

# Condensation

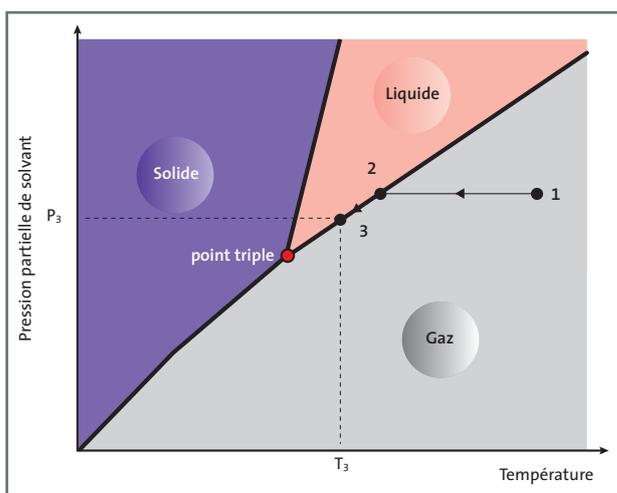
## 1. PRINCIPE

La condensation consiste à faire passer le polluant de la phase gazeuse à la phase liquide ou solide en abaissant la température, de façon à le séparer du gaz porteur (souvent l'air ou l'azote). Cette technique repose sur un principe simple qui découle de l'équilibre liquide et vapeur d'un mélange air/polluant (ou azote/polluant) : la pression saturante de vapeur de polluant à l'équilibre diminue quand la température baisse.

Un diagramme de phases (pression partielle/température) traduit l'équilibre thermodynamique entre les différentes formes solide, liquide ou gazeuse (voir schéma). Les points situés sur la courbe d'équilibre correspondent à la pression de saturation  $P_s$  observée pour chaque température. La concentration du polluant en phase gazeuse à cette température ne peut être supérieure à la concentration de saturation  $C_s$  correspondante ( $C_s = \frac{P_s}{P_{totale}}$ ).

Lors du traitement du gaz à traiter, la première étape est le passage de 1 à 2 qui correspond à un refroidissement gazeux. La première goutte de liquide apparaît lorsque la pression partielle du polluant devient égale à sa pression de vapeur saturante (point 2) : c'est le point de rosée. Si la température diminue encore, la condensation se poursuit (passage de 2 à 3) jusqu'à atteindre la concentration désirée  $C_3$ . ( $C_3 = \frac{P_3}{P_{totale}}$ ).

La valeur choisie pour  $C_3$  impose la valeur de la température minimale à atteindre. Dans la mesure du possible, il vaudra mieux travailler au-delà du point triple pour éviter la formation de solides par cristallisation.



> Diagramme de phases

### 1.1 Lois d'équilibre

Différentes lois d'équilibre sont proposées pour traduire l'équilibre thermodynamique. C'est le cas de l'équation d'Antoine :

$$\ln P_i = A - \frac{B}{T + C}$$

Les constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont spécifiques à chaque fluide et sont généralement obtenues à partir de données expérimentales. Cette équation très simple a un domaine de validité réduit à une gamme limitée de température.

D'autres expressions présentent une gamme de validité plus large, comme l'équation de Wagner :

$$\ln P_i = \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^3 + d\tau^6}{T_r}$$

où  $\tau = 1 - T_r$  et  $T_r$  désigne la température réduite (rapport de la température de saturation à la température critique). Les constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont également spécifiques à chaque fluide et sont disponibles dans la littérature. Il est important de noter que l'extrapolation des lois d'Antoine et de Wagner vers les faibles valeurs de température, hors de leur domaine de validité, peut induire des erreurs non négligeables. Ainsi, près du point triple, ces lois ne sont plus applicables, particulièrement sous le point triple car il s'agit d'un équilibre gaz-solide.

## 1.2 Configurations des systèmes de traitement

Dans le cas des vapeurs de solvants, la température de condensation est souvent négative et se situe dans un grand nombre de cas entre  $-20\text{ °C}$  et  $-80\text{ °C}$ . Le système n'étant pas sélectif, toute substance présente dans l'effluent à une concentration supérieure à sa concentration de saturation à la température considérée sera partiellement condensée. En présence d'eau, il y aura ainsi formation de givre. Dans le cas de mélanges, l'existence de plusieurs points triples peut conduire à la formation d'une pâte en fond de condenseur constituée de cristaux et de liquides. Afin de prévenir ces problèmes, la condensation s'effectue généralement en plusieurs étapes : un premier condenseur, refroidi par l'air ambiant ou de l'eau, permet d'éliminer les composés les plus lourds et une partie de l'humidité. Un deuxième étage, refroidi par un fluide frigopporteur entre  $10$  et  $-30\text{ °C}$ , sépare les solvants légers et le reliquat d'humidité. Le dernier condenseur assure la séparation du solvant et de l'effluent gazeux peu chargé.

## 1.3 Températures de condensation

Les températures à mettre en œuvre seront fonction de deux paramètres : la nature du polluant à condenser et la concentration résiduelle souhaitée. Deux cas de figure peuvent exister : soit le procédé par condensation assure un prétraitement des effluents et est associé à un traitement final, soit il assure à lui seul l'épuration des effluents jusqu'aux valeurs réglementaires. Dans le premier cas, une certaine latitude est conservée quant aux températures de traitement à appliquer. Les techniques classiques de production de froid peuvent trouver ici un

domaine d'application. Par contre, dans le second cas, les températures devront être adaptées aux polluants à traiter. Ainsi, les solvants très volatils nécessitent une production de froid à très basse température que seuls les fluides cryogéniques peuvent fournir, alors que les solvants moins volatils continueront d'être traités grâce à des groupes de production frigorifiques classiques.

Une très large disparité des températures existe quant aux températures de refroidissement à appliquer et aux températures de congélation. Ces températures présentent également une forte dépendance avec le niveau de pression. Augmenter la pression permet de travailler avec un refroidissement moins poussé. Dans de nombreux cas, les températures à appliquer seront proches des températures de congélation, voire même en dessous de celles-ci.

## 2. SOURCES DE FROID

Les sources de froid à utiliser dépendent des températures à atteindre.

### 2.1 Prérefroidissement

L'eau ou l'air à des températures opératoires de  $10$  à  $20\text{ °C}$  peuvent être utilisés pour prérefroidir l'effluent à traiter lorsque sa température est trop élevée.

### 2.2 Condensation mécanique

La condensation est réalisée grâce à de l'eau saline ou à un fluide peu frigopporteur. Les températures sont limitées à  $-30\text{ °C}$  voire  $-40\text{ °C}$ , en utilisant des compresseurs et des échangeurs.

### 2.3 Condensation cryogénique

Les fluides cryogéniques permettent d'atteindre des températures jusqu'à  $-140\text{ °C}$ . L'azote liquide ou le dioxyde de carbone liquide peuvent être utilisés comme sources de froid.

## 3. INSTALLATIONS

Le condenseur est un équipement utilisé pour le transfert de chaleur entre l'effluent à traiter et un autre fluide (frigopporteur ou cryogénique) qui peut se réchauffer ou se vaporiser.

Il existe plusieurs types de condenseurs : les condenseurs à contact direct, les condenseurs à contact indirect et les condenseurs régénérateurs.

Température (°C)	20	0	-40	-60	-140	-160
<b>Composés chlorés</b>						
Chlorure de méthylène	1 264	530	43	8,5		
Chloréthylène			767	238	20	
<b>Hydrocarbures</b>						
o-Xylène	28	7,3	1,4			
Toluène	109	33	1,5	0,2		
<b>Alcools</b>						
Isopropanol	103	25	0,6	0,1		
Éthanol	110	32				

> Exemples de concentrations massiques ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en fonction de la température -  $P = 1\text{ bar}$

■ cristallisation du solvant

### 3.1 Condenseur à contact direct

Dans ce type de condenseur, le fluide de refroidissement est mis en contact directement avec l'effluent gazeux. Le fluide de refroidissement s'écoule par gravité sous forme de gouttelettes (pulvérisation) ou de film (contacteur gaz-liquide à garnissage ou à plateaux). Le fluide utilisé est souvent le condensat du mélange à traiter ou de l'azote liquide. Le principal avantage de cette condensation directe est de limiter les risques de bouchage dus au givrage, car les particules solides sont entraînées dans la phase liquide. Selon les cas, une opération de séparation entre les polluants (sous forme liquide) et le liquide de refroidissement devra être réalisée.

### 3.2 Condenseur à contact indirect

Ces condenseurs sont parmi les plus couramment utilisés. Ils sont constitués d'une paroi d'échange séparant les deux fluides et au travers de laquelle le flux de chaleur est transmis par conduction.

Les types d'échangeurs utilisés sont très variés : à plaques, tubulaires ou à spirales.

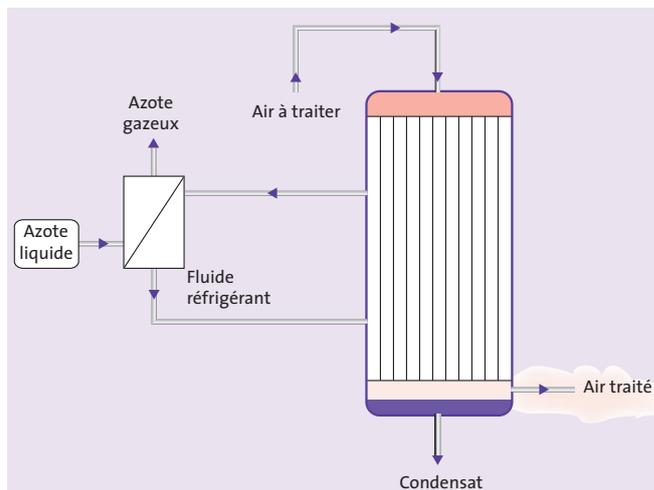
Les condenseurs à tubes et calandre sont construits à partir de tubes lisses ou à ailettes qui sont introduits dans une calandre. Pour limiter les pertes de pression, l'effluent gazeux circule généralement dans le volume déterminé par le faisceau de tubes et la calandre. Le fluide frigorigène ou cryogénique circule alors dans les tubes. Ces condenseurs sont les plus répandus car ils sont les plus faciles à réaliser.

Les condenseurs à plaques sont caractérisés par l'utilisation de plaques comme surface d'échange. L'étanchéité entre les canaux et avec le milieu externe est assurée grâce à une liaison entre plaques par brasure ou soudure. Ces condenseurs sont d'une conception plus délicate que ceux à tubes et calandre.

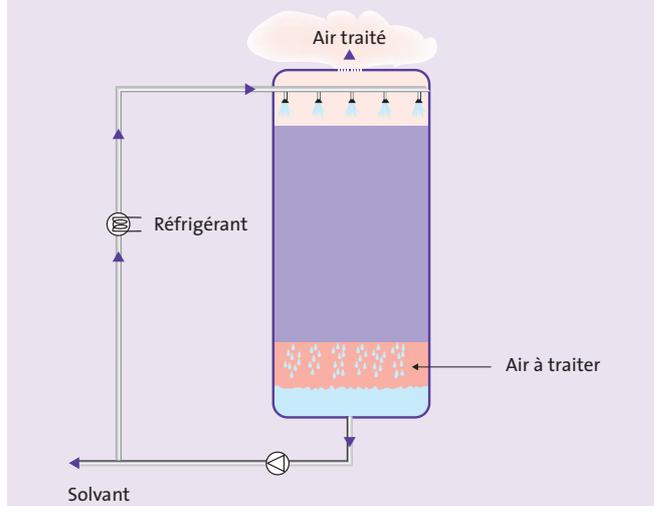
Les principales contraintes dans le choix d'une technologie de condenseurs à contact indirect sont les suivantes :

- la formation de givre et la cristallisation sur les parois,
- la recherche d'équipements de volume réduit,
- les contraintes mécaniques associées aux forts écarts de température entre les fluides.

Le fonctionnement le plus favorable est de faire circuler le fluide froid à contre-courant de l'effluent. Ainsi, la zone la plus froide pour le fluide de refroidissement correspond à la zone où l'effluent est le moins chargé en polluants ; c'est-à-dire où la température de condensation est la plus basse. Un écoulement par gravité du condensat à co-courant de l'effluent permet d'éviter l'entraînement mécanique de gouttelettes et d'améliorer les transferts de masse et de chaleur. Les installations comprennent le plus souvent deux condenseurs montés en parallèle pour permettre le dégivrage de l'équipement.



> Condensation à contact indirect avec fluide caloporteur



> Condensation à contact direct

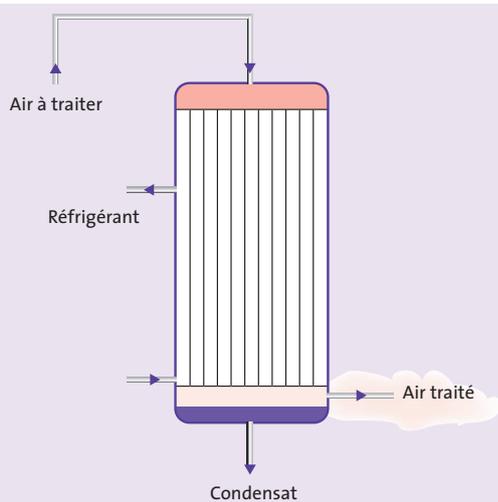
### 3.3 Condenseur à contact indirect avec fluide caloporteur intermédiaire

Ce type d'échangeur est surtout utilisé lorsque l'azote liquide est la source de froid.

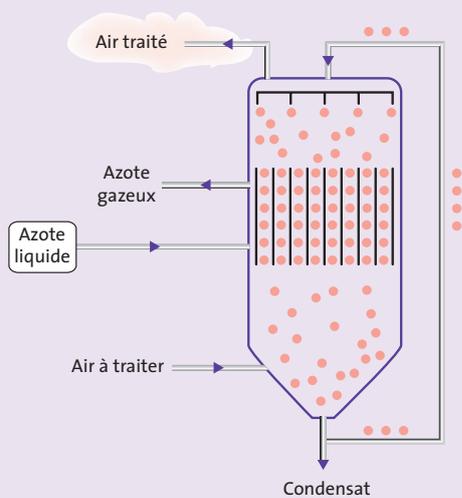
Un fluide caloporteur est refroidi dans un échangeur vaporisant l'azote liquide, puis il est transféré vers le condenseur. L'adjonction de ce fluide intermédiaire permet d'assurer une température plus uniforme dans le condenseur.

Contraintes	Solutions	Technologie
Obstruction par le givre et les cristaux	Augmenter le diamètre de passage pour l'effluent à traiter	Échangeurs à tubes et calandre équipés de tubes lisses ou de tubes à ailettes avec un pas élevé, échangeurs à plaques soudées lisses ou à bossages, avec espacement suffisant entre les plaques
Forts écarts de température	Conception adaptée	Tubes en hélice, faisceau tubulaire en U, tubes et ailettes de même matériau pour limiter les effets des dilatations différentielles
Volume réduit	Augmenter la surface d'échange	Surfaces ailetées

#### Condenseurs à contact indirect



> Condensation à contact indirect



> Condensation avec régénération

### 3.4 Condenseur régénérateur

Ce condenseur présente une surface d'échange mobile qui est mise successivement en contact avec l'un et l'autre des fluides. La chaleur est stockée lorsque la paroi est en contact avec le fluide chaud (effluent à traiter) puis déstockée lors du contact avec le fluide froid. Un exemple d'application consiste à mettre en circulation des billes en acier inoxydable à contre-courant avec l'effluent à traiter.

## 4. APPLICATIONS

### 4.1 Avantages et inconvénients

Pour les solvants, le taux de récupération par condensation classique (froid mécanique) ne dépasse habituellement pas 80 à 90%, mais peut être supérieur à 99% dans le cas de la condensation cryogénique. Pour répondre aux exigences réglementaires de rejet dans l'environnement, un traitement final par adsorption pourra être nécessaire. L'entraînement de gouttelettes (formation d'un brouillard) peut également nuire aux performances du système. La mise en place d'un dévésiculateur en aval du condenseur est une solution à ce problème.

Ces équipements sont également très sensibles aux variations des caractéristiques de l'effluent à traiter (débit, concentration). Ainsi une augmentation du débit, en induisant des vitesses de

passage excessives, provoquera l'entraînement de gouttelettes et de neige. À l'inverse, une chute importante de débit conduira à la formation de givre et à une cristallisation accrue d'où un risque de bouchage. Le recyclage partiel de l'effluent peut limiter ces fluctuations de débit. Pour écrêter les pointes de pollution, une unité d'adsorption peut être placée en amont. La concentration du gaz désorbé sera constante et plus élevée, ce qui est favorable à la condensation.

Une des limitations importantes de ce procédé est liée à la présence d'eau dans l'effluent à traiter. Les problèmes dus à l'humidité sont multiples : givrage à la surface du condenseur, formation de produits corrosifs en présence de solvants chlorés et transfert partiel des polluants en phase aqueuse. Une partie de la vapeur d'eau peut être condensée dans un premier étage à 0 °C ou des procédés de séchage par adsorption ou perméation peuvent être mis en place.

Un avantage important de cette technique est qu'elle permet de récupérer le polluant sans opérer de transfert de pollution. De plus, une valorisation ultérieure du produit récupéré peut être envisagée.

### 4.2 Domaine

D'un point de vue technique, le procédé est applicable quel que soit le débit. Cependant, la limite technologique, liée à la puissance des machines frigorifiques et le coût économique proportionnel au débit, impose de travailler au maximum à 2000 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> avec des concentrations supérieures à 10 g.Nm<sup>-3</sup>.

La condensation est particulièrement adaptée à des polluants ayant de faibles tensions de vapeur. Un prétraitement des poussières et des aérosols devra être prévu pour éviter un encrassement prématuré et une diminution des transferts thermiques.

### 4.3 Exemples

Des applications existent dans de nombreux secteurs : dégraissage, industrie chimique ou pharmaceutique ou encore pétrochimie.

Citons, par exemple, la récupération des vapeurs d'hydrocarbures lors des opérations de remplissage ou de purge des cuves de stockage de produits pétroliers.

Des condenseurs équipent également les événements de réacteur et les pompes à vide dans l'industrie de la chimie fine.

La condensation s'applique aussi à des installations fonctionnant en circuit fermé (machines à dégraisser, nettoyage à sec...).

## 5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Les procédés de condensation sont employés dans deux configurations de traitement : seuls ou en prétraitement, associés à d'autres techniques.

La recherche porte sur la conception des condenseurs et sur l'optimisation de leur fonctionnement, ainsi que sur le développement de procédés mixtes.

### 5.1 Condensation seule

Dans le cas d'un procédé utilisant uniquement la condensation pour assurer la séparation des polluants de l'effluent, un étage cryogénique est indispensable. Cette technique trouvera donc son application dans des industries fortes consommatrices d'azote gazeux utilisé en tant que gaz d'inertage (industrie

chimique ou pharmaceutique). La conception du condenseur devra permettre d'atteindre les valeurs réglementaires de rejet tout en ayant une période de fonctionnement sans bascule la plus longue possible.

De plus, le condenseur est le siège de mécanismes de transfert complexes :

- condensation de polluants en paroi,
- formation de cristaux en paroi (couche isolante thermique et réduction de la section de passage),
- entraînement mécanique et formation de vésicules liquides et solides.

L'analyse fine de ces mécanismes fait l'objet de travaux de recherche. Ceci permettra de comprendre les écarts constatés entre les températures à appliquer et les températures théoriques calculées.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

##### > Fournisseurs d'installations

*Condensation mécanique*

IRH Engineering (Gennevilliers)

MONSANTO Enviro-Chem Systems (Bruxelles)

Sogequip (Solaize)

Socrematic (Cergy-Pontoise)

*Condensation cryogénique*

Linde Gas S.A. (St-Priest)

Air Products S.A.S. (Paris)

Air Liquide (Paris)

Sogequip (Solaize)

##### > Laboratoire de recherche

GREth (CEA, Grenoble)

## 5.2 Procédés mixtes

L'objectif est de coupler la condensation avec des techniques comme l'adsorption ou l'oxydation thermique, par exemple. Ceci permet de rester dans des températures de traitement qui ne nécessitent pas d'équipement cryogénique. L'optimisation du procédé est réalisée à partir de la température minimale de traitement définie.

Une approche différente consiste à utiliser la cryocondensation en aval d'une unité d'adsorption. L'adsorption permet ici de pré-concentrer l'effluent à traiter et de diminuer la consommation d'azote liquide.

#### BIBLIOGRAPHIE

- La réduction des émissions de composés organiques volatils dans l'industrie. Collection *Connaître pour agir*, ADEME, 1997.
- C. Marvillet, A. Bontemps, N. A. Khen – Les composés organiques volatils dans l'environnement. Chapitre 12. Éditions Lavoisier Tec & Doc, 1998.

---

Auteur : Stéphanie Marsteau, Département Ingénierie des Procédés

Mise en pages : Nicole Pellieux



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles  
30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00 • Fax 01 40 44 30 99 • Internet : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr) • e-mail : [info@inrs.fr](mailto:info@inrs.fr)