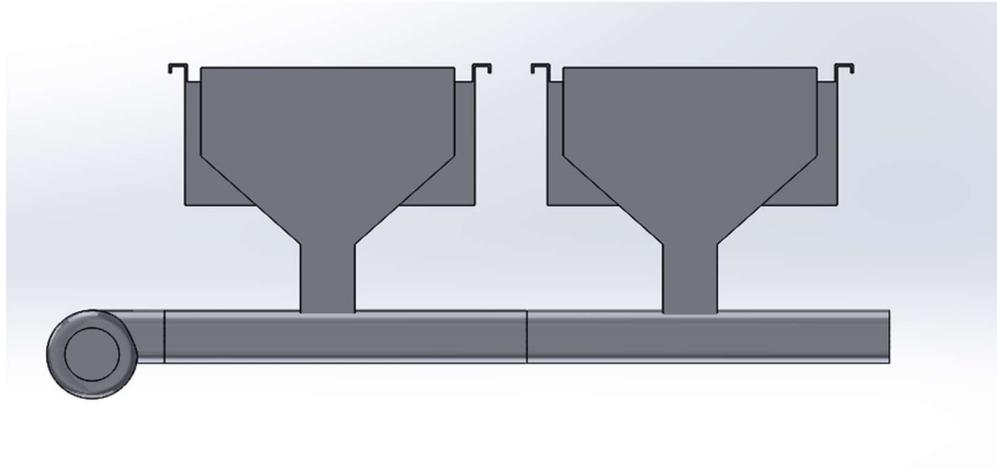


Figure 2-8: Vue arrière de la table aspirante.

2.1.5.2. Détermination du débit d'arrivé du gaz :

Afin de calculer le débit d'aspiration la vitesse de captage doit être induite jusqu'au point le plus éloigné de la fente d'aspiration, c'est à dire jusqu'à une distance égale à la largeur de la table, nous choisirons donc une vitesse $V_c = 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ compte tenu de la nature de l'opération (absence de courant d'air), nous aurons donc [21]-[22]-[23]-[24] :

$$Q = 1.6. l. L. V_c \quad [2.1]$$

L: longueur du bac (m)

l: largeur du bac (m)

V_c : vitesse de captage (m.s^{-1})

Q: débit d'aspiration ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

2.1.5.3. Détermination de la puissance du moteur :

Le dimensionnement du système d'extraction consiste à définir la puissance du moteur ainsi que la perte de charge du réseau que celui-ci doit vaincre.

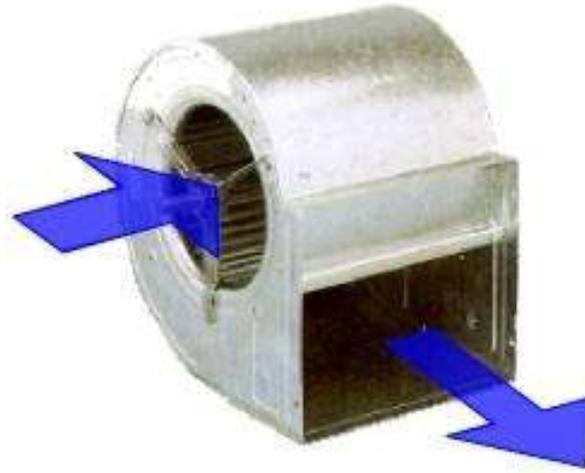


Figure 2-9: Modèle d'extracteur (25).

Afin de déterminer la puissance nécessaire pour le moteur, nous devons d'abord calculer la puissance transmise au fluide et cela en utilisant la loi suivante [26] :

$$P_{fl} = (Q.Hm) \quad [2.2]$$

Avec :

P_{fl} : Puissance transmise au fluide par l'extracteur (W)

Q : Le débit d'arrivé du gaz ($m^3.s^{-1}$)

Hm : Hauteur manométrique (mm CE)

En considérant les différents frottements des organes de rotation, on aura donc [26] :

$$P = \frac{P_{fl}}{R_v \times R_t} \quad [2.3]$$

P : Puissance mécanique nécessaire à l'extracteur

R_v : Rendement mécanique du ventilateur $R_v = 80\%$

R_t : Rendement de la transmission $R_t = 70\%$

2.1.6. Etude de la colonne à garnissage :

La colonne à garnissage est sans doute le plus simple et le plus traditionnel des contacteurs gaz-liquide. Il s'agit d'une colonne munie d'un plateau support, et remplie de garnissage de types très divers. Ces garnissages sont mis en place d'une manière aléatoire le plus fréquemment (figure 2.10) parfois d'une manière ordonnée comme pour les gros anneaux Raschig dans notre cas. Le liquide ruisselle par gravité le long de ce garnissage après avoir été distribué au moyen d'un plateau situé au sommet de la colonne. Dans notre cas, le gaz circule à contre-courant du liquide [27].

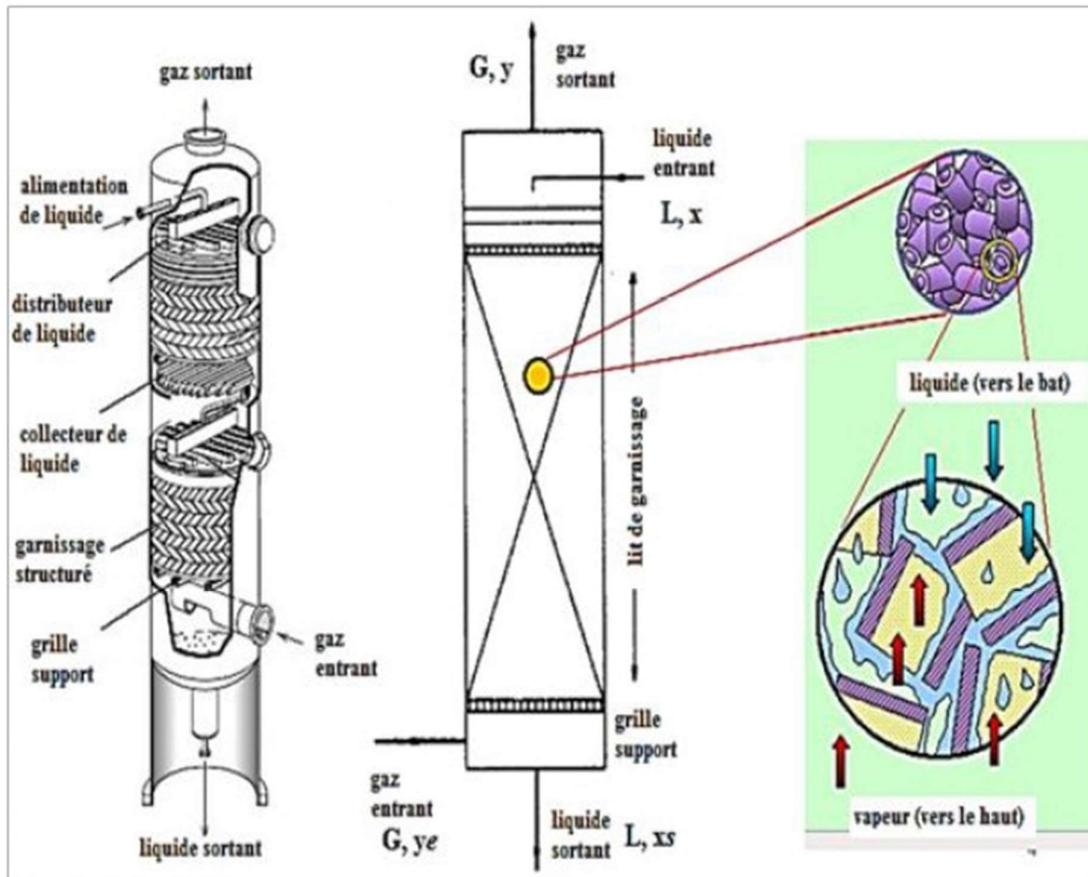


Figure 2-10: Colonne à garnissage [28].

Nous considérons alors un gaz provenant de l'enceinte de stripping d'ALGESCO contenant 0.069% en moles d'acide fluorhydrique. Afin d'éliminer la majeure partie de l'HF et de réduire sa teneur à 0.0005% par un lavage à contre-courant, le solvant utilisé est l'eau à 100% en poids (soit 55 moles par litre). L'opération a lieu à 25°C, sous la pression atmosphérique. Sachant que la colonne est garnie d'anneaux Raschig de 3 pouces en céramique (3 pouces = 71 mm), nous souhaitons déterminer ses dimensions pour qu'elle puisse traiter un débit gazeux de $3520 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Nous choisirons, pour les

conditions de fractionnement, un taux de solvant égal à 1,5 fois la valeur minimale, et une vitesse de vapeur égale à 50% de la vitesse d'engorgement [29].

2.1.6.1. Données relatives au mélange HF-H₂O :

- L'acide fluorhydrique :
 - Mélange à 0.069% molaire d'HF
 - Masse molaire moyenne du gaz $M_g = 20.01 \text{ g.mol}^{-1}$.
 - Masse volumique à 25°C : $\rho_{\text{HF}} = 0.83 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3}$.
 - Masse volumique à 25°C : $\rho_{\text{air}} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3}$.
 - Viscosité de l'air : $\mu_G = 10^{-4} \text{ g.cm}^{-1}.s^{-1}$ (*Poise*)
- L'eau :
 - Solution aqueuse à 100% en poids d'eau (55,55 molaire)
 - Masse volumique à 25°C $\rho_l = 1 \text{ g.cm}^3$
 - Viscosité à 25°C $\mu_l = 1,00 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$
- Equilibre liquide-vapeur :

La courbe d'équilibre [30] en pression partielle de HF (exprimé en Torr) en fonction de son pourcentage molaire en phase liquide, nous donne le tableau ci-dessous :

Tableau 2-3: pression partielle de HF vapeur en fonction des fractions molaires de HF liquide.

Pression (Torr)	HF (%)
0.0001	0.05
0.1	0.064
0.165	0.1
0.23	0.12
0.52	0.2
4.26	0.4
42.63	0.6

Afin de pouvoir déterminer les conditions d'écoulement des fluides, il est nécessaire de convertir les données de la courbe d'équilibre en fractions molaires :

Tableau 2-4: Fractions molaires de HF vapeur en fonction des fractions molaires de HF liquide.

$Y = \frac{\text{Pression partielle}}{\text{Pression totale}} (\%)$	X (%)
0.009	0.05
0.013	0.064
0.021	0.1
0.03	0.12
0.069	0.2
0.56	0.4
5.6	0.6

La courbe correspondante est tracée ci-dessous :

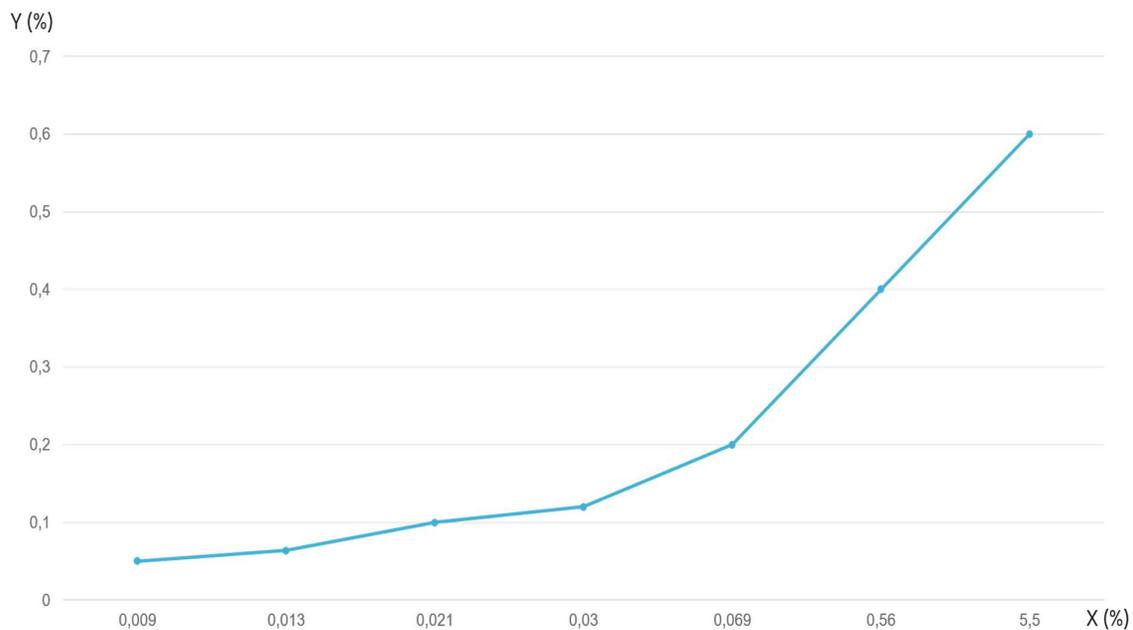


Figure 2-11: Courbe d'équilibre gaz-liquide à T=25°C et P=1 atm.

Avec : x = pourcentage molaire de HF dans la solution aqueuse liquide
 y = pourcentage molaire de HF dans la phase gazeuse.

2.1.6.2. Données relatives au garnissage :

- Anneaux Raschig de 2 pouces (50 mm), en céramique ;
- Facteur de vide : $\epsilon = 0,75$
- Surface spécifique : $a_p = 0,506 \text{ cm}^2.\text{cm}^{-3}$

2.1.6.3. Coefficients de diffusion [31] :

- coefficient de diffusion de HF dans la phase gazeuse $D_G = 0.243 \text{ cm}^2/\text{s}$;
- coefficient de diffusion de HF dans la phase liquide $D_L = 1.68 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$.

2.1.6.4. Résumé de la procédure de dimensionnement de la colonne :

1. Détermination des conditions d'écoulement des fluides :

1.1. Bilan molaire de la colonne en régime permanent :

- Que peut-on dire sur la valeur des débits molaires G_0 et G_S d'une part L_0 et L_S d'autre part.
- Exprimer le bilan molaire de la colonne
- Déterminer graphiquement la valeur du taux de solvant molaire minimum :

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{min}$$
- En adoptant un taux de solvant égal à 1,5 fois la valeur minimale, en déduire le rapport des débits molaires $\frac{L}{G}$.
- Etablir l'équation de la droite opératoire $y = f(x)$.

1.2. Calcul des débits massique du gaz et du liquide L et G.

1.3. Calcul la vitesse maximale du gaz U dans la colonne vide :

- Calculer la valeur de $B = \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$ [2.4]
- En adoptant que la perte de charge maximale est de 15 mm Hg /mètre de hauteur garnie déterminer la valeur du groupe

$$A = \frac{U^2 \times a_p \times \psi}{g \epsilon^3} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right) (\mu_L)^{0.2}$$
 [2.5]
- à la limite de l'engorgement et lorsque le garnissage est en vrac à l'aide de l'abaque.
- En déduire la vitesse maximale du gaz U dans la colonne vide.

1.4. Calcul du diamètre de la colonne.

2. Calcul des hauteurs d'unité de transfert

- Calcul le débit massique de liquide par unité de surface
- Calcul du HUT_L par la formule de Sherwood & Holloway :

$$HUT_L = A. \left(\frac{L'}{\mu_L}\right)^{0.25} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L}\right)^{0.5} \quad [2.6]$$

- Calcul le débit massique de gaz par unité de surface
- Calcul du HUT_G par la formule de Pratt :

$$HUT_G = \frac{1}{c} \frac{\varepsilon}{a_p} \left(\frac{d_e G'}{\mu_G \varepsilon}\right)^{0.25} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G}\right)^{0.67} \quad [2.7]$$

- A l'aide des valeurs de HUT_L et HUT_G calculées précédemment déterminer la valeur du rapport $\frac{k_L}{k_G}$.

3. Calcul de la hauteur de colonne

- Calcul la hauteur par la formule suivante :

$$Z = HUT_G \times NUT_G = HUT_L \times NUT_L \quad [2.8]$$

- Conclure sur la hauteur du garnissage (vérifier que la valeur trouvée est acceptable du point de vue industriel).

2.1.6.5. Ecoulement des fluides dans les garnissages :

- Capacité de garnissage :

Un certain nombre de corrélations empiriques concernant la capacité d'engorgement ont été proposé. Les plus utilisées sont dérivées de celle établie par Sherwood et Al dés [32] pour des garnissages d'anneaux en vrac, et reprise par Eckert [33]. Cette corrélation permet le calcul de la vitesse du gaz à l'engorgement à l'aide d'une relation graphique entre les deux groupes :

$$A = \frac{U^2 \times a_p \times \Psi}{g \varepsilon^3} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right) (\mu_L)^{0.2} \quad \text{et} \quad B = \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

Dans lesquels les termes ont les significations suivantes :

U : Vitesse du gaz à l'engorgement dans la colonne supposée vide (m.s^{-1})

a_p : Surface spécifique du garnissage (m^{-1})

g : Accélération de la pesanteur (m.s^{-2})

ε : Fraction de vide du garnissage (-)

L : Débit massique de liquide (kg.s^{-1})

G : Débit massique de gaz (kg.s^{-1})

μ_L : Viscosité du liquide (cPo)

$\psi = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_L}$: Terme correctif pour les liquides visqueux de densité différente de celle de l'eau.

Le terme B étant une valeur constante, et en admettant que la perte de charge maximale est de 15 mm Hg/ mètre de hauteur garnie, nous pouvons déterminer par projection sur l'abaque de Sherwood et Al modifié par Eckert la valeur du groupe A et donc la valeur de la vitesse maximale du gaz U_G dans la colonne vide.

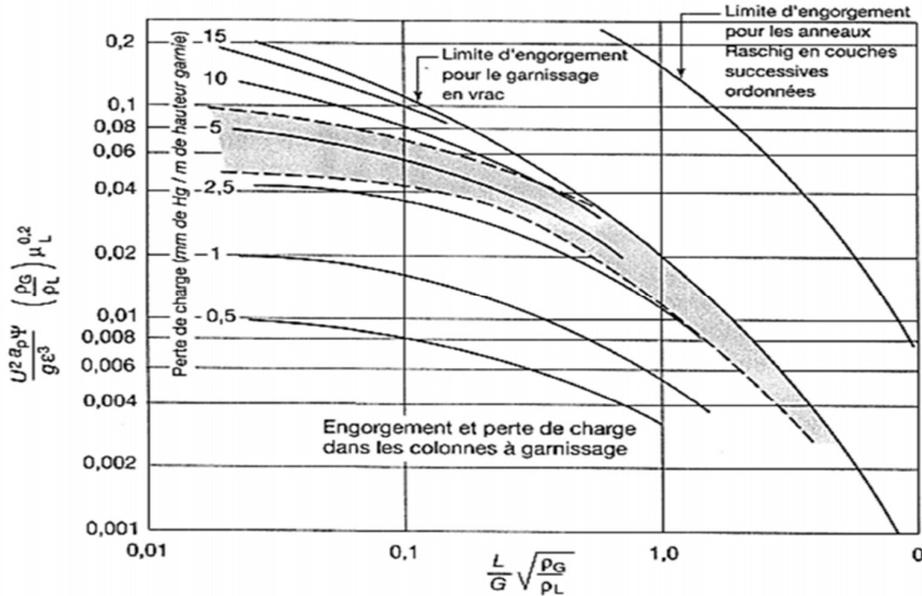


Figure 2-12: Abaque généralisé représentant l'engorgement et les pertes de charge au sein d'un garnissage [34].

- Diamètre de la colonne :

Le diamètre est lié à la vitesse adoptée pour la phase gazeuse U_G , nous aurons donc :

$$d^2 = \frac{4Q}{\pi U_G} \quad [2.9]$$

2.1.6.6. Calcul du point de fonctionnement de la colonne :

Afin de dimensionner notre colonne de la meilleure manière qui soit, nous commencerons par déterminer le diamètre de cette dernière puis sa hauteur. Le calcul du diamètre s'effectue à partir de la valeur du débit souhaité pour l'installation (calculé précédemment).

Connaissant le débit et la vitesse du gaz il est alors aisé d'en déduire le diamètre de la colonne. Le calcul de la hauteur de cette dernière est plus complexe et fait appel aux notions de plateau théorique ou d'unité de transfert [35].

- Notion d'unité de transfert :

Pour décrire le fonctionnement de la colonne, nous admettons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les solubilités du diluant dans le solvant et du solvant dans le diluant sont négligeables et seul le soluté (HF) est transféré d'une phase à l'autre ;
- Les régimes permanents d'écoulement et de transfert de matière établis ;
- L'opération de transfert est isotherme ;
- Les solutions sont très diluées et donc la masse volumique de chaque phase peut être considérée comme constante.
- Le flux molaire du soluté Φ entre les deux phases se traduit par une variation continue des fractions molaires en soluté (x , y) dans chaque phase tout au long de la colonne. On considérera néanmoins que l'on est en présence de phases suffisamment diluées et nous admettons que les débits molaires restent constants tout au long de la colonne [36].

$$L_0 = L_S = cst = L$$

$$G_0 = G_S = cst = G$$

Entre le bas de la colonne et une section quelconque à la cote Z l'équation du bilan sur le soluté s'écrit :

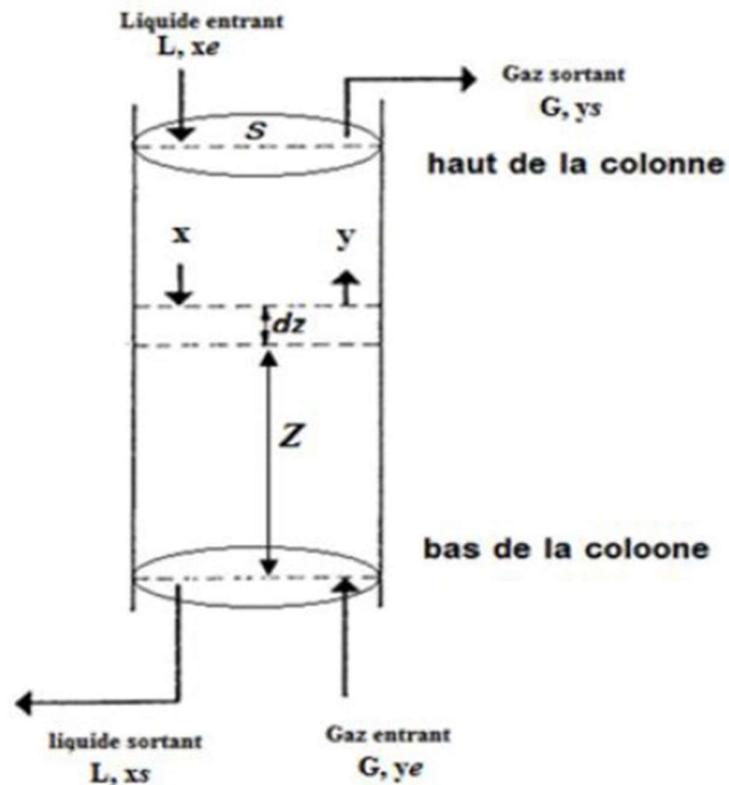


Figure 2-13: Bilan de la colonne d'absorption [35].

Bilan partiel sur l'actif :

$$G \cdot y_e + L \cdot x = G \cdot y + L \cdot x_s \quad [2.10]$$

Soit :

$$\frac{L}{G} = \frac{y_e - y}{x_s - x} \quad [2.11]$$

Qui est l'équation de la droite opératoire dans laquelle G et L représentent respectivement le débit du gaz et du liquide (molaire ou massique), x et x_s les titres en soluté de la phase liquide à la cote Z et en bas de la colonne, enfin y et y_e sont les titres en soluté de la phase gazeuse aux mêmes endroits.

Le bilan en soluté sur un élément de colonne d'épaisseur dz peut s'obtenir en dérivant l'expression précédente :

$$G \cdot dy = L \cdot dx = dN \quad [2.12]$$

Où :

dN : représente le flux de soluté transféré d'une phase à l'autre dans la tranche de volume $S \cdot dz$, S représentant l'aire de la section droite de la colonne. On aurait pu aussi obtenir ces équations en écrivant explicitement le bilan des flux entrants et sortants de cet élément de volume.

On écrit alors que le flux dN de soluté est proportionnel à la surface d'échange A entre les phases (en $m^2 \cdot m^{-3}$) et à une différence de titre, qui est la force motrice du transfert; le coefficient de proportionnalité est un coefficient de transfert, k qui est une mesure de la facilité avec laquelle le transfert a lieu. Ainsi, si on raisonne sur la phase gazeuse :

$$dN = k_G(A \cdot S \cdot dZ)(y - y_i)$$

et sur la phase liquide :

$$dN = k_L(A \cdot S \cdot dZ)(x_i - x)$$

$(y - y_i)$ et $(x_i - x)$ les forces motrices dans chacune des 2 phases. Les produits $k_G(A \cdot S \cdot dZ)$ et $k_L(A \cdot S \cdot dZ)$ sont les conductances de transfert dans les 2 phases. Mais on ne connaît pas les compositions à l'interface x_i et y_i . On raisonne donc sur l'ensemble des 2 phases, en posant :

$$dN = K_G(A \cdot S \cdot dZ)(y - y^*) \quad [2.13]$$

$$dN = K_L(A.S.dZ)(x^* - x) \quad [2.14]$$

Où $x^*(y)$ est la fraction massique d'une phase liquide qui serait en équilibre avec la phase gazeuse de composition y ; de même $y^*(x)$ représente le titre d'une phase gazeuse qui serait en équilibre avec le liquide de composition x . Les différences $(y - y^*)$ et $(x^* - x)$ représentent les écarts par rapport à l'équilibre thermodynamique évalués sur l'ensemble des 2 phases.

En remplaçant dN dans l'équation [2.12] par son expression à partir de l'équation [2.13] et [2.14] tout en séparant les variables, nous obtenons :

$$dz = \frac{G}{A.S.K_G} \frac{dy}{y-y^*} = \frac{L}{A.S.K_L} \frac{dx}{x^*-x} \quad [2.16]$$

Si les termes $\frac{G}{A.S.K_G}$ et $\frac{L}{A.S.K_L}$ varient peu, on peut écrire, en intégrant :

$$dz = \frac{G}{A.S.K_G} \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y-y^*} = \frac{L}{A.S.K_L} \int_{x_e}^{x_s} \frac{dx}{x^*-x} \quad [2.17]$$

On définit alors, pour chaque phase, une unité de transfert comme une portion de colonne réalisant des séparations définies respectivement par :

$$\int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y-y^*} = 1$$

$$\int_{x_e}^{x_s} \frac{dx}{x^*-x} = 1$$

Les titres y_e, x_e et y_s, x_s sont les titres à l'entrée et à la sortie de cette portion de colonne. On définit pour chaque phase une hauteur d'unité de transfert (HUT) et un nombre d'unités de transfert (NUT) par :

$$HUT_G = \frac{G}{A.S.K_G} \text{ et } HUT_L = \frac{L}{A.S.K_L}$$

$$NUT_G = \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y-y^*} \text{ et } NUT_L = \int_{x_e}^{x_s} \frac{dx}{x^*-x}$$

Finalement, le calcul de la hauteur de la colonne Z est exprimé sous la forme :

$$Z = (\text{hauteur d'une unité de transfert}) \times (\text{nombre d'unités de transfert})$$

Nous aurons donc :

$$Z = HUT_G \times NUT_G = HUT_L \times NUT_L$$

2.1.6.7. Calcul du nombre d'unité de transfert d'une séparation :

Le calcul du nombre d'unités de transfert (NUT) peut se faire par intégration graphique comme nous le montre la figure ci-dessous :

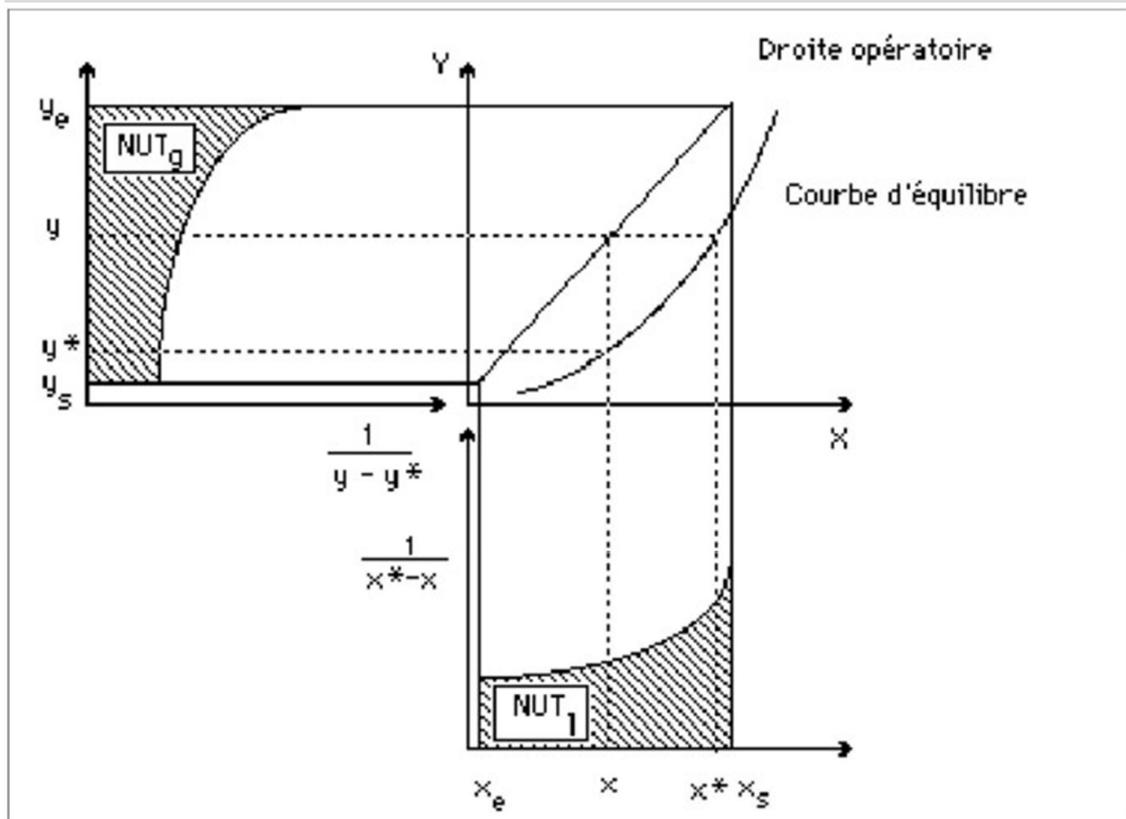


Figure 2-14: Calcul du nombre d'unités de transfert par intégration graphique [35].

La figure ci-dessous montre la construction des courbes $\frac{1}{y-y^*}$ et $\frac{1}{x^*-x}$ à partir de la courbe de partage et de la droite opératoire. La mesure des aires comprises sous les courbes entre les bornes d'intégration fournit les valeurs des nombres d'unités de transfert.

2.1.6.8. Calcul du nombre d'unités de transfert globales :

Nous nous plaçons dans le cas pour lequel on peut considérer G et $A.S.K_G$ constants sur la hauteur d'une colonne. Nous posons donc :

$$\frac{Z.A.S.K_G}{G} = \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y-y^*} \quad [2.18]$$

Le terme de droite a été appelé par Chilton et Colburn « nombre d'unité de transfert globales en phase gazeuse », par la définition :

$$NUT_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y-y^*} \quad [2.19]$$

L'équation de la droite opératoire est de la forme : $y = kx + q$, k étant la pente.

L'équation de la droite d'équilibre est de la forme : $y^* = Kx$, K étant la pente.

Nous aurons donc à partir de l'équation de la droite opératoire : $x = \frac{y-q}{k}$

En substituant x dans l'équation de la droite d'équilibre nous obtenons : $y^* = K \frac{y-q}{k}$

Ce qui nous permet de calculer [37] :

$$y - y^* = y - K \left(\frac{y-q}{k} \right) = \frac{y(k-K) + Kq}{k} \quad [2.20]$$

Et

$$\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y-y^*} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{k dy}{y(k-K) + Kq} \quad [2.21]$$

L'intégration donne :

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k-K} \left[\ln \left(\frac{y(k-K) + Kq}{k} \right) \right]_{y_s}^{y_e} \quad [2.22]$$

D'où :

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k-K} \ln \frac{y_e(k-K) + Kq}{y_s(k-K) + Kq} \quad [2.23]$$

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k-K} \ln \frac{y_e + \frac{Kq}{(k-K)}}{y_s + \frac{Kq}{(k-K)}} \quad [2.24]$$

Or, le terme $\frac{Kq}{(k-K)}$ est négligeable devant y_e et y_s , on aura :

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k-K} \ln \frac{y_e}{y_s} \quad [2.25]$$

2.1.6.9. Calcul de la hauteur d'une unité de transfert :

Dans le chapitre 1, nous nous sommes intéressés aux mécanismes de transfert de matière, et nous avons obtenu :

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + K \frac{1}{k_L} \quad [2.26]$$

Ou en terme de hauteur d'unité de transfert :

$$HUT_{OG} = HUT_G + K \frac{G}{L} HUT_L \quad [2.28]$$

Avec :

$$HUT_L = \frac{L}{A.S.K_L}$$

$$HUT_G = \frac{G}{A.S.K_G}$$

Nous avons aussi :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + K \frac{1}{k_G}$$

$$HUT_{OL} = HUT_L + K \frac{L}{G} HUT_G \quad [2.29]$$

Nous avons établi cette démonstration en nous basant sur le fait qu'il n'y ait pas de réaction chimique de l'acide fluorhydrique en phase liquide.

2.1.6.10. Estimation des hauteurs :

Les hauteurs d'unités de transfert globales, HUT_{OG} et HUT_{OL} , sont caractéristiques de l'installation (couple phase gazeuse / phase liquide, mais aussi de la nature du garnissage) alors que les hauteurs d'unités de transfert de film, HUT_G et HUT_L , sont caractéristiques de chacune des phases et peuvent être estimées indépendamment à l'aide de corrélations [37].

A. Formule de Pratt pour les gaz :

$$HUT_G = \frac{1}{C} \frac{\varepsilon}{a_p} \left(\frac{d_e G'}{\mu_G \varepsilon} \right)^{0.25} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{0.67}$$

Avec $\frac{d_e G'}{\mu_G \varepsilon}$ = Nombre de Reynolds modifié pour le gaz

$\frac{\mu_G}{\rho_G D_G}$ = Nombre de Schmidt pour le gaz

Le calcul est effectué avec les unités du système CGS [centimètre : cm, gramme : g, seconde : s]

ε : Fraction de vide du garnissage ()

a_p : Surface spécifique du garnissage ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3} = \text{cm}^{-1}$)

d_e : Diamètre équivalent du garnissage $d_e = \frac{4\varepsilon}{a_p}$ (cm)

G' : Débit massique de gaz par unité de section droite de la colonne ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) $G' = \frac{G}{S}$

G : Débit massique du gaz (g.s^{-1})

S : Section de la colonne (cm^2) $S = \frac{(\pi d^2)}{4}$

d : Diamètre de la colonne (cm)

μ_G : Viscosité dynamique du gaz en Poise ($\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

ρ_G : Masse volumique du gaz (g.cm^{-3})

D_G : Coefficient de diffusion du soluté dans la phase gazeuse ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)

C : Constante sans dimension valant 0.105 pour les anneaux *Raschig* empilés en vrac.

B. Formule de Sherwood & Holloway pour les liquides :

$$HUT_L = A. \left(\frac{L'}{\mu_L} \right)^{0.25} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{0.5}$$

Avec $\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} =$ nombre de Schmidt pour le liquide

L' : Débit massique du liquide par unité de section droite de la colonne ($\text{g.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$) avec

$$L' = \frac{L}{S}$$

L : Débit massique du liquide (g.s^{-1})

μ_L : Viscosité dynamique du liquide en Poise ($\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

ρ_L : Masse volumique du liquide (g.cm^{-3})

D_L : Coefficient de diffusion du soluté dans la phase liquide ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)

A : Constante sans dimension valant 0,3 pour les anneaux *Raschig* empilés en vrac [Unité CGS].

2.1.7. Simulation sur Aspen HYSYS :

2.1.7.1. Définition du logiciel :

Le logiciel « HYSYS » a pour but de simuler et de traiter tous les problèmes afférents aux phénomènes de transfert de chaleur et de matières dans les domaines chimiques, pétrochimique et raffinage du pétrole. Il offre, également la possibilité de calculer toutes les propriétés physiques et thermodynamique des fluides.

Dans notre cas, nous utilisons HYSYS V10 et cela en lui introduisant les paramètres d'entrées calculées précédemment afin de vérifier si les résultats concorde avec notre théorie.

2.1.7.2. Procédure de la simulation :

Il y a des étapes principales et essentielles dans la préparation, l'exécution, et la documentation de la simulation avec HYSYS V10 [38].

Ces étapes sont :

1. Commencer un nouveau projet (new case) ;
2. Sélectionner les unités de mesure à utilisées (Tools) ;
3. Sélectionner les composées (components) ;
4. Sélectionner un modèle et les propriétés par les choix de fluide package ;
5. Sélectionner entrer simulation environnement pour créer le flow sheet ;
6. Enter les équipements ;
7. Sélectionner le Stream pour entrer les données de l'alimentation (feed Stream) ;
8. Entrer les spécifications des opérations unitaires ;
9. Exécuter la simulation (Run) ;
10. Sélectionner les Stream de la sortie pour afficher les résultats ;

Chapitre 3 : Résultats et interprétation

3.1. Résultats :

3.1.1. Analyse des vapeurs acides au niveau de l'enceinte de stripping d'ALGESCO :

Le tableau ci-dessous présente les concentrations des vapeurs acides mesurées au niveau de l'enceinte de stripping d'ALGESCO.

Tableau 3-1: Résultats de la quantification.

ID	Conditions d'échantillonnage	Durée (min)	Volume (L)	Masse (μg)	Concentration ($\mu g \cdot L^{-1}$)
#1	Equipement en service	247	74	< 5	ND*
#2	Equipement en service	253	76	< 5	ND*
#3	Equipement a l'arrêt	245	72	< 5	ND*
#4	Equipement a l'arrêt	245	72	<5	ND*

* : ND : non détectable

Les résultats d'analyse de l'air intérieur obtenus lors du fonctionnement normal des équipements et à l'arrêt, ont montré que l'ensemble des gaz acides mesurés au niveau de l'enceinte de stripping étaient inférieurs aux valeurs limites de détection.

Ces résultats ne peuvent pas être exploités pour dimensionner le système d'extraction et de traitement des gaz acide.

A cet effet et afin de mieux cerner notre étude, nous avons pris comme valeur de référence la limite maximale d'exposition professionnelle dans l'air en milieu de travail de l'acide fluorhydrique [39] $c = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} = 5 \text{ ppm}$ tels que $y = 5 \cdot 10^{-4} \%$ et on a supposé que cette concentration puisse être dépassée à environ 100 fois en cas de fortes émissions fugitives au niveau de l'enceinte de stripping on aura alors $y_e = 0.069 \%$.

3.1.2. Dimensionnement du système de canalisation des vapeurs acides :

- Détermination du débit d'arrivé du gaz :

Pour la détermination du débit d'aspiration des vapeurs acides au niveau du bac de décapage chimique nous avons utilisé la technique de captage avec fente d'aspiration arrière

Nous aurons :

$$Q = 1.6. l. L. V_c = 1.6 \times 0.8 \times 1.6 \times 0.5$$

$$Q = 0.9792 \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$$

$$Q = 3520 \text{ m}^3. \text{h}^{-1}$$

- Détermination de la puissance du moteur :

Nous avons :

$$Hm = \rho_{eau} \cdot g \cdot h = 1000 \times 9.81 \times 0.2 = 1962 \text{ Pa}$$

Avec :

$$\rho_{eau} : \text{Masse volumique de l'eau } \rho_{eau} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g : \text{Accélération de la pesanteur } g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$h : \text{Hauteur en colonne d'eau } h = 200 \text{ mm} \cdot \text{CE} = 0.2 \text{ m} \cdot \text{CE}$$

On aura donc :

$$P_{fl} = (Q \cdot Hm) = 0.97 \times 1962$$

$$P_{fl} = 1.9 \text{ kW}$$

La puissance nécessaire au moteur sera :

$$P = \frac{P_{fl}}{R_v \times R_t} = \frac{1.9}{0.8 \times 0.7} = 3.4$$

$$P = 3.4 \text{ kW}$$

3.1.3. Etude de la colonne à garnissage :

3.1.3.1. Bilan molaire de la colonne en régime permanent :

Le schéma de la colonne est donné ci-contre :

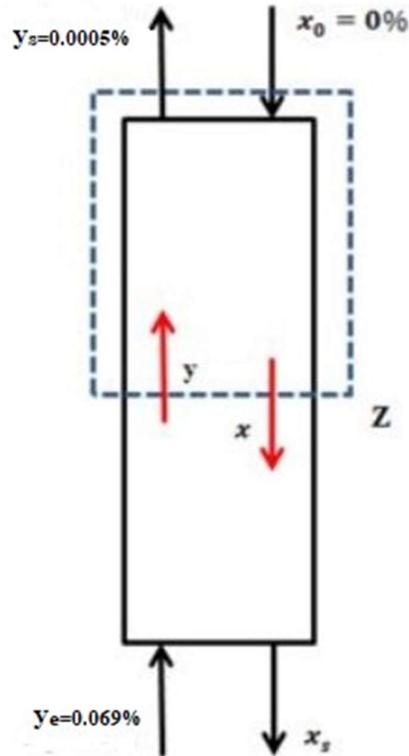


Figure 3-1: Schéma de la colonne d'absorption.

Le gaz, de débit G , entre dans la colonne avec le titre y_0 , en ressort avec le titre y_s . La phase aqueuse entre avec le titre $x_0 = 0$, et ressort avec le titre x_s . A une hauteur Z de colonne, les phases qui se croisent ont comme titre x et y . Les solutions étant diluées en HF, on pourra admettre que le transfert s'effectue sans changement de masses des débits L et G (L et G considérés comme étant constante le long de la colonne). Dans ces conditions, la conservation de l'HF dans le domaine délimité par les pointillées s'écrira :

$$G \cdot y + L \cdot x_0 = G \cdot y_s + L \cdot x$$

Soit :

$$y = \frac{L}{G} \cdot x + y_s$$

On obtient l'équation d'une droite opératoire, qui passe par le point de coordonnées $x=0$, $y=0.0005$ et qui a pour pente la valeur $\frac{L}{G}$ (avec les débits exprimés en mole /unité de temps).

Dans ces conditions, le taux minimum de solvant sera donné par la pente de la droite opératoire qui coupera la courbe d'équilibre au point d'ordonnée $y = 0.069\%$ (position qui correspondrait à une hauteur infinie de colonne).

Sur la figure ci-dessous $\left(\frac{L}{G}\right)_{min}$ est obtenue en joignant les points $(x_0; y_s) = (0; 0.0005)$ avec $(x_s; y_0) = (0.2; 0.069)$. On obtient par la pente $\left(\frac{L}{G}\right)_{min} = 0.35$. On choisira donc une droite opératoire de pente :

$$\frac{L}{G} = 1.5 \times \left(\frac{L}{G}\right)_{min} = 1.5 \times 0.35 = 0.52$$

L'équation de cette droite sera :

$$y = 0.52x + 0.0005$$

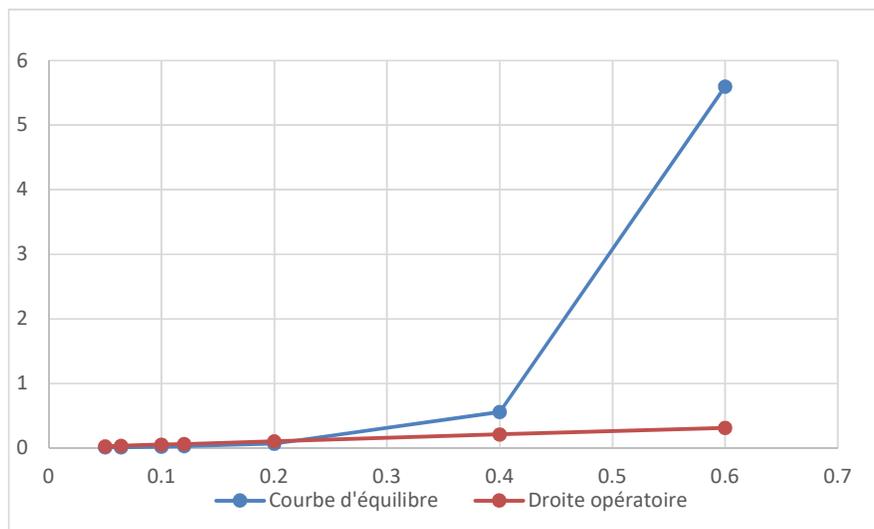


Figure 3-2: Calcul du taux du solvant molaire minimum.

3.1.3.2. Calcul des débits gaz et liquide :

- **Calcul du débit du gaz :**

On a :

$Q_0 = 3225 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ débit volumique du gaz dans les conditions standard (1 atm et 0°C). Dans les conditions opératoires, ce débit devient :

$$Q = \frac{Q_0 \times T}{T_0} = \frac{3225 \times 298}{273} = 3520 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Soit en masse :

$$G = Q \times 1.2 = 3520 \times 1.2 = 4224 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

• **Calcul du débit liquide :**

Une mole de vapeur = 6.9×10^{-4} moles de HF + 0.99931 Moles d'air, soit une masse molaire moyenne de :

$$M_{moy1} = 6.9 \times 10^{-4} \times 30 + 0.99931 \times 29$$
$$M_{moy1} = 29.05 \text{ g} \cdot \text{mole}^{-1}$$

La masse molaire moyenne du liquide est de :

$$M_{moy2} = \frac{1000}{55.55} = 18 \text{ g} \cdot \text{mole}^{-1}$$

On en déduit que :

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{en masse}} = \left(\frac{L}{G}\right)_{\text{en moles}} \times \frac{18}{29.05}$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{en masse}} = 0.52 \times 0.619$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{en masse}} = 0.32$$

Finalement : $L = 0.32 \times 4224 = 1351 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

$$L = 1351 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

3.1.3.3. Calcul de la vitesse maximale du gaz U dans la colonne vide :

Nous obtenons la vitesse U en utilisant l'abaque de Sherwood et al modifié par Eckert et cela en projetant la valeur du groupe B (valeur constante) sur la courbe de la limite d'engorgement qui admet une valeur maximale de 15 mm Hg/ mètre de hauteur garnie.

Le rapport des débits étant exprimé en masse. On aura :

$$B = \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = 0.32 \times \sqrt{\frac{1.2 \times 10^{-3}}{1}} = 0.01$$

Par projection nous obtenons :

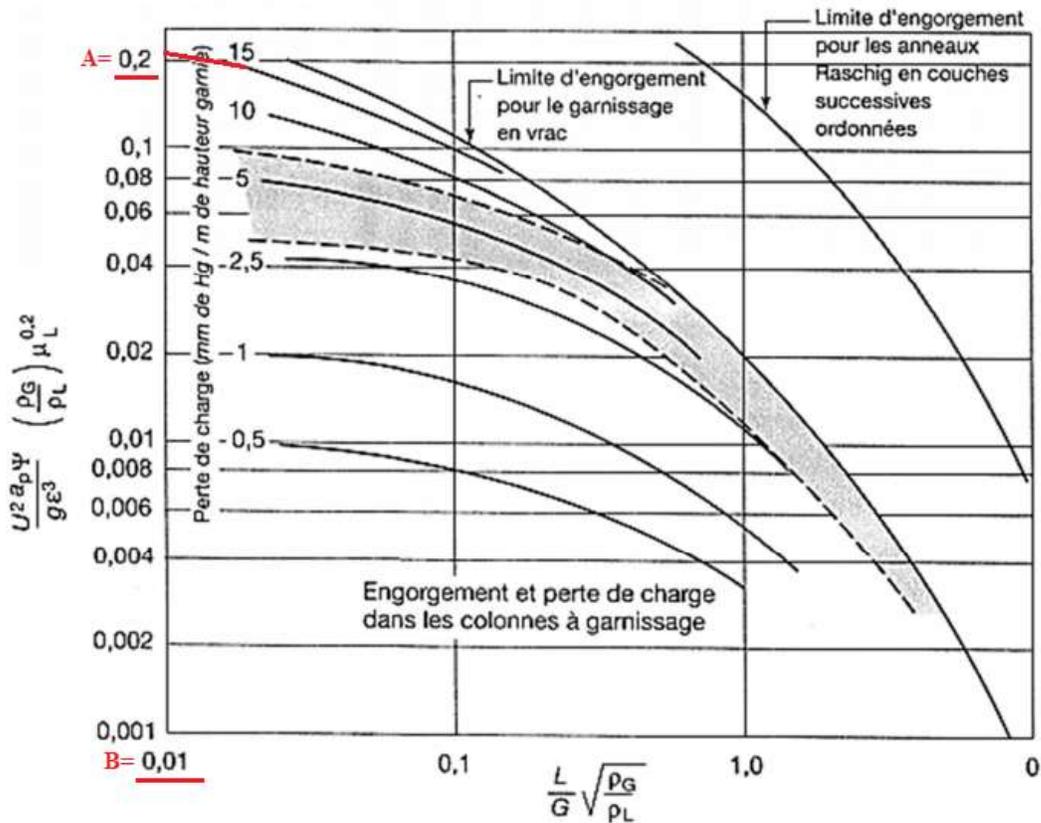


Figure 3-3: Abaque de Sherwood et al modifié par Eckert donnant A en fonction de B.

$$A = \frac{U^2 \times a_p \times \psi}{g \epsilon^3} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) (\mu_L)^{0.2} = 0.2$$

Cette formule est valable en unités CGS avec

$$\psi = 1$$

$$a_p = 0,506 \text{ cm}^{-1}$$

$$\epsilon = 0.75$$

$$g = 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$$

Donc :
$$U^2 = \frac{A.g.\varepsilon^3 \rho_L}{a_p \psi \rho_G \mu_L^{0.2}} \frac{1}{\rho_G \mu_L^{0.2}} = \frac{0.2 \times 981 \times 0.75^3 \times 1}{0.506 \times 1 \times 1.2 \times 10^{-3} \times 1^{0.2}} = 136317$$

$$U = 369 \text{ cm. s}^{-1}$$

On choisira donc une vitesse de gaz égale à :

$$U_G = 369 \times 0.5 = 184.6 \text{ cm. s}^{-1}$$

$$U_G = 1.846 \text{ m. s}^{-1}$$

3.1.3.4. Calcul du diamètre de la colonne :

Le diamètre de la colonne est lié à la vitesse adoptée pour la phase gazeuse U_G . On peut alors en déduire le diamètre de la colonne, soit :

$$d^2 = \frac{4Q}{\pi U_G}$$

Avec : $Q = 3520 \text{ m}^3 . \text{h}^{-1} = \frac{3520}{3600} = 0.97 \text{ m}^3 . \text{s}^{-1}$

Donc : $d^2 = \frac{4 \times 0.97}{\pi \times 1.846} = 0.67$

$$d = 0.81 \text{ m}$$

3.1.3.5. Calcul des hauteurs d'unité de transfert :

- HUT_L :

$$HUT_L = A. \left(\frac{L'}{\mu_L} \right)^{0.25} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{0.5}$$

La section de la colonne étant de :

$$s = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{81}{2} \right)^2 = 5153 \text{ cm}^2$$

Et: $L' = \frac{1351 \times 1000}{5153 \times 3600} = 0.07 \text{ g. s}^{-1} . \text{cm}^{-2}$

Nous aurons donc :

$$HUT_L = 0.3 \times \left(\frac{0.07}{0.01} \right)^{0.25} \times \left(\frac{0.01}{1 \times 1.68 \times 10^{-5}} \right)^{0.5}$$

$$HUT_L = 12 \text{ cm}$$

- **HUT_G** :

$$HUT_G = \frac{1}{C} \frac{\varepsilon}{a_p} \left(\frac{d_e G'}{\mu_G \varepsilon} \right)^{0.25} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{0.67}$$

Soit :

$$G' = \frac{4224 \times 1000}{3600 \times 5153} = 0.22 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{a_p} = 5.928 \text{ cm}$$

$$HUT_G = \frac{1}{0.105} \frac{0.75}{0.506} \times \left(\frac{5.928 \times 0.22}{10^{-4} \times 0.75} \right)^{0.25} \times \left(\frac{10^{-4}}{1.2 \times 10^{-3} \times 0.243} \right)^{0.67}$$

$$HUT_G = 79.1 \text{ cm}$$

$$\frac{k_L}{k_G} = \frac{L}{G} \times \frac{HUT_G}{HUT_L}$$

L et G étant exprimés en débits molaires, soit :

$$\frac{k_L}{k_G} = 0.52 \times \frac{79.1}{12} = 3$$

La résistance du film est 3 fois plus importante dans la phase liquide que dans la phase vapeur.

Nous avons la relation suivante :

$$HUT_{OG} = HUT_G + K \frac{G}{L} HUT_L$$

Avec le rapport $\frac{G}{L}$ en moles, et la pente K de la courbe d'équilibre assimilée à une droite pour $y < 0.069$ % (Figure 3.4).

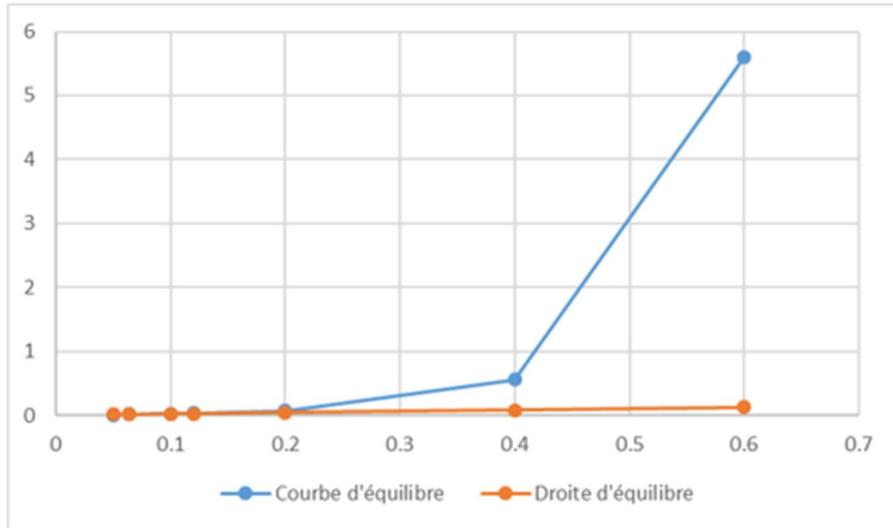


Figure 3-4: Droite d'équilibre.

Nous aurons donc :

$$HUT_{OG} = 79.1 + \frac{0.21}{0.52} \times 12$$

$$HUT_{OG} = 83.94 \text{ cm}$$

3.1.3.6. Calcul de la hauteur de colonne :

Le nombre d'unité de transfert global NUT_{OG} est défini par l'équation suivante :

$$NUT_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

- Analytiquement :

Nous avons :

L'équation de la droite opératoire :

$$y = 0.52x + 0.0005 \quad [3.1]$$

L'équation de la courbe d'équilibre :

$$y^* = 0.21x \quad [3.2]$$

$$y = kx + q \quad [3.3]$$

$$y^* = Kx \quad [3.4]$$

Par identification on obtient :

$$\frac{Kq}{(k-K)} = 0.000338$$

De l'équation à nous obtenons :

$$x = \frac{y - q}{k}$$

En substituant x dans l'équation (3.4) nous aurons :

$$y^* = K \frac{y - q}{k}$$

$$y - y^* = y - K \left(\frac{y - q}{k} \right) = \frac{y(k - K) + Kq}{k}$$

Donc :

$$\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{k dy}{y(k - K) + Kq}$$

Nous aurons donc :

$$NUT_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{k dy}{y(k - K) + Kq}$$

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k - K} \left[\ln \left(\frac{y(k - K) + Kq}{k} \right) \right]_{y_s}^{y_e}$$

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k - K} \ln \frac{y_e(k - K) + Kq}{y_s(k - K) + Kq}$$

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k-K} \ln \frac{y_e + \frac{Kq}{(k-K)}}{y_s + \frac{Kq}{(k-K)}}$$

En négligeant le terme $\frac{Kq}{(k-K)}$ devant y_e et y_s , on aura :

$$NUT_{OG} = \frac{k}{k-K} \ln \frac{y_e}{y_s}$$

$$NUT_{OG} = \frac{0.52}{0.52 - 0.21} \ln \frac{0.069}{0.0005}$$

$$NUT_{OG} = 8.25$$

D'où la hauteur cherchée de la colonne :

$$Z = HUT_{OG} \times NUT_{OG} = 0.839 \times 8.25$$

$$Z = 7 \text{ mètres}$$

3.1.4. Simulation sur ASPEN HYSYS :

3.1.4.1. Choix des composés (component) :

Nous avons introduit les composés présents dans le mélange.

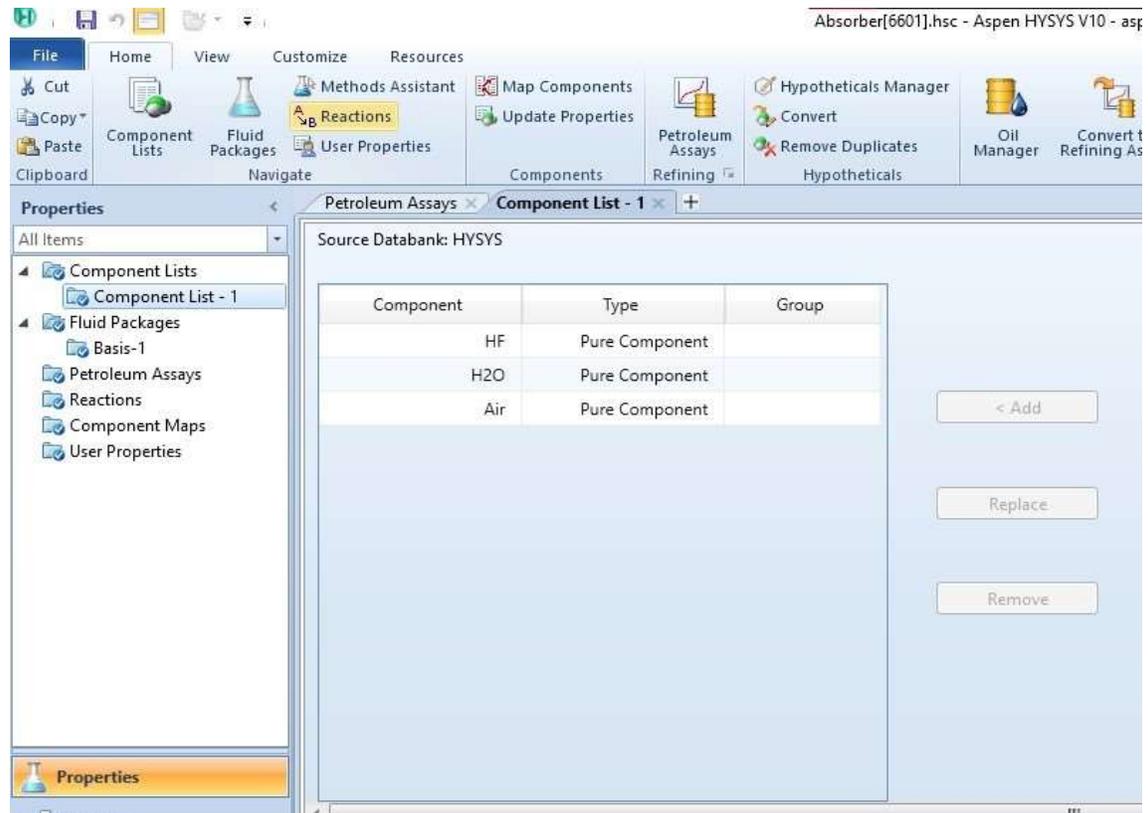


Figure 3-5: Sélection des composés

3.1.4.2. Sélection du modèle thermodynamique « fluide package » :

Il permet aussi de définir les modèles thermodynamiques qui seront utilisés pour le calcul des propriétés des mélanges et de définir les cinétiques des réactions chimiques mises en jeu dans le procédé. Nous avons choisi dans notre cas, le modèle de Wilson.

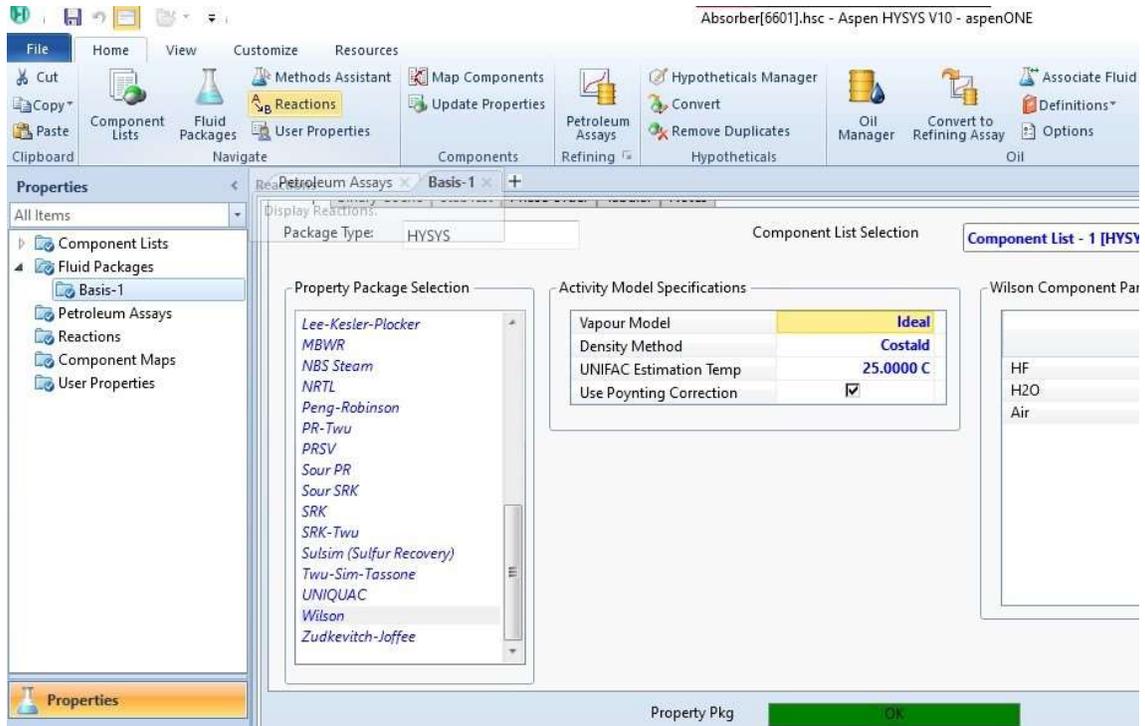


Figure 3-6: Choix du modèle thermodynamique

3.1.4.3. Introduction des paramètres d'entrée :

- a- **Les conditions** : il s'agit de la température, le débit massique et volumique des deux flux : liquide et gaz.

Worksheet	Stream Name	liquid in	Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	25.00	25.00
Composition	Pressure [kPa]	400.0	400.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	74.99	74.99
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1351	1351
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1.354	1.354
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.849e+005	-2.849e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	6.557	6.557
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-2.137e+007	-2.137e+007
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1.331	1.331
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figure 3-7: Paramètres du liquide en entrée

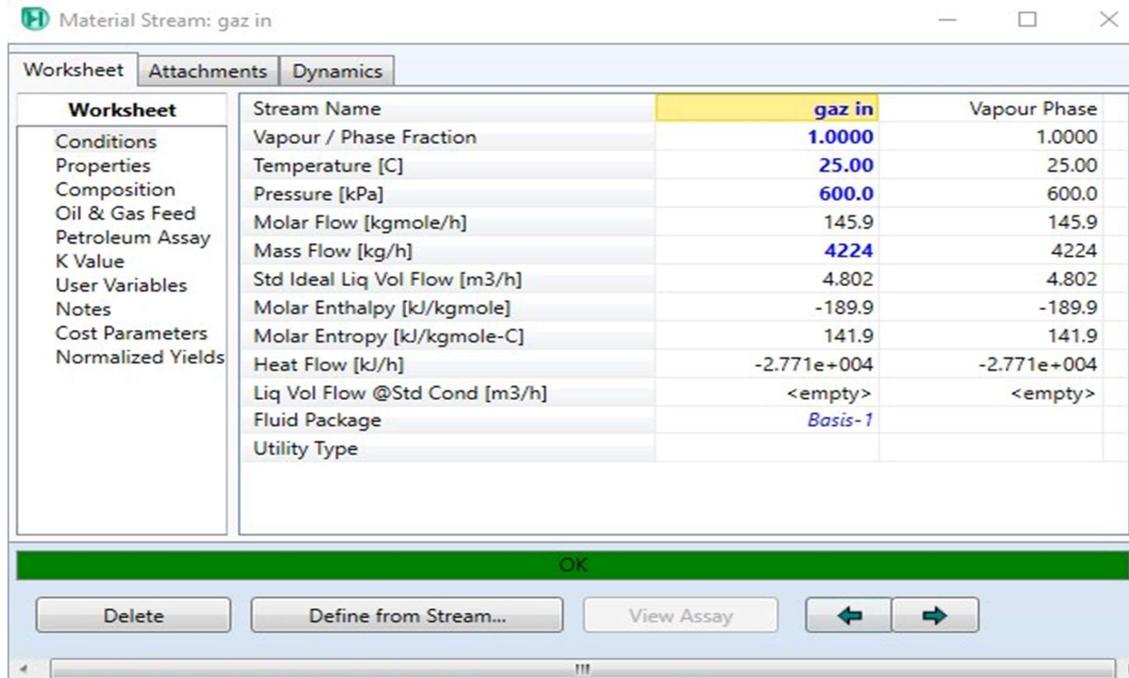


Figure 3-8: Paramètres du gaz en entrée

- b- **Les compositions** : introduction des fractions des 3 composées (HF, H₂O et l'air) dans les flux entrants.

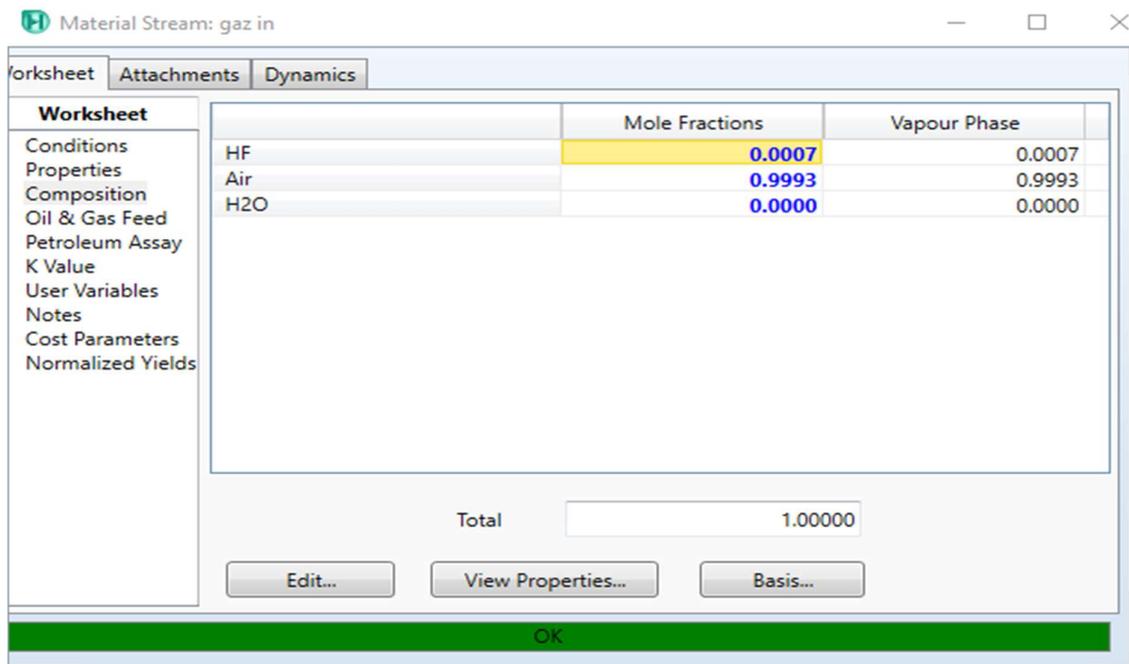


Figure 3-9: Compositions en fractions molaire du gaz en entrée

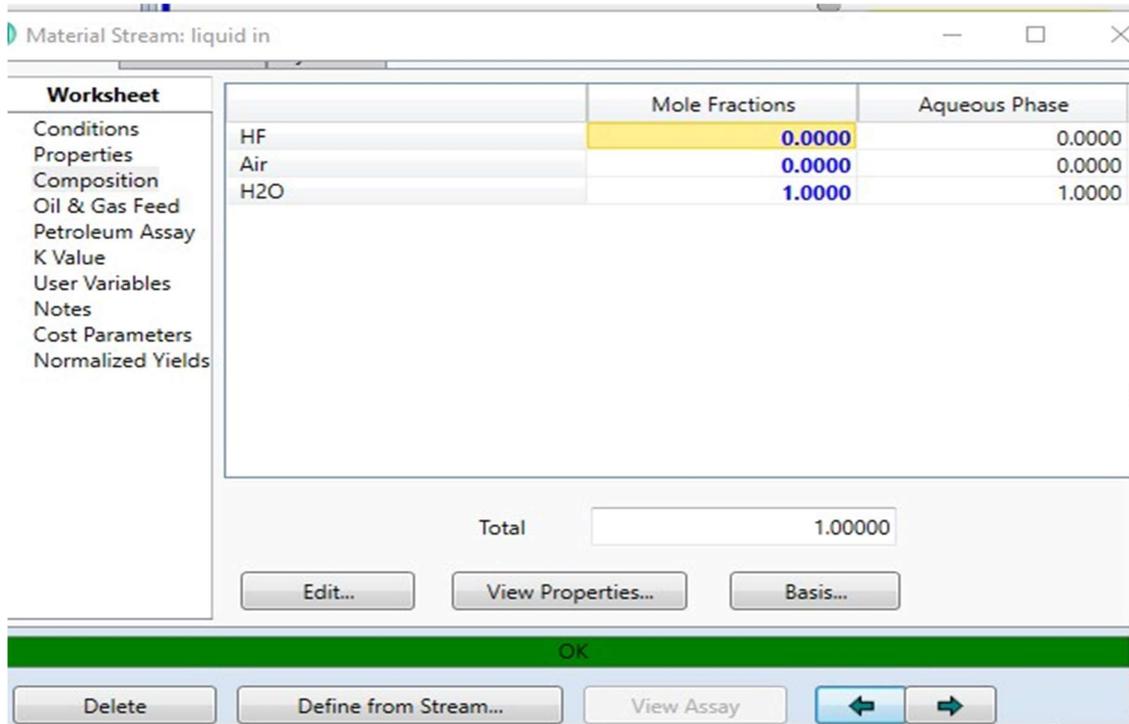


Figure 3-10: Composition en fractions molaire du liquide en entrée

3.1.4.4. Sélection de la colonne d'absorption et réglage des spécifications (anneaux Raschig, diamètre de la section, hauteur) :

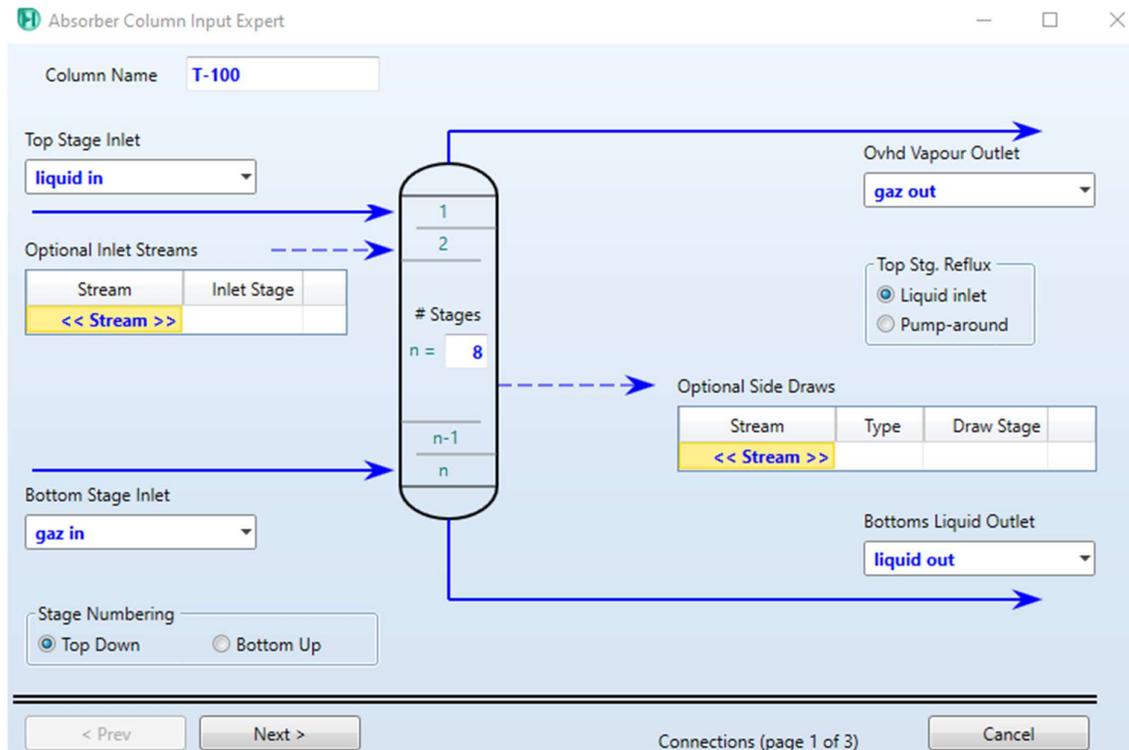


Figure 3-11: Paramétrage de la colonne d'absorption

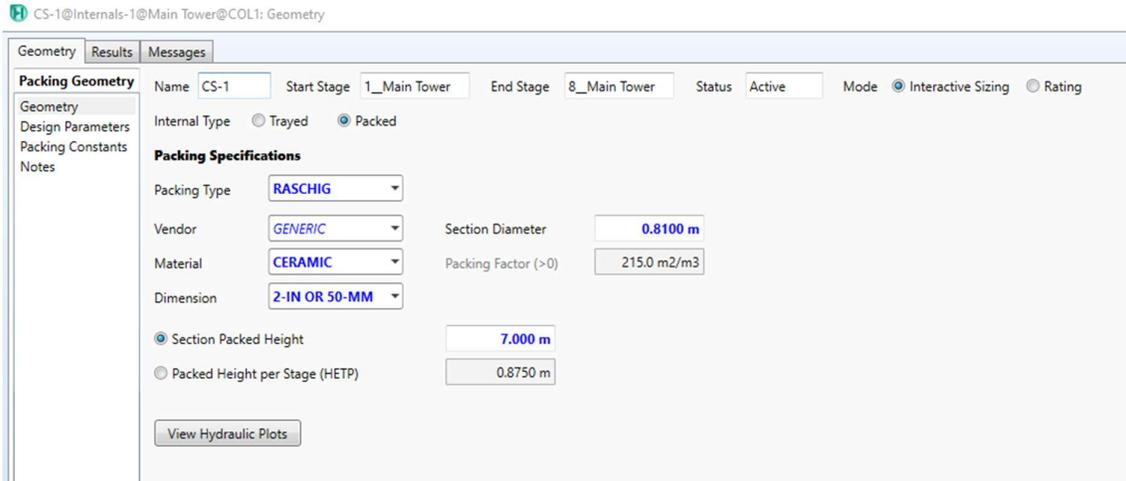


Figure 3-12: Choix et caractéristiques du garnissage

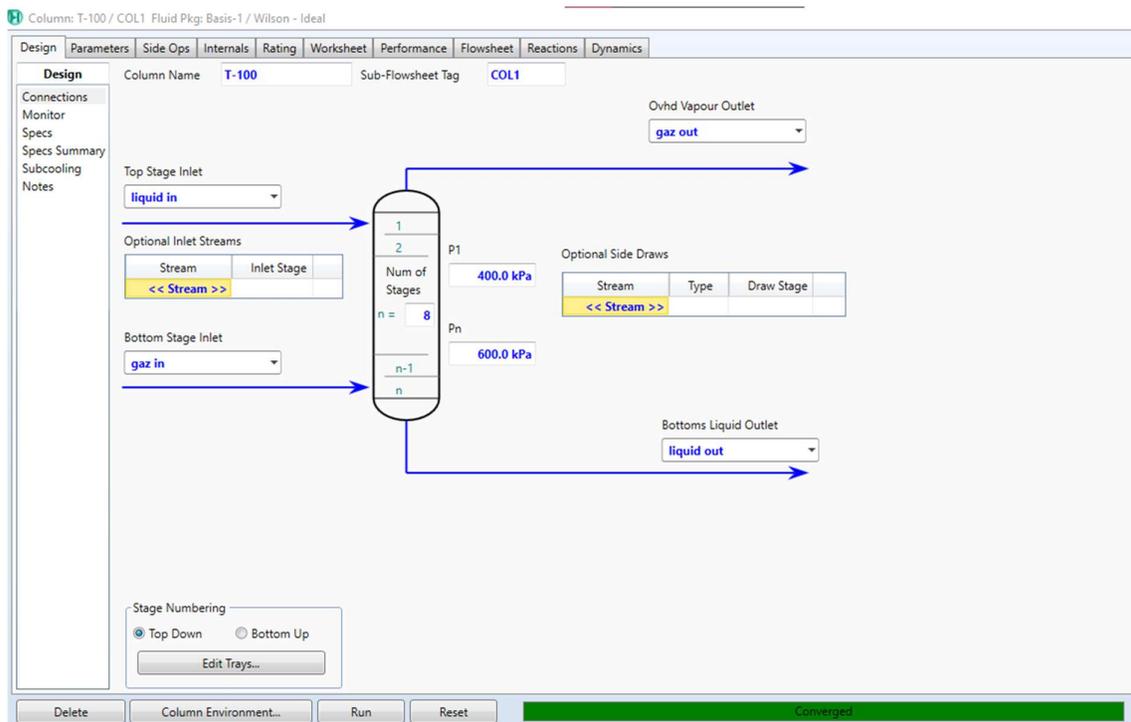


Figure 3-13: Design final de la colonne

3.1.4.5. Schéma final du procédé :

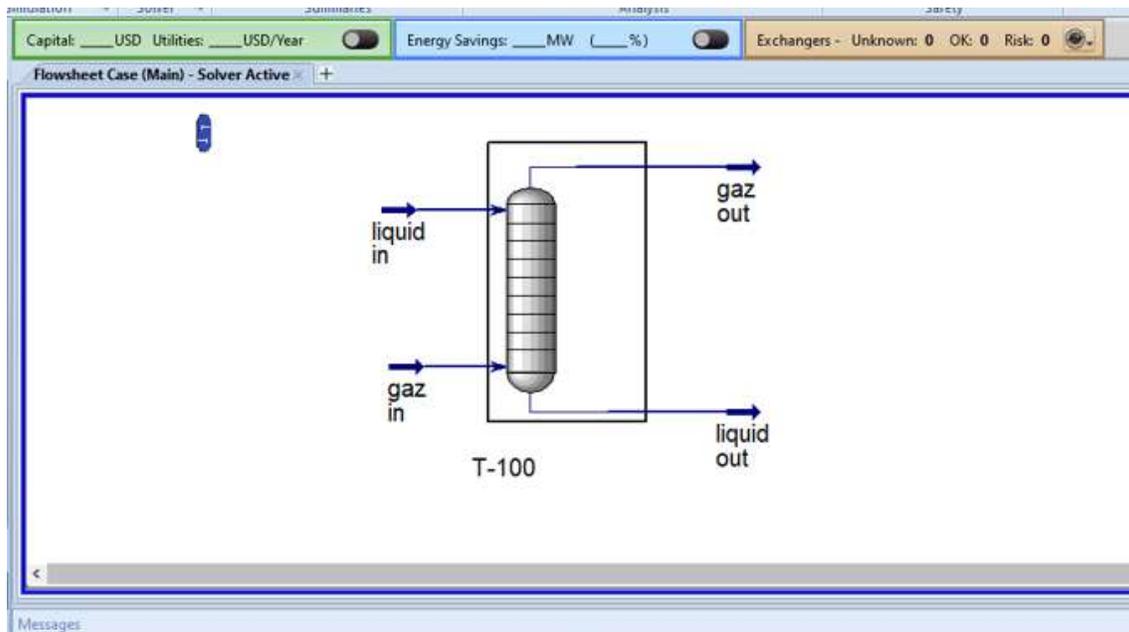


Figure 3-14: Schéma final de la colonne d'absorption.

3.1.4.6. Résultats obtenus après simulation :

a- En fractions molaires :

	liquid in	gaz in	gaz out	liquid out	
Conditions	HF	0.0000	0.0007	0.0000	0.0014
Properties	Air	0.0000	0.9993	0.9931	0.0010
Compositions	H2O	1.0000	0.0000	- 0.0069	0.9976
PF Specs					

Figure 3-15: Composition dans toutes les phases.

On constate que la quantité d'HF présente totalement en entrée dans la phase gazeuse (Gaz in) $y_e = 0.0007$ a été totalement éliminée dans la sortie en phase gazeuse (Gaz out) $y_s = 0.00$.

Toute la quantité d'HF a été absorbée en sortie dans la phase liquide (Liquid out) $x_s = 0.0014$.

b- En débits massiques :

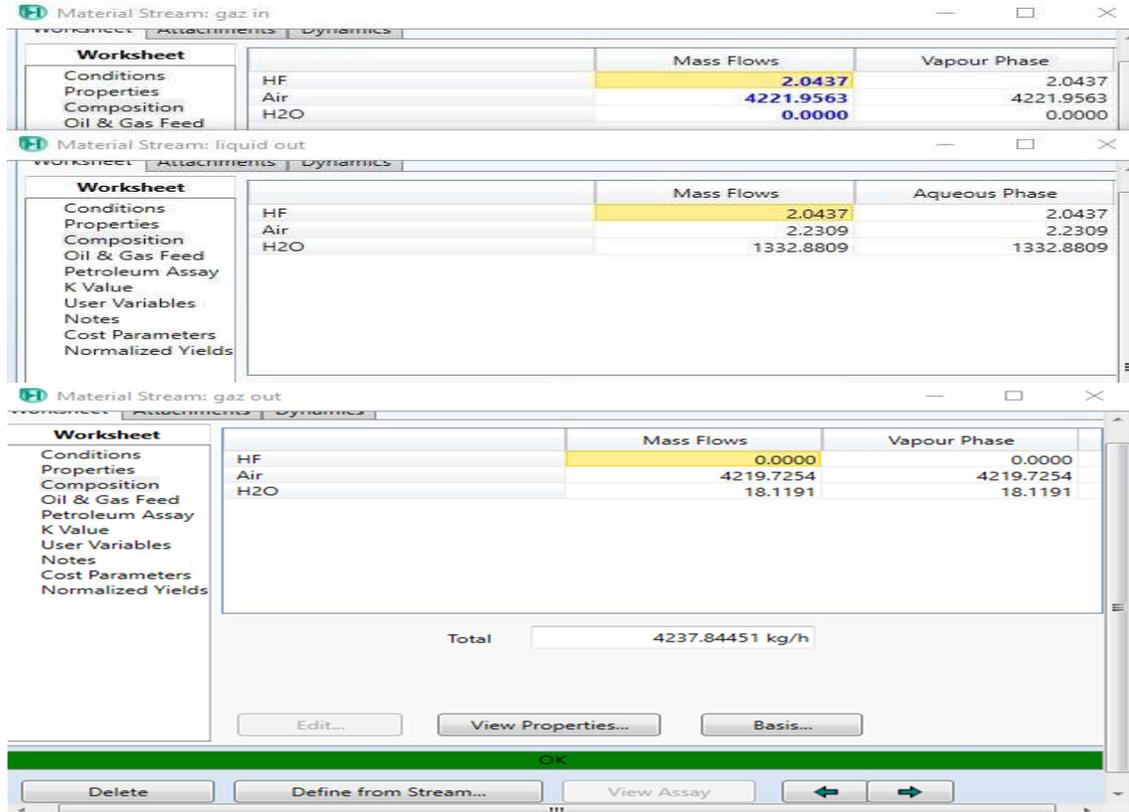


Figure 3-16: Comparaison des débits massiques dans toutes les phases.

Nous remarquons que le débit massique introduit en entrée du gaz a été transféré par absorption dans sa totalité vers la phase liquide.

Les paramètres de sortie sont divisés en deux :

- Un gaz épuré contenant uniquement de l'air et de la vapeur d'eau.
- Une eau usée contenant de l'acide fluorhydrique.

3.2. Description du procédé proposé pour l'entreprise ALGESCO :

Gaz à traiter :

Débit : 3520 m³/h

Température : 25 °C

Composition : Gaz avec HCl, HF et poussières

Source de pollution : Bac de décapage chimique

Méthode de lavage des gaz :

Colonne à garnissage avec un lavage à eau + soude caustique pour neutralisation des gaz acides

Description technique de l'appareil :

- Hauteur de la colonne $Z = 7 \text{ m}$
- Diamètre de la colonne $d = 0.81 \text{ m}$
- Débit du liquide 1351 l.h⁻¹

- Diamètre des anneaux Raschig $d = 2 \text{ pouces}$
- Vitesse d'engorgement de gaz $U_G = 1.846 \text{ m.s}^{-1}$
- Perte de charge 1962 Pa

- **Description du procédé proposé :**

Le procédé est composé d'un capteur de vapeur acide en résine relié à une gaine en polypropylène de diamètre 300 mm équipé d'un extracteur de gaz d'une puissance de 3.4 kw. Les gaz aspirés seront traités dans une colonne d'absorption à contre-courant remplie d'anneaux Raschig, cette colonne à une hauteur égalant $Z = 7 \text{ metres}$ et un diamètre $d = 0.81 \text{ metres}$. La colonne est alimentée par l'eau avec un débit $L = 1351 \text{ kg.h}^{-1}$.

Le gaz sera lavé par l'eau et évacué à travers une cheminée, tandis que l'eau chargée en acide sera neutralisée par la soude caustique à 30% dans un bac à l'aide d'une pompe doseuse équipée d'un régulateur de pH.

Ci-dessous, un schéma représentatif du procédé proposé :

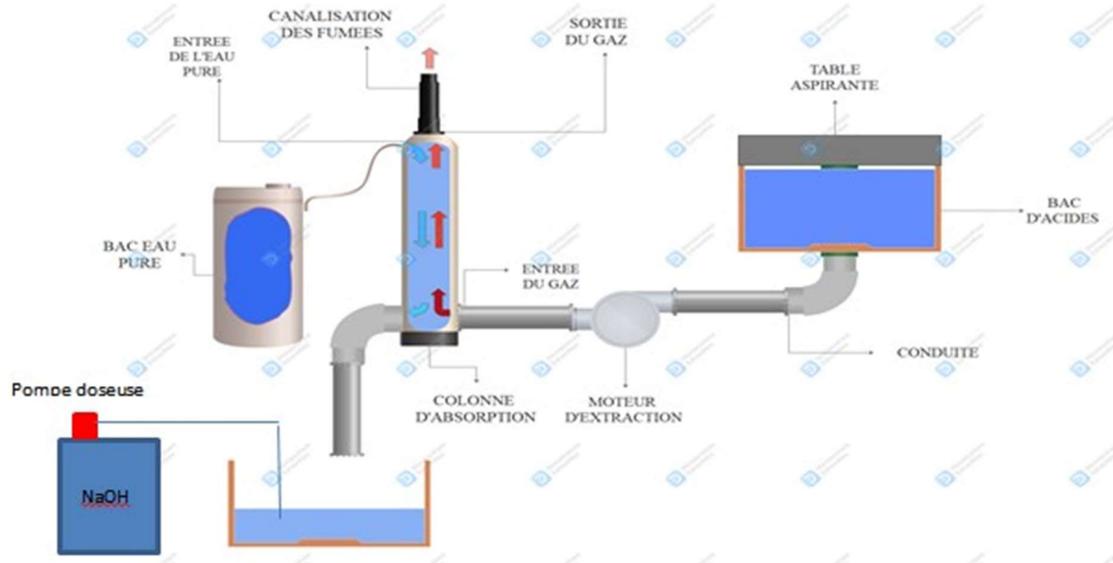


Figure 3-17: Schéma représentatif du procédé proposé.

Conclusion générale

L'objet de notre étude est le rejet de vapeurs acides émanant des bacs acides dans la station de décapage chimique d'ALGESCO. A travers nos recherches, nous avons constaté un manque de données en ce qui concerne les différents acides présents dans la station, nous nous sommes donc intéressés uniquement à l'acide fluorhydrique.

Notre travail était de canaliser ces vapeurs d'acide fluorhydrique (HF) et de les traiter. Nous avons alors proposé un traitement des vapeurs par lavage à l'eau dans une colonne d'absorption à garnissage en considérant des concentrations 100 fois supérieures à la norme, l'étude peut être résumée en 3 parties :

- 1- Nous avons proposé un système d'aspiration et d'extraction des gaz à l'aide d'une hotte placée au-dessus du bac contenant l'acide, les gaz sont transportés à travers une conduite grâce à un moteur d'une puissance $P = 3.4 \text{ kW}$.
- 2- Les gaz entrent par le bas dans la colonne d'absorption à contre-courant avec un débit calculé $G = 4224 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Les calculs précédents nous ont permis d'avoir une hauteur de colonne $Z = 7 \text{ m}$ et un diamètre $d = 0.81 \text{ m}$.
- 3- Enfin, le gaz contenant l'acide est lavé par l'eau avec un débit $L = 1351 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ et éjecté par le haut de la colonne tandis que le liquide chargé en acide est traité par de la soude à 30% à l'aide d'une pompe doseuse.

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que le diamètre calculé de la colonne est acceptable et satisfait aux exigences de fabrication et que la hauteur calculée de la colonne est également admissible et réponds aux normes internationales.

Dans le but de confirmer notre calcul théorique, nous avons utilisé ASPEN HYSYS V10 afin de simuler notre processus avec les paramètres précédemment calculés. Nous avons vu qu'il est possible d'éliminer la totalité de du gaz acide présent dans la colonne.

Nous concluons que notre étude théorique concorde avec la simulation, cependant afin d'accélérer l'élimination de l'acide et de réduire la hauteur de la colonne nous recommandons de procéder à un transfert de matière avec réaction chimique en ajoutant de la soude. Il est recommandé aussi de tester l'efficacité de ce procédé pratiquement sur les différents rejets acides.

Références bibliographiques :

- [1] **Prat, L.** Qualité de l'air intérieur des locaux de travail et autres lieux de vie : cadre réglementaire national. Technique de l'ingénieur, 2012.
- [2] **Bailly, A. Clerc-Renaud, M. Rutman, E. Ternant, C.** Traitement de l'air et climatisation – Généralités. Technique de l'ingénieur, 2001.
- [3] Principes généraux de ventilation [en ligne]. [Consulté le 15/06/2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20695>.
- [4] **Bouscaren, R.** Emissions diffuses et fugitives – Définitions et principes de quantification – [en ligne]. [Consulté le 02/06/2021]. Disponible à l'adresse : <http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=3384>.
- [5] **Biccochi, S. Boulinguez, M. Diard, K.** Les polluants et les techniques d'épuration des fumées, p. 34, Tec et Doc, 2009.
- [6] **Morisseau, Kevin.** Traitement combiné de polluants atmosphériques par filtration et adsorption pour limiter leur transfert dans l'habitat urbain. Ecole des Mines de Nantes, 2016.
- [7] **Cloirec, Le.** Introduction aux traitements de l'air. Technique de l'ingénieur, 2008.
- [8] **Bailly, A. Clerc-Renaud, M. Rutman, E. Ternant, C.** Traitement de l'air et climatisation – Généralités. Technique de l'ingénieur, 2001.
- [9] **Moletta-Denat, M.** Les aérosols microbiens dans l'air du temps : le point sur la microbiologie de l'air intérieur. Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [10] **Loaec, K.** Rapport d'étude d'état des lieux des systèmes et formules de gestion et traitement de l'air dans les bâtiments, 2013.
- [11] **Fanger, P.O. Lauridsen, J. Bluysen, P. Clausen, G.** Air pollution sources in offices and assembly hall, quantified by the olf unit, 1988.
- [12] **Riberon, J.** Guide méthodologique pour la mesure de la perméabilité à l'air des enveloppes de bâtiments, CSTB, 1991.
- [13] **Dhalluin, A.** Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire. Université de la Rochelle.
- [14] **Fenske, J.D. Paulson, S.E.** Human breath emissions of VOCs. Journal Air Waste Manag, 1999.
- [15] **Koffi, J.** Analyse multicritères des stratégies de ventilation en maisons individuelles. Université de La Rochelle, 2009.
- [16] **Roustan, M.** Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux. Tec & Doc, Paris, 2003.

- [17] **Treybal, R.E.** Mass Transfer Operations, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [18] **Danckwerts, P.V.** Gas-liquid reactions, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [19] **Kirschbaum, E.** Distillation and rectification. Chemical Publishing Co, New York, 1948.
- [20] **Cassinelli, M.E.** Laboratory Evaluation of Silica Gel Sorbent Tubes for Sampling Hydrogen. American Industrial Hygiene Association, 219-224, 1986.
- [21] **Hemeon, W.C.L.** Plant and process ventilation, Industrial Press, New York, 1963.
- [22] **ACGIH, Lansing.** Industrial ventilation a manual of recommended practice, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2004.
- [23] ANSI, Norme. Fundamentals governing the design and operation of local exhaust systems. American National Standard Industrie, New York, 1979.
- [24] INRS, Principes généraux de ventilation, 2015.
- [25] Choisir le ventilateur [en ligne]. [Consulté le 10/06/2021]. Disponible à l'adresse : <https://energieplus-lesite.be/concevoir/ventilation/choisir-les-composants/choisir-le-ventilateur/>.
- [26] Calcul moteur de ventilateur [en ligne]. [Consulté le 12/06/2021]. Disponible à l'adresse : http://thermexcel.com/french/ressourc/dimensionnement_ventilateur_pression.htm.
- [27] **Trambouze, P. Landeghem, H.V. Wauquier, J.P.** Les réacteurs chimiques, conception, calcul mise en œuvre. Technip, Paris, 298-308, 1984.
- [28] **Alsyouri, H.** Introduction to Design of Packed Columns, Heat and Mass Transfer Operations [en ligne]. [Consulté le 28/05/2021]. Disponible à l'adresse : <http://fr.slideshare.net/alsyouri/design-of-packed-columns>.
- [29] **Laurence, G.** Problèmes résolus de génie chimique. Eyrolles, Paris, 264-275, 1975.
- [30] **Kossatz, A. Paul, Munter, A, Otto.** Industrial & Engineering Chemistry. American Chemical Society, 1949.
- [31] **Perry, R.H. Chilton, C.H. Kirkpatrick, S.D.** Chemical Engineers' Handbook. 4th ed McGraw-Hill, New York, 1963.
- [32] **Pigford, T.K. Sherwood,** Absorption and Extraction. McGraw-Hill, New York, 1952.
- [33] **Eckert, J.S.** Design techniques for sizing packed towers. American Chemical Society, 54-58, 1961.
- [34] **Wuithier, P.** Pétrole, raffinage et génie chimique. Technip, Paris, 1968.

[35] **Lair, F. Rousseau.** Travaux pratiques de génie chimique opérations unitaires, réacteurs et simulation. Ecole Nationale Supérieure de Chimie, Paris, 19-29, 2012.

[36] **Morvan, D.** Les opérations unitaires : procédés industriels. Ellipses, Paris, 2009.

[37] **Lefrançois, B.** Chimie industrielle, Cours et problèmes résolus. Tec & Doc, 223-230, 1995.

[38] Technology, Aspen. Aspen HYSYS Tutorial And Applications [en ligne]. [Consulté le 30/06/2021]. Disponible à l'adresse :

<https://sites.ualberta.ca/CMENG/che312/F06ChE416/HsysDocs/AspenHYSYSTutorialsandApplications.pdf>.

[39] Fluorure d'hydrogène [en ligne]. [Consulté le 07/07/2021]. Disponible à l'adresse :

https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=570&no_seq=1&t=7664-39-3.

Annexe

Annexe 1 : NIOSH 7903 Acids, Inorganic

Les gaz/vapeurs acides et les aérosols sont très corrosifs et peuvent irriter les yeux et les muqueuses du nez, du pharynx et des voies respiratoires, même à de faibles concentrations dans l'air. L'acide fluorhydrique (HF), l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide nitrique (HNO₃), l'acide bromhydrique (HBr), l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide phosphorique (H₃PO₄) sont largement utilisés dans les procédés industriels tels que l'extraction de minerai, le traitement des métaux, le décapage, galvanoplastie et d'autres procédés chimiques.

Il est courant que plusieurs de ces acides soient se présents simultanément dans l'air en milieu de travail. Les limites d'exposition professionnelle (VLEP) applicables à ces substances dans l'air se situent généralement entre 0,1 et 10 mg/m³ pour les divers acides.

L'état physique des différents acides dans l'atmosphère des lieux de travail varie des aérosols liquides (brouillards) pour les acides non volatils comme le H₂SO₄ aux gaz/vapeurs pour les acides volatils tels que le HCl ou le HNO₃. Les procédures d'échantillonnage et d'analyse des acides inorganiques dans l'air des lieux de travail doivent tenir compte de l'état physique du ou des analytes cibles. Par conséquent, de nouvelles méthodes NIOSH pour l'échantillonnage et l'analyse des acides inorganiques dans l'atmosphère des lieux de travail ont été promulguées.

Cette méthode mesure la concentration totale des six acides cités précédemment. Les acides correspondants peuvent être collecté avec un seul échantillonneur ou bien déterminé simultanément.