

www.ineris.fr/badoris

www.ineris.fr/badoris www.ineris.fr/badoris www.ineris.fr/badoris

www.ineris.fr/badoris



Base de données sur les Barrières Techniques de Sécurité

BADORIS – Document de synthèse relatif à une
Barrière Technique de Sécurité (B.T.S.)

Colonne d'abattage à garnissage

Décembre 2004



*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

TABLE DES MATIERES

1. PRESENTATION TECHNIQUE DU DISPOSITIF.....	2
1.1 Le phénomène d'absorption	2
1.2 But et performances des absorbeurs	2
1.3 Les types d'absorbeurs.....	2
2. LES COLONNES À GARNISSAGE.....	3
2.1 Description et principe de fonctionnement	3
2.2 Caractéristiques de fonctionnement	4
2.3 Domaine d'application.....	4
2.4 Description des différents types de colonnes.....	5
2.5 Eléments internes d'une colonne à garnissage.....	8
2.6 Limites de fonctionnement des colonnes à garnissage	11
2.7 Domaine d'application	13
2.8 Avantages et inconvénients des colonnes à garnissage	13
2.9 Constructeurs- Fournisseurs.....	13
3. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	15

1. PRESENTATION TECHNIQUE DU DISPOSITIF

1.1 LE PHENOMENE D'ABSORPTION

L'absorption est une opération unitaire de génie des procédés caractérisée par des transferts de matière d'une phase à une autre. Parfois ces transferts de matière sont accompagnés de transfert de chaleur. L'absorption met en jeu des échanges de matière entre une phase gazeuse et une phase liquide de natures chimiques différentes. Un ou plusieurs constituants de la phase gazeuse passent en solution. Cette opération est principalement utilisée pour purifier un flux gazeux ou pour récupérer un constituant présent dans un mélange gazeux.

L'absorption est uniquement physique lorsque le soluté ne réagit pas avec au moins un des constituants de la phase liquide.

1.2 BUT ET PERFORMANCES DES ABSORBEURS

Les absorbeurs ont tous pour but de réaliser le meilleur échange de matière entre une phase liquide et une phase gaz en contact. Ils doivent donc être équipés de dispositifs internes qui, d'une part, favorisent la dispersion de la phase gaz dans la phase liquide et plus particulièrement provoquent la plus grande surface d'aire interfaciale, et d'autre part, permettent la séparation de la phase gaz et de la phase vapeur en contact afin d'en faciliter l'écoulement global.

Les performances globales de l'absorbeur, rendement et sélectivité, dépendent des phénomènes mis en jeu, à savoir :

- les équilibres thermodynamiques à l'interface (solubilités) ;
- les lois de transport dans les phases (diffusivités) ;
- les lois de transfert au voisinage des interfaces (coefficients de transfert, aires interfaciales) ;
- les cinétiques des réactions chimiques (schémas réactionnels, constantes cinétiques, ordres de réactions).

1.3 LES TYPES D'ABSORBEURS

Selon le système considéré, notamment en fonction des vitesses caractéristiques de transfert, de transport ou de réaction, l'absorbeur devra être choisi soit en fonction de ses performances du point de vue transfert de matière soit en fonction du volume de liquide mis en jeu. En conséquence, les absorbeurs utilisés dans l'industrie ont des formes très diverses :

- réacteurs tubulaires à bulles, à gouttes, à film tombant, à garnissage, à plateaux ;
- réacteurs à cuve agitée mécaniquement ;
- réacteurs du type jets ou venturis.

Tous ces absorbeurs sont décrits dans le rapport [6]. Les éléments indiqués dans cette fiche traitant des colonnes à garnissage sont extraits de ce document.

2. LES COLONNES A GARNISSAGE

2.1 DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une colonne à garnissage est une colonne qui est remplie d'éléments permettant d'augmenter la surface de contact entre la phase gazeuse et la phase liquide. Ce sont ces éléments qui constituent le garnissage. La colonne contient également :

- dans sa partie inférieure, un plateau pour supporter le garnissage et un injecteur de gaz ;
- dans sa partie supérieure, un distributeur de liquide et parfois un dévésiculateur ;
- parfois un redistributeur.

En considérant la façon d'alimenter la colonne en gaz et en liquide, on peut distinguer trois types de colonnes :

- à co-courant ;
- à flux croisé.

Dans les colonnes à garnissage, le liquide est pulvérisé sur le garnissage placé entre des grilles. La phase liquide qui contient l'absorbant, forme un film sur les éléments de garnissage (zone de mouillage). Le garnissage qui crée une série d'obstacles sur le parcours du liquide et du gaz au sein de la colonne permet :

- d'augmenter la surface de contact entre les deux phases ;
- d'augmenter le temps de séjour des deux phases dans la colonne et donc leur durée de contact ;
- de créer un régime turbulent de la phase gaz.

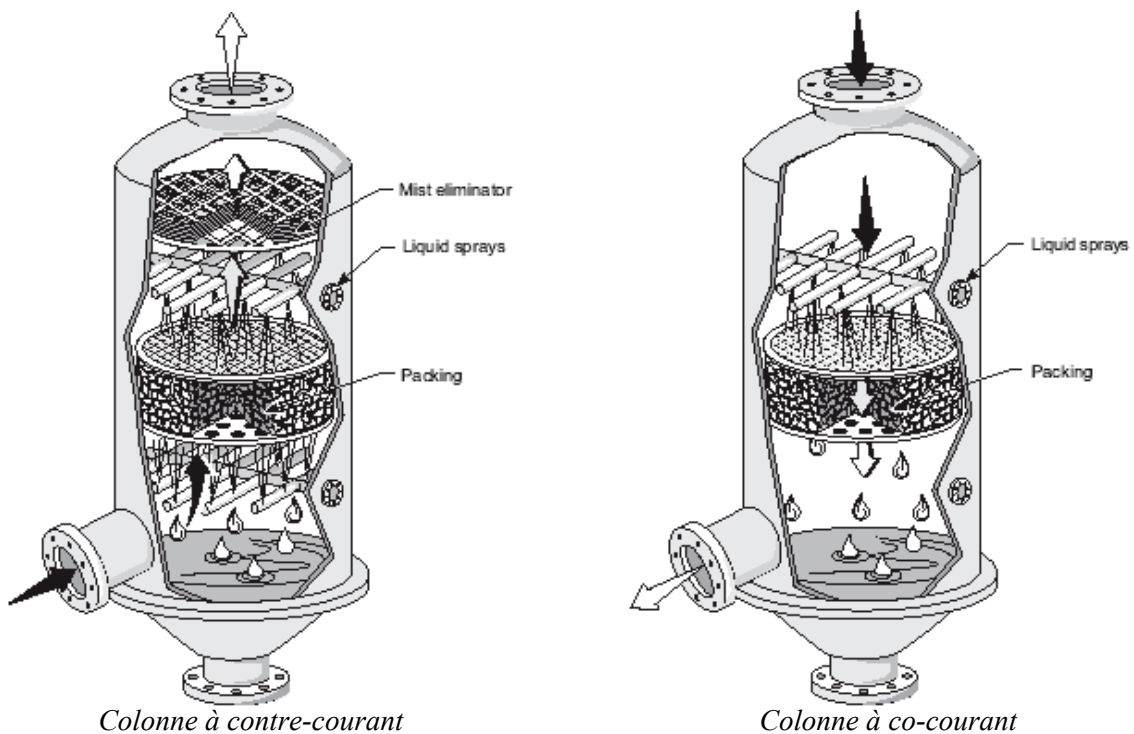


Figure 1 : Différents arrangements de distribution des phases dans les colonnes à garnissage - Source : Chemical Engineer's Resource

2.2 CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Les colonnes garnies peuvent avoir une grande efficacité. L'efficacité pour une colonne donnée, dépend d'un grand nombre de facteurs, à savoir :

- la vitesse du gaz ;
- la solubilité du polluant dans la solution ;
- la concentration de l'absorbant dans la solution ;
- la réactivité éventuelle du gaz avec les constituants du liquide ;
- la diffusivité du polluant dans la phase gazeuse et de l'absorbant dans la phase liquide ;
- la teneur en polluant de la phase gazeuse ;
- la hauteur de la colonne.

Un des paramètres très important pour le dimensionnement des colonnes à garnissage est la perte de charge, car c'est elle qui limite le débit de gaz introduit dans la colonne.

La perte de charge est proportionnelle :

- au carré de la vitesse de propagation du gaz au sein de la colonne ;
- à la masse volumique du gaz.

Elle augmente également avec le débit du liquide.

2.3 DOMAINE D'APPLICATION

Les colonnes à garnissage sont généralement utilisées pour l'absorption de gaz et de substances corrosives.

Si le barbotage de la phase gaz dans le liquide provoque son moussage, il est préférable de choisir une colonne du type à garnissage.

Il est préférable également d'utiliser une colonne à garnissage pour :

- les opérations discontinues car la rétention du liquide dans ce type de colonne est faible.
- les transferts de matière limités par la phase gazeuse.

Les colonnes garnies ne sont pas utilisées pour la séparation des particules solides, car celles-ci peuvent rester bloquer sur le garnissage et empêcher le passage des phases (cause d'engorgement).

2.4 DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE COLONNES

2.4.1 Colonnes à contre-courant

Les colonnes à contre-courant sont les plus utilisées.

➤ Principe de fonctionnement

Le gaz à traiter entre par le bas de la colonne, traverse le garnissage et sort en tête de colonne. La phase gaz passant par la colonne garnie est forcée, en raison de la présence du garnissage, de changer souvent de direction d'écoulement. Ceci permet de bien mélanger les deux phases. Ce type d'écoulement est celui qui présente l'efficacité théorique la plus importante.

➤ Avantages et inconvénients

Contrairement aux deux autres types de colonne à garnissage (co-courant et courants croisés), la concentration de polluant dans l'absorbant ne peut pas devenir la même que dans le gaz.

Les colonnes à contre-courant ne sont pas adaptées aux procédés au cours desquels les variations des débits de liquide et de gaz sont grandes.

Il peut se produire un engorgement si le débit du liquide ou celui du gaz est trop important¹.

2.4.2 Colonnes à co-courant

➤ Principe de fonctionnement

Les deux phases sont introduites en tête de colonne et descendent ensemble, en passant par le garnissage, vers la base de l'absorbant. Cet arrangement permet à la colonne de fonctionner avec des débits plus grands, car dans cette configuration les problèmes liés à l'engorgement n'existent plus.

➤ Domaine d'application

Pour les mêmes débits de gaz et de liquide, le diamètre d'une colonne à co-courant est plus petit que celui d'une colonne à contre-courant. Ce type de colonne est souvent utilisé dans les installations industrielles ayant peu d'espaces disponibles.

➤ Avantages et inconvénients

Les pertes de charge sont plus petites car les deux phases s'écoulent dans la même direction.

L'inconvénient de ce type de colonne est que son efficacité est relativement faible. Elle est en effet limitée par la diminution de la force motrice du gaz et du liquide au fur et à mesure que les deux flux (liquide et gaz) descendent dans la colonne.

¹ l'engorgement est traité dans le paragraphe 4.8.7.1

2.4.3 Colonnes à courants croisés

➤ Principe de fonctionnement

Ces colonnes sont horizontales. Le gaz est introduit à une extrémité et le liquide est introduit perpendiculairement au gaz par la partie supérieure de la colonne. Le lit garni est mouillé par ce liquide.

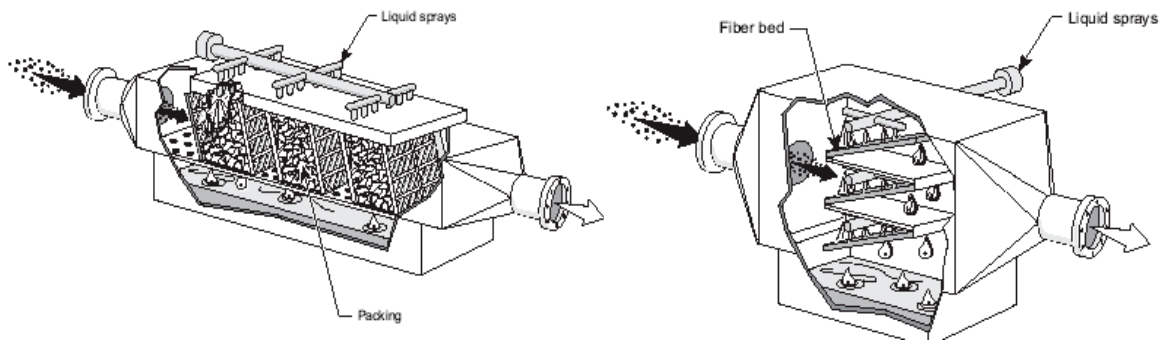
Parfois, du liquide peut être introduit par la même extrémité que le gaz, par un dispositif spécifique (injecteur) pour améliorer le taux de mouillage du lit.

Comme le montre le schéma ci-dessous, la section frontale du garnissage est inclinée par rapport à la direction du courant du gaz. L'inclinaison permet au liquide de descendre en bas de la colonne avant que le gaz ne le renvoie vers le haut (entraînement) et ceci permet d'optimiser la surface du garnissage mouillée et par conséquent la surface effective d'absorption.

- Exemple d'application – traitement des fumées.

Si le liquide contient des particules solides, on peut construire des colonnes avec plusieurs sections (lits), par exemple à flux croisé avec trois lits. La première partie frontale peut être munie de verseurs d'eau pour séparer les particules, la deuxième peut être mouillée par le liquide contenant les réactifs pour absorber le gaz, la troisième section peut rester sèche : ce lit joue alors le rôle de dévésiculateur.

Ces colonnes peuvent être également remplies d'un lit fibreux. Ce lit peut être composé de fibre de verre ou de plastique.



Colonne à trois lits à flux croisé

Colonne à lit fibreux

Figure 2 : Colonnes à garnissage à flux croisé

➤ Avantages et inconvénients

Les absorbeurs à flux croisé sont plus petits et les pertes de charge sont moins importantes que pour les autres types de colonnes (garnies à co-courant ou à contre-courant, colonnes à plateaux) pour la même application : même efficacité d'absorption et mêmes débits des flux.

Ils sont mieux adaptés pour absorber les gaz qui contiennent des particules solides. Pour un certain débit de liquide, les particules peuvent être séparées en première partie frontale de garnissage. Cela permet de réduire le volume du liquide utilisé.

Le principal inconvénient est la présence permanente du problème d'entraînement du liquide par le gaz.

Pour les débits importants de gaz, le liquide peut être renvoyé vers le haut de la colonne, les résultats de ce phénomène sont les suivants :

- la partie basse de la colonne n'est plus mouillée correctement ;
- la partie haute est remplie de liquide, le passage du gaz est donc difficile ;
- une grande quantité de liquide descend en fin de colonne et produit l'engorgement ;
- une grande diminution de l'efficacité de la colonne.

Les colonnes à garnissage à flux croisé sont difficiles à dimensionner ; elles exigent une procédure complexe, car le gradient de concentration existe dans deux directions : du haut vers le bas et d'une extrémité à une autre (entrée gaz – sortie gaz).

2.5 ELEMENTS INTERNES D'UNE COLONNE A GARNISSAGE

2.5.1 Distributeurs de liquide

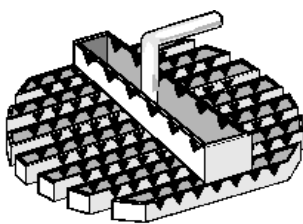
L'efficacité d'une colonne à garnissage dépend de la surface et du temps de contact entre les deux phases gaz et liquide. Ces phases doivent être mises en contact de façon homogène sur toute la longueur de la colonne. Le garnissage en vrac est capable de redistribuer le liquide qui est versé dans un point au-dessus de la colonne, mais parfois, le garnissage n'est pas complètement mouillé. Pour augmenter ce taux de mouillage, le liquide est, en général, réparti dans toute la section transversale de l'entrée de la colonne à l'aide d'un distributeur.

Pour évaluer la performance d'un distributeur il faut considérer :

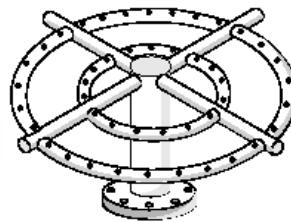
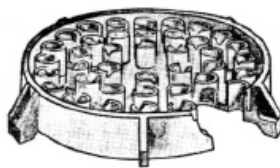
- l'uniformité géométrique de placement de chaque point de distribution sur la grille distributrice ;
- l'uniformité de débit du liquide sur chaque mètre carré de la section transversale du garnissage en haut de la colonne ;
- le nombre de points d'alimentation par mètre carré de section droite ;
- le rapport de la surface mouillée sur la surface sèche.

En général, on a deux types de distributeurs en fonction du mode de distribution :

- par gravité :
 - distributeur à auges,
 - déversoir à cheminées,
 - déversoir à trous,
- à pression :
 - distributeur à barillets perforés,
 - distributeur à pulvérisation.



Distributeurs de liquide à gravité



Distributeurs du liquide à pression

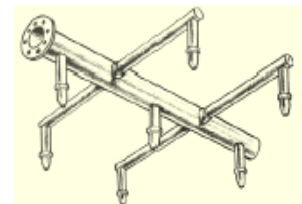


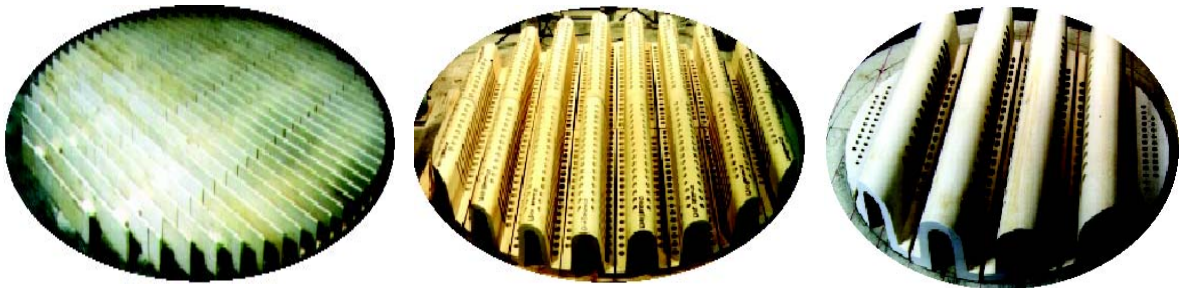
Figure 3 : Distributeurs de liquide

2.5.2 Grille de support du garnissage et de distribution de la phase gazeuse

La grille de support du garnissage doit tout d'abord être capable de supporter la masse du garnissage et la masse du liquide liée au garnissage (rétention du liquide). Pour dimensionner la grille de support, on ne tient pas compte :

- des pertes de charge dues à la poussée du gaz vers le haut de la colonne (cette poussée soulève un peu le garnissage et réduit de ce fait légèrement la force que celui-ci applique sur le support) ;
- du fait que le garnissage soit légèrement soutenu par les parois de la colonne.

D'autre part, la grille de support ne doit pas générer une perte de charge linéique supérieur à celle du garnissage, sinon les débits de gaz et de liquide au maximum acceptables seraient moindre.



a - supporteur grid,

b,c- supporteurs multi-beam

Figure 4 : Supporteurs de garnissage

2.5.3 Dévésiculeur

Placé en haut de colonne, il permet d'arrêter les gouttes de liquide entraînées par le gaz sortant de l'absorbeur. En absence de dévésiculeur, le liquide sortant de la colonne sous forme d'aérosol peut se condenser dans les autres parties de l'installation et produire des dommages (corrosion) aux équipements. Le dévésiculeur est généralement tissé en métal ou en plastique de 100 à 150 mm d'épaisseur et est placé sur une grille au-dessus du lit de garnissage dont la différence de hauteur est égale au diamètre de la colonne.

2.5.4 Autres équipements de la colonne

- Redistributeurs de liquide

Un redistributeur est un dispositif qui a comme fonction de collecter et de redistribuer le liquide s'écoulant au sein de la colonne. Il est employé dans les colonnes ayant une hauteur importante pour éviter la canalisation du liquide. Il est justifié d'utiliser des redistributeurs si l'écart entre deux redistributeurs ou un redistributeur et un distributeur est supérieur à une hauteur égale à trois diamètres de la colonne.

- Limiteurs de garnissage

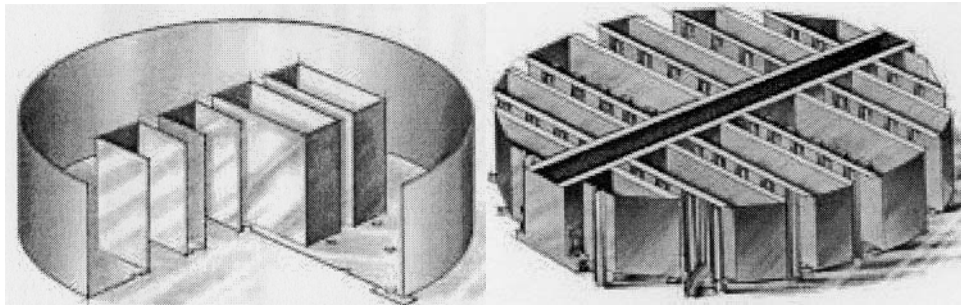
Il consiste en une grille de métal placée au dessus du garnissage.

Des grilles de calage sont utilisées pour empêcher les éléments de garnissage d'être soulevés et déplacés sous l'effet d'une brusque poussée de la phase gaz du bas vers le haut.

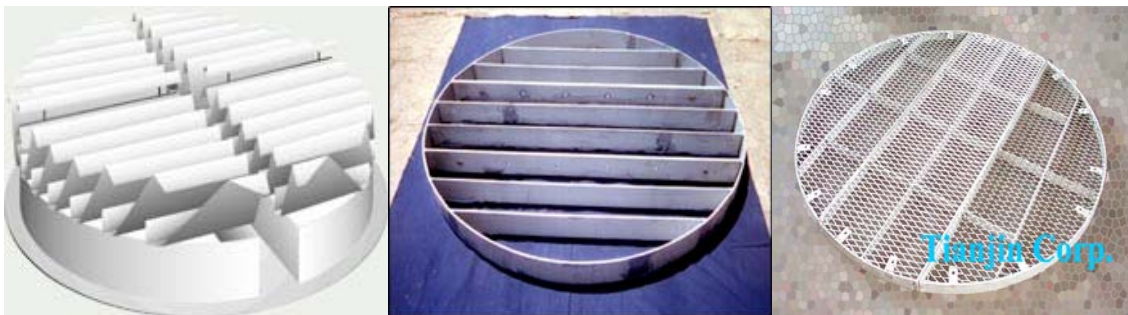
Il est surtout utilisé lorsque l'on travaille à des forts débits de gaz et avec des garnissages légers (plastiques).

- Collecteurs de liquide

C'est un dispositif servant à collecter le liquide s'écoulant au sein de la colonne s'il y a nécessité de redistribution du liquide dans la colonne, par exemple à cause de l'utilisation de deux lits ou d'une augmentation de température significative. Le liquide, qui s'écoule sur le lit qui est placé en partie haute de la colonne, doit être collecté et versé à l'extérieur de la colonne.



redistributeurs de liquide



collecteur de liquide

limiteurs de garnissage

Figure 5 : Autres équipements intérieurs d'une colonne

2.6 LIMITES DE FONCTIONNEMENT DES COLONNES A GARNISSAGE

2.6.1 L'engorgement

Les colonnes à garnissage sont sensibles aux variations des débits de gaz et de liquide. La perte de pression augmente rapidement pour une faible augmentation du débit de gaz.

L'engorgement détermine les débits de gaz et de liquide maximums admissibles à la colonne et donne le point d'instabilité en fonctionnement des colonnes à garnissage.

Le phénomène d'entraînement est un facteur important pour déterminer les limites d'engorgement d'une colonne. Ce phénomène se déroule de la façon suivante : une partie du liquide pulvérisé dans la colonne ne s'accroche pas au garnissage, forme des gouttelettes et est entraîné par le gaz en tête de colonne. Le dévésiculeur permet de retenir ces gouttelettes au sein de la colonne. Cependant, ces gouttelettes qui retombent viennent s'ajouter au débit de liquide introduit dans la colonne.

De ce fait, pour dimensionner une colonne et pour éviter son engorgement, il est nécessaire de connaître les flux maximums de gaz et de liquide pouvant être introduits dans la colonne, en prenant une marge de sécurité. Différents auteurs proposent différentes marges de sécurité. Généralement, on dimensionne la colonne avec un garnissage classique à 65 – 75 %² de l'engorgement, avec un garnissage moderne jusqu'à 80 %³ et avec un garnissage structuré on peut arriver à 85 %³ de l'engorgement pour un fonctionnement normal.

L'engorgement est un point de fonctionnement de la colonne où la valeur de perte de pression linéique est égale à 15 mbar/m et pour laquelle on se place à 100 % de capacité de la colonne. Ces limites déterminent le diamètre de la colonne.

Les paramètres permettant de définir ce point de fonctionnement sont :

- les propriétés physiques des composés qui s'écoulent :
 - densité,
 - viscosité,
 - tension de surface.
- les propriétés du garnissage :
 - dimension (dimension nominale, surface vide),
 - propriété du matériau (porosité),
 - rétention du liquide,
 - positionnement du garnissage à l'intérieur de la colonne (angle de mouillage).

Pour un diamètre de colonne fixé, on peut déterminer le débit de gaz admissible en entrée de colonne. Et inversement, on peut déterminer le diamètre d'une colonne pour un débit de gaz donné.

La corrélation graphique GPDC, établie par Leva est présentée ci-après (figure 29).

Elle est utilisée pour dimensionner les colonnes garnies (garnissages en vrac).

² Techniques de l'Ingénieur conseillent de travailler entre 60 et 70 % d'engorgement pour un fonctionnement permanent de l'installation.

³Données d'un fournisseur : Koch - Glitsch

Sur le diagramme GPDC les courbes de perte de pression linéique ($\Delta P/Z$) sont tracées en fonction de deux paramètres :

- le facteur de capacité,
- le facteur de flux.

Le facteur de flux « X » est fonction des débits et des densités de gaz et de liquide.

Le facteur de capacité dépend des paramètres de garnissage et des propriétés du liquide.

Il est également important de signaler que la valeur de perte de pression de 15 mbar/m pour laquelle il y a engorgement est seulement une estimation, une valeur expérimentale. Pour certaines conditions et certains types de garnissage, on peut atteindre une valeur de perte de charge plus significative sans engorgement, mais on peut déjà observer ce phénomène pour une perte de pression au-dessous de 15 mbar/m (si un fort moussage se produit par exemple).

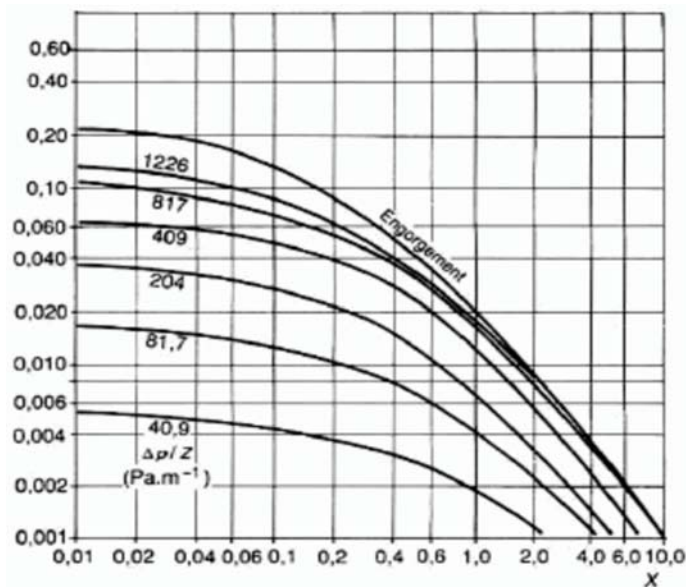


Figure 6 : Diagramme type GPDC pour l'engorgement.
Source : Perry's Chemical Engineers Handbook

2.6.2 Canalisation du liquide

Dans certains cas le liquide peut descendre par une surface relativement faible de la colonne sans mouillage de toute la surface de garnissage. Ce phénomène est appelé « liquid channeling », il peut se produire si :

- le débit du gaz est trop faible ;
- le distributeur du liquide ne répartit pas le liquide de façon homogène ;
- le garnissage est mal positionné dans la colonne.

Le liquide a tendance à s'approcher de la paroi de la colonne (les espaces vides sont plus importants qu'au centre de la colonne). Si le liquide touche la paroi, il ne rentre pas au sein du garnissage et il descend plus vite vers le bas de la colonne. Pour éviter ce phénomène, on peut utiliser les redistributeurs afin de renvoyer le liquide au centre de la colonne. Normalement, deux redistributeurs doivent être au minimum espacés d'une distance équivalente à 3 ou 5 fois le diamètre de la colonne.

2.7 DOMAINE D'APPLICATION

Les colonnes à garnissage sont utilisées pour des opérations :

- de distillation,
- d'absorption sans ou avec réaction chimique (vitesse de réaction moyenne ou très grande),
- de lavage des gaz.

2.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES COLONNES A GARNISSAGE

➤ Avantages

- Elles sont moins chères que les colonnes à plateaux, surtout si le diamètre de la colonne n'est pas trop grand.
- Elles sont bien adaptées pour fonctionner dans un environnement acide et corrosif ;
- Comme le liquide est peu agité, il est possible d'utiliser les absorbants qui ont tendance à mousser.
- Elles peuvent atteindre une grande efficacité d'absorption pour beaucoup de gaz.
- La faible rétention du liquide peut être aussi un avantage, principalement si l'absorbant est sensible à la température.

➤ Inconvénients :

- Les particules solides présentes dans la phase liquide ou gazeuse peuvent facilement bloquer l'écoulement des phases au niveau du garnissage.
- Si le débit du liquide pour une raison quelconque diminue, la surface de garnissage ne pourra pas être mouillée correctement et la surface effective de contact diminuera.
- Les colonnes de petit diamètre et de grande hauteur nécessitent l'installation de re-distributeurs de liquide.

2.9 CONSTRUCTEURS- FOURNISSEURS

2.9.1 De colonnes à garnissage

- CCM Sulzer (Cie de construction Mécanique)
- Norton SA.
- Rasching France.
- Raushert GmbH und Co KG, Paul, représenté en France par Provence Equipements Industriels.
- Tissmétal SA.
- VFF (Vereinigte Füllkörper Fabriken GmbH und Co) représenté en France par Ambinter.

2.9.2 De systèmes de traitement d'effluents gazeux contenant du chlore

tableau 1 : Constructeurs de systèmes de traitement d'effluents gazeux contenant du chlore

Nom du fabricant	Coordonnées
Cellchem AB	P.O.Box 11553 S-100 61 Stockholm, Sweden Street address : Sickla Industriväg 6 Nacka, Sweden ☎ : + 46 8 743 40 00 – Fax : + 46 8 641 11 90 http://www.cellchem.com/ e-mail : info@cellchem.ekachemicals.com
GEA Wiegand GmbH	Einsteinstraße 9-15 76275 Ettlingen . Germany ☎ : + 49 (0)7243/705-0 – Fax : + 49 (0)7243/705-330 http://www.gea-wiegand.de e-mail : info@gea-wiegand.de
Krebs Switzerland – NUKEM group	Claridenstrasse 20 – CH-8022 Zürich ☎ : 41 12867426 e-mail : krebscoag@access.ch
Krupp Uhde GmbH	Friedrich-Uhde-Strasse 15 D-44141 Dortmund - Germany ☎ : + 49-231 / 547-0 – Fax : + 49-231 / 547-30 32 http://www.thyssenkrupp.com/uhde/ e-mail : information@kud.thyssenkrupp.com
Kvaerner PLC	Kvaerner House, 68 Hammersmith Road London W14 8YW – England ☎ : 44 20 7339 1000 – Fax : 44 20 7339 1100 http://www.kvaerner.com/
Lurgi GmbH	Lurgi GmbH Process Technology, Engineering, Contracting Lurgi-Allee 5 – P.O. Box 11 12 31 D-60295 Frankfurt am Main – Germany ☎ : + 49 (69) 58 08-0 – Fax : + 49 (69) 58 08-38 88 http://www.lurgi.com e-mail : kommunikation@lurgi.de
Technip Germany GmbH	Theodorstrasse 90 D-40472 Düsseldorf – Germany ☎ : + 49 211 659-1 – Fax : +49 211 659 23 72 http://www.technip.com e-mail : technipnet@technip.com
Washington Group International (ex Raytheon Engineers and Constructors)	CI Tower St georges Square, High St New Malden KT3 4HH – United Kingdom ☎ : + 44 (20) 83 36 51 00 – Fax : +44 (20) 83 36 52 99 http://www.wgint.com

3. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Copigneaux P., Distillation.Absorption, Colonnes Garnies, Techniques de l'Ingénieur, J 2 626
- [2] A.D. Vidvans, M.M. Sharma, Gas-side mass transfer coefficient in packed columns, Chemical Engineering Science, Vol. 22 (1967) p. 673-684
- [3] R. Billet, M. Schultes, Predicting Mass Transfer in Packed Columns, Chemical Engineering Technology Vol. 16 (1993) p. 1-9
- [4] K. Bornhütter, A. Mersmann, Mass Transfer in Packed Columns : The Cylinder Model, Chemical Engineering Technology Vol. 16 (1993) p. 46-57
- [5] Equipement for the treatment of gazeous effluents containing chlorine, GEST 76/52, 10th Edition, Euro Chlor Publications, Dec. 2001
- [6] Etat de l'art sur les colonnes d'abattage – rapport intermédiaire d'opération – Programme DRA39 – Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risque sd'accidents majeurs - N. Ayrault, INERIS – MEDD – 2004.