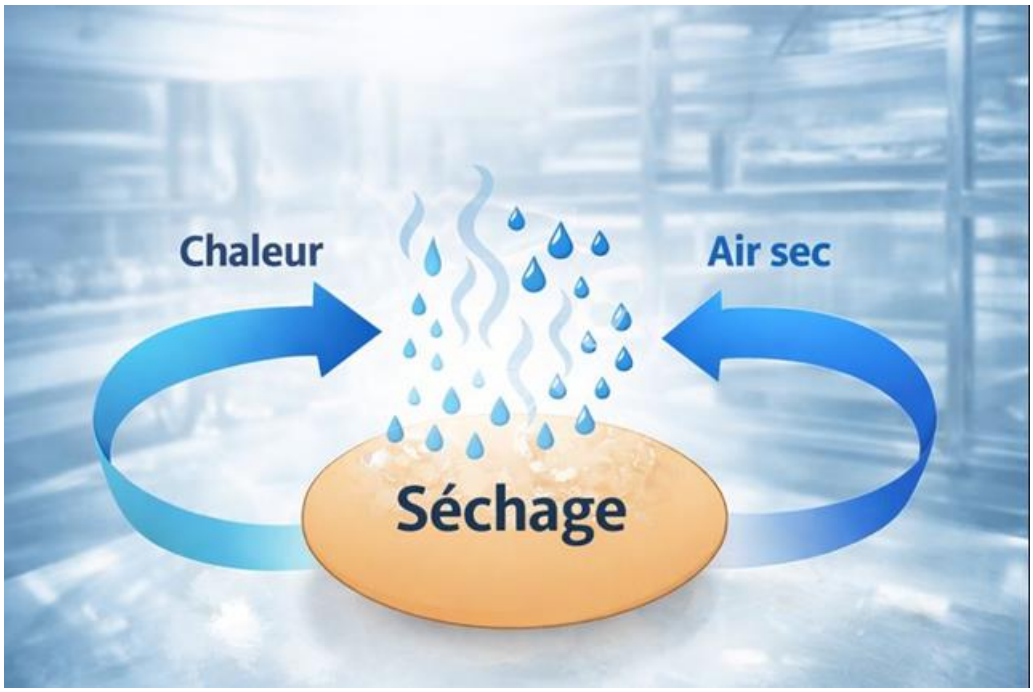
CHAPITRE V :

Séchage



Chapitre V : Séchage

V.1 Introduction :

Le séchage est une opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou un liquide.

L'eau à éliminer peut se trouver dans plusieurs états qui sont :

- L'eau de constitution ou de cristallisation.
- L'eau d'adsorption ou de d'humidité à la surface du solide.
- L'eau libre ou d'hydratation en solution dans le solide.

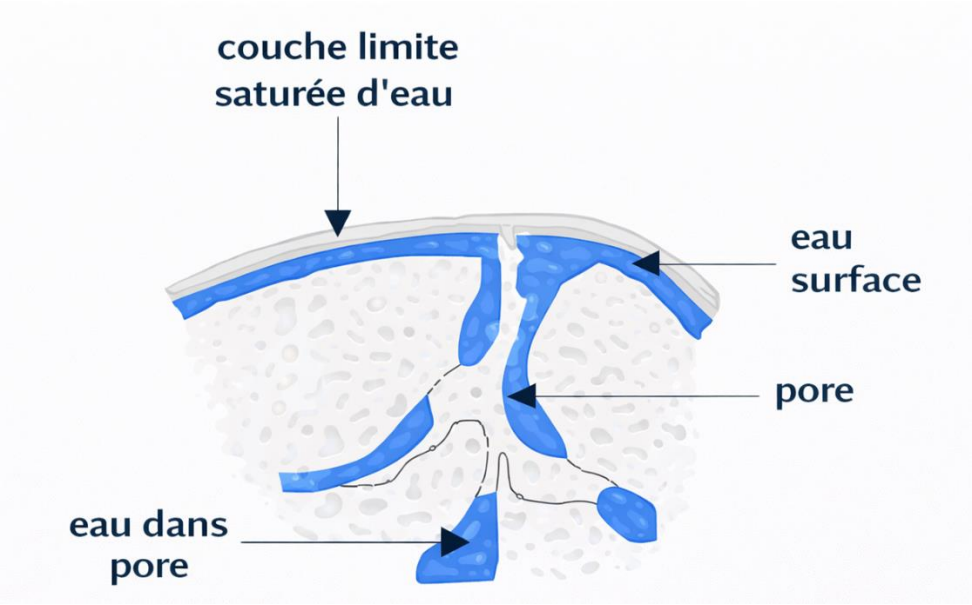


Figure V.1 : Différentes formes d'eau dans un matériau.

Lorsque l'on conçoit un processus de séchage, il est essentiel de comprendre ces trois états de l'eau, car ils influencent la façon dont l'eau est éliminée du matériau. Le processus de séchage vise généralement à éliminer d'abord l'eau libre, suivie de l'eau liée, et finalement à évacuer la vapeur d'eau. Les paramètres de séchage, tels que la température, la durée et la circulation d'air, sont ajustés en conséquence pour maximiser l'élimination de chaque forme d'eau sans endommager la matière sèche.

Lorsque la pression de vapeur du liquide P_m (pression de vapeur à la surface du solide mouillé) est différente de la pression de vapeur de la phase gazeuse (P_v), il se produit un transfert de matière, généralement sous forme de molécules de liquide qui s'évaporent pour rejoindre la phase gazeuse ou de molécules de gaz qui se condensent pour former la phase liquide. Ce phénomène est régi par les lois de l'équilibre des phases.

Lorsque $P_v = P_m$, un équilibre dynamique est atteint, et le taux d'évaporation équivaut au taux de condensation. Cela signifie qu'à chaque instant, autant de molécules passent de la phase liquide à la phase gazeuse que de molécules passent de la phase gazeuse à la phase liquide. À l'échelle macroscopique, cela se traduit par une pression constante et stable de vapeur au-dessus de la substance liquide.

- Si la pression de vapeur de la phase gazeuse est supérieure à la pression de vapeur du liquide en contact avec le solide ($P_v > P_m$), cela signifie que la phase gazeuse est sursaturée en vapeur d'eau

par rapport au liquide. Dans cette situation, il y a un transfert net d'humidité de l'atmosphère gazeuse vers le solide, ce qui équivaut à un phénomène d'humidification du solide.

- Si la pression de vapeur de la phase gazeuse est inférieure à la pression de vapeur du liquide en contact avec le solide ($P_v < P_m$), le transfert de matière se produit du solide vers la phase gazeuse. Cela signifie que l'humidité est éliminée du solide, ce qui correspond à un processus d'élimination de l'humidité du solide.
- Si la pression de vapeur de la phase gazeuse est égale à la pression de vapeur du liquide en contact avec le solide ($P_v = P_m$), un équilibre est atteint, et il n'y a plus de transfert de matière entre les phases solide et gazeuse. À cet état d'équilibre, le taux d'humidité dans le solide reste constant car les taux de condensation (passage de vapeur à liquide) et d'évaporation (passage de liquide à vapeur) sont égaux.

Il est courant de faire une distinction entre le séchage par ébullition et le séchage par entraînement :

- Pour le séchage par ébullition, le produit est porté à la température d'ébullition du liquide qu'il contient.
- Pour le séchage par entraînement, le produit est mis en contact avec un gaz en mouvement (de l'air chaud et sec). Ce gaz est en général conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit à sécher et la pression de vapeur du solvant inférieure à la pression dans l'enceinte de séchage.

V.2 Définition du séchage :

Le séchage est une opération unitaire fondamentale qui est largement utilisée dans diverses industries pour éliminer l'humidité ou le solvant d'un matériau solide ou liquide. Les méthodes de séchage varient en fonction des propriétés du matériau à sécher et des exigences de qualité du produit final.

Le séchage à l'air libre est l'une des méthodes les plus simples mais comporte des inconvénients tels que des pertes importantes et un manque de contrôle sur les conditions environnementales, ce qui peut affecter la qualité du produit final. Le séchage artificiel, y compris l'utilisation de séchoirs solaires, offre un meilleur contrôle des conditions de séchage, ce qui peut conduire à une amélioration de l'efficacité et de la qualité du processus de séchage.

Le séchage est en effet une opération essentielle dans de nombreuses industries, car il a un impact significatif sur la qualité, la durée de conservation, le transport et l'utilisation des produits finaux. Voici quelques-unes des raisons pour lesquelles le séchage est une étape cruciale dans la fabrication de divers produits :

- Réduction de la masse et du volume : Le séchage permet d'éliminer l'excès d'humidité des produits, ce qui réduit leur masse et leur volume. Cela peut considérablement réduire les coûts de transport et de stockage.
- Stabilisation : Le séchage peut contribuer à stabiliser les produits en éliminant l'humidité, ce qui réduit la croissance microbienne, la détérioration chimique et la moisissure, prolongeant ainsi la durée de conservation.
- Transformation : Le séchage peut transformer les caractéristiques physiques et chimiques des produits. Par exemple, il peut donner une texture croustillante aux aliments, durcir des matériaux granulaires, ou rendre des produits plus solides.
- Élimination de solvants : Dans le cas de produits chimiques et pharmaceutiques, le séchage peut éliminer les solvants résiduels, assurant la sécurité et la qualité des produits finaux.
- Réduction des coûts de manutention : Les produits secs sont plus faciles à manipuler et à entreposer, ce qui réduit les coûts de main-d'œuvre et les risques de dommages.

Le choix de la méthode de séchage dépendra des caractéristiques du matériau, des coûts associés, de l'échelle de production et d'autres considérations spécifiques à l'industrie. En effet, le séchage est essentiel pour garantir la qualité, la durabilité et la sécurité des produits dans de nombreuses applications industrielles.

V.3 Objectifs du séchage :

Le séchage est largement utilisé dans l'industrie chimique où il vient souvent en complément d'opérations comme l'évapo-concentration, la décantation, la filtration ou l'essorage. Il se pratique dans plusieurs cas :

- Le liquide résiduel est incompatible avec l'utilisation ultérieure du produit, pour des raisons chimiques ou physiques.
- Le produit humide se conserve mal, qu'il subisse une dégradation chimique (hydrolyse de la molécule solide par exemple), ou que son aspect physique soit modifié par agglomération des grains).
- Le coût du transport est plus élevé en présence de liquide.
- Le séchage permet outre l'élimination du liquide, la création de modifications de la structure interne du solide soit par exemple l'apparition d'une structure poreuse.

Le champ d'application du séchage est particulièrement large : produits chimiques, produits pharmaceutiques, produits agro-alimentaires, matières plastiques, papiers, bois... Le séchage dans l'industrie du procédé trouve son utilité dans les cas suivants :

- Séchage d'un produit fini pour éliminer le solvant de procédé (procédé de polymérisation des élastomères)
- Séchage d'un réactif avant synthèse.
- Séchage des matériaux biologiques pour faciliter le transport et augmenter la durée de conservation du produit (arrêt du développement des micro-organismes en dessous de 10% en masse d'eau dans le produit).

V.4 Mécanismes intervenant au cours du séchage :

Le séchage est une opération unitaire mettant en jeu un transfert de matière et un transfert de chaleur. Le séchage peut s'appliquer par plusieurs procédés qui sont :

V.4.1 Le séchage thermique :

Le séchage par voie thermique est l'opération qui consiste à séparer d'un solide, des quantités relativement faibles de liquide (eau ou solvant organique) par vaporisation :

- Par évaporation à l'ébullition, favorisée en travaillant sous vide.
- Par évaporation et entrainement à l'aide d'un gaz, généralement de l'air (l'air chaud).

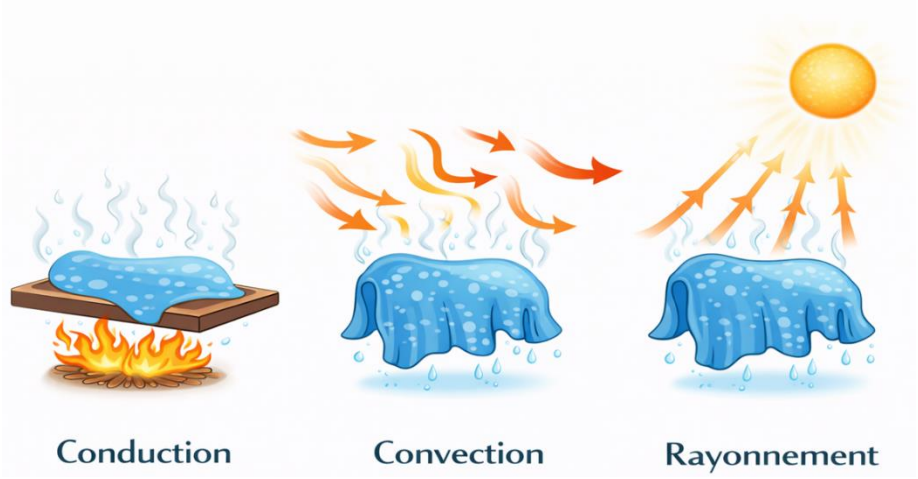


Figure V.2 : Mode de séchage thermique (conduction, convection et rayonnement).

Pour favoriser le séchage, on est souvent amené à fournir l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide que l'on veut éliminer. Cette énergie peut être apportée par trois modes de transfert de chaleur :

- ***Séchage par convection :*** On envoie sur le produit à sécher un courant d'air chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau et entraîne la vapeur formée. Exemples : le séchage de plantes aromatiques, de fruits, de grains, de boues d'épuration, de céramiques…
- ***Séchage par conduction :*** L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Exemple : la pâte à papier.
- ***Séchage par rayonnement :*** la chaleur est apportée au produit à sécher par des ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques, soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode de séchage est destiné aux produits en plaques (cartons) ou en film (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseur (1 à 2 cm).

V.4.2 Lyophilisation :

Ce procédé consiste à la sublimation de la glace après congélation. On obtient ainsi un solide sec, dont l'eau a été éliminée par sublimation (passage de l'état solide à l'état vapeur). Ce procédé nécessite l'usage de basses températures (-25 - -40°C), et un niveau de vide inférieur à 100 Pa.

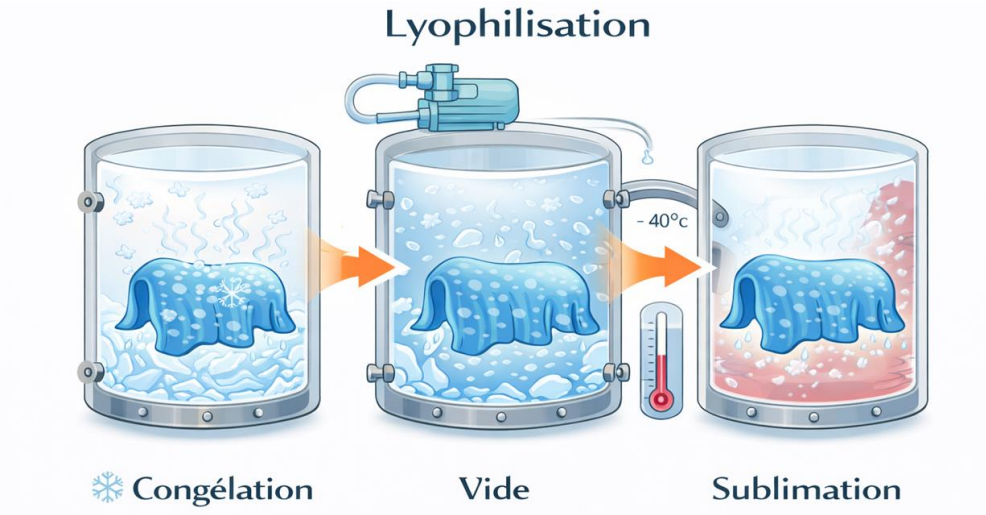


Figure V.3 : Séchage par lyophilisation.

V.4.3 Séchage mécanique :

Dans certains cas, tout ou partie du séchage peut être effectué par des moyens mécaniques (pressage, centrifugation). Ces procédés sont meilleur marché (en investissements et en coûts de fonctionnement) que les moyens thermiques. Ces procédés mécaniques permettent donc un premier séchage à moindre coût des produits avant un éventuel séchage thermique plus poussé.

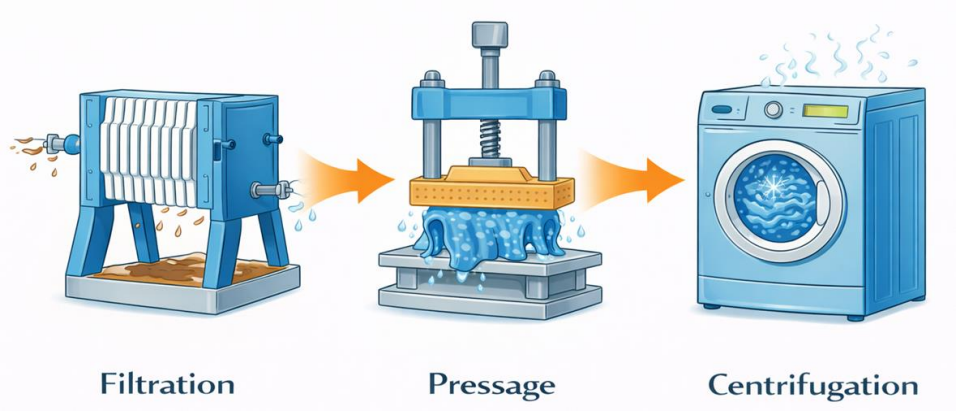


Figure V.4 : Séchage mécanique (filtration, pressage et centrifugation).

V.4.4 Séchage par adsorption :

Lorsqu'une solution contient des traces d'eau à éliminer, on élimine cette eau en la faisant adsorber par un composé solide hydrophile (alumine Al_2O_3).

V.5 Terminologie du séchage :

V.5.1 Définitions relatives aux produit solide :

Le taux de matière sèche (TMS) : c'est le titre massique en solide dans le produit à sécher.

$$TMS = \frac{\text{masse de matière sèche (solide sec)}}{\text{masse du produit à sécher}} 100\ (\%)$$

Le taux d'humidité (teneur en humidité) (TH) : c'est la masse d'eau par kg de matière sèche.

$$TH = \frac{\text{masse du liquide (eau)}}{\text{masse du solide sec}}\ (kg/kg)$$

V.5.2 Définitions relatives à l'air de séchage : (séchage par entrainement)

Humidité absolue (Y) ou (le taux d'humidité de l'air) :

$$Y = \frac{\text{masse d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}} \left(\frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg d'air sec}}\right)$$

Le taux d'humidité à l'équilibre désigne l'humidité d'un produit en équilibre avec la vapeur contenue par l'agent de séchage. C'est le taux minimum d'humidité auquel un matériau peut théoriquement être séché à des conditions données.

Humidité à saturation (Y_{sat} (T)) :

$$Y_{sat}(T) = \frac{\text{masse maximale d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}} \text{ à une température donnée}$$

Humidité relative ou degré hygrométrique (H_R) :

L'humidité relative s'exprime comme le quotient de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air par la pression de vapeur saturante à la même température. L'humidité relative est souvent nommée degré hygrométrique ou le taux de saturation :

$$H_R = \frac{\text{pression partielle de vapeur d'eau}}{\text{pression de vapeur saturante de l'eaupour l'airconsidéré à la température T}} = \frac{P_{H2O}}{P^S_{H2O}(T)}$$

$$0\% < H_R < 100\%$$

- Si $H_R = 0\%$ => $P_{H20} = 0$ => dans ce cas l'air est sec.
- Si $H_R = 100\%$ => $P_{H20} = {}^{PS}{}_{H20}$ => dans ce cas l'air est saturé en vapeur d'eau.

Degré de saturation (S) :

$$S = \frac{\text{humidité absolue}}{\text{humidité à saturation}} = \frac{Y}{Y_{sat}}$$

Température de rosée (Tr) :

C'est la température pour laquelle la vapeur d'eau de l'air considéré commence à condenser, c'est à dire pour laquelle on a $Y = Y_{sat}$, et $P_{H2O} = P^S{}_{H2O}$ (T). L'air est dit saturé si T = Tr.

Pour l'air humide, on considère souvent que $H_R = S$, approximativement valable pour de faibles humidités absolues. La température de rosée (Tr) est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide (à Y constante) pour atteindre la saturation.

Température sèche :

C'est la température normale, mesurée par un thermomètre ordinaire.

Enthalpie H :

Quantité de chaleur, exprimée en kJ/kg d'air sec, à mettre en jeu pour faire passer un mélange air sec + vapeur d'eau, d'un état à l'autre, pris comme point de référence.

Volume spécifique v :

Volume occupé par 1 kg d'air sec contenant x grammes de vapeur d'eau.

Température humide ou température du thermomètre humide (Th) et du thermomètre sec :

C'est aussi la température de saturation adiabatique de l'air considéré. C'est la température qui serait mesurée par un thermomètre entouré de gaze constamment humidifiée, et plongé dans un courant de l'air considéré.

Le couple température sèche - température humide est une mesure de l'humidité relative de l'air. La connaissance de ces deux valeurs permet de placer le point représentatif de l'air sur le diagramme de l'air humide.

Remarque : L'humidité absolue ne dépend pas de la température de l'air alors que l'humidité relative dépend de la température pour une composition fixée de l'air.

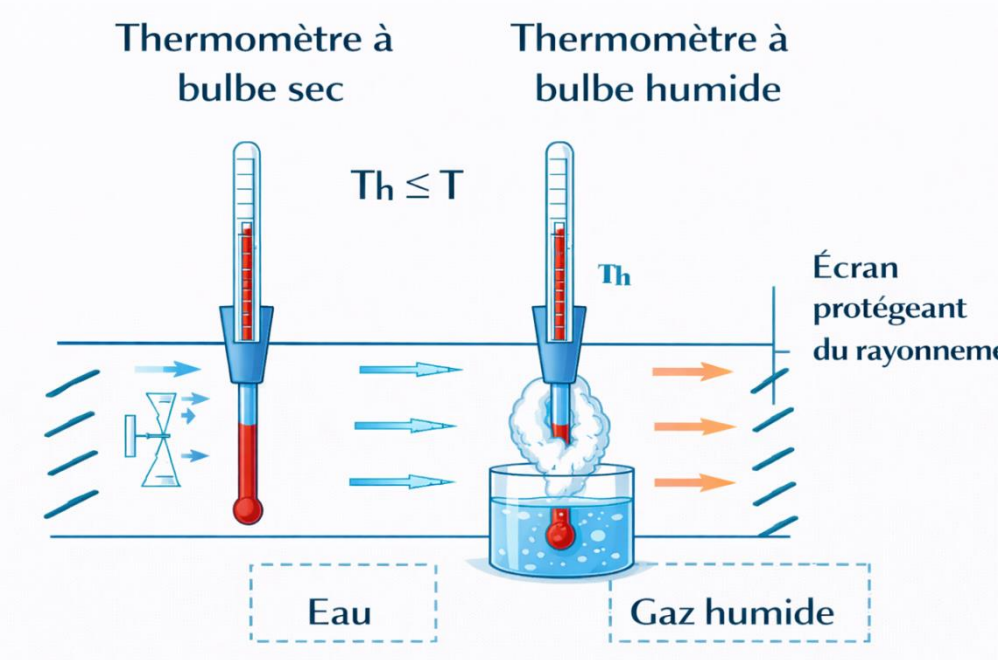


Figure V.5 : Température sèche et température humide.

Exemple :

1. Calculer l'humidité absolue de l'air Y, et l'humidité absolue à saturation de l'air Y_{sat} (20 °C) connaissant P_SH_2O (20 °C) = 2338 Pa ? En déduire son taux (ou degré) de saturation S = Y/Y_{sat}, à 20°C et pression atmosphérique (1 atm = 101325 Pa = 760 mmHg) ?
2. Cet air est mis sous vide à 100 mmHg (sans changement de composition). Calculer son humidité absolue à saturation Y_{sat} à cette pression, et son nouveau taux de saturation S. Conclure sur un des intérêts du séchage sous vide ?
3. Toujours à 20 °C, la pression totale est abaissée à 17.5 mmHg. Décrire ce qui se passe dans un solide qui serait mis à sécher dans cette ambiance ?

M_{air} = 29 g/mol

M_{H2O} = 18 g/mol

Correction de l'exemple:

1. Calcul de l'humidité absolue de l'air Y :

$$H_R = \frac{P_{H2O}}{P^S_{H2O}(20\ °C)} \Rightarrow P_{H20} = H_R \times P^S{}_{H2O}(20\ °C) = 0.8 \times 2338 \Rightarrow P_{H20} = 1870.4\ Pa$$

L'atmosphère humide = l'air + l'eau (vapeur d'eau)
Pression atmosphérique = P air + P H_2O
=> P air = P atm – P H_2O
=> P air = 101325 – 1870.4
=> P air = 99454.6 Pa

L'humidité absolue est calculée par la relation suivante : $Y = \frac{\text{masse d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}}$

On considère d'après l'état des gaz parfaits :

$$P_{vapeur\ d'eau} = y_{vapeur\ d'eau} \times P_T = \frac{n\ vapeur\ d'eau}{n_T} \times P_T = \frac{m\ _{vapeur\ d'eau}}{M_{vapeur\ d'eau}\ n_T} \times P_T \ \ldots\ldots\ldots (1)$$

$$P_{air} = y_{air} \times P_T = \frac{n\ air}{n_T} \times P_T = \frac{m\ _{air}}{M_{air}\ n_T} \times P_T \ \ldots\ldots\ldots (2)$$

$$\frac{(1)}{(2)} = \frac{P_{vapeur\ d'eau}}{P_{air}} = \frac{m_{vapeur\ d'eau} \times M_{air}}{M_{vapeur\ d'eau} \times m_{air}} = \frac{m_{vapeur\ d'eau} \times 29}{18 \times m_{air}} = \frac{29 \times m_{vapeur\ d'eau}}{18 \times m_{air}}$$

$$\text{D'où : } Y = \frac{\text{masse d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}} = \frac{P_{vapeur\ d'eau} \times 18}{P_{air} \times 29} = \frac{1870.4 \times 18}{99454.6 \times 29} = 0.01167 \text{ g d'eau/ g d'air sec}$$

=> Y = 11.67 g d'eau/ kg d'air sec

Calcul de l'humidité absolue à saturation de l'air Y_{sat} (20 °C):

L'humidité absolue à saturation est calculée par la relation suivante :

$$Y_{sat}\ (20\ °C) = \frac{\text{masse maximale d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}} \text{ à } 20\ °C$$

De la même manière comme précédemment :

$$Y_{sat}\ (20\ °C) = \frac{\text{masse maximale d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}} = \frac{P^S_{H20} \times 18}{P_{air} \times 29} = \frac{2338 \times 18}{(P_{atm} - P^S_{H2O}) \times 29}$$

$$\Rightarrow \quad Y_{sat}\ (20\ °C) = \frac{2338 \times 18}{(101325 - 2338) \times 29}$$

=> Y_{sat} (20 °C) = 0.01466 g d'eau/ g d'air sec = 14.66 g d'eau/kg d'air sec

En déduire son taux (ou degré) de saturation S = Y/Y_{sat} :

$$S = \frac{Y}{Y^S_{H2O}} = \frac{11.67}{14.66} = 0.796 = 79.6\ \%$$

2. Cet air est mis sous vide à 100 mmHg (sans changement de composition). Calculer son humidité absolue à saturation Y_{sat} à cette pression, et son nouveau taux de saturation S. Conclure sur un des intérêts du séchage sous vide ?

La pression totale est abaissée à 100 mmHg soit $\frac{101325 \times 100}{760} = 13332$ Pa, son Y_{sat} (20 °C) est calculée par la relation suivante :

$P^S{}_{H2O}$ (20 °C) = 2338 Pa

$$Y_{sat}\ (20\ °C) = \frac{\text{masse maximale d'eau vapeur}}{\text{masse d'air sec}} = \frac{P^S_{H20} \times 18}{P_{air} \times 29} = \frac{2338 \times 18}{(P_{atm} - P^S_{H2O}) \times 29}$$

=> Y_{sat} (20 °C) = $\frac{2338 \text{ x } 18}{(13332 - 2338) \text{ x } 29}$

=> Y_{sat} (20 °C) = 0.132 g d'eau/ g d'air sec = 132 g d'eau/kg d'air sec

Son nouveau taux de saturation S est :

$$S = \frac{Y}{Y_{H2O}^{S}} = \frac{11.67}{132} = 0.0884 = 8.84\ \%$$

Cet air est beaucoup moins saturé en eau que le précédent. La mise sous vide permet donc, pour une même quantité d'air, d'éliminer plus d'eau sous forme de vapeur.

3. Toujours à 20 °C, la pression totale est abaissée à 17.5 mmHg. Décrire ce qui se passe dans un solide qui serait mis à sécher dans cette ambiance ?

La pression totale est maintenant 17.5 mmHg, soit $\frac{101325 \text{ x } 17.5}{760}$ = 2333 Pa. Cette pression est très légèrement inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau à 20°C P^{S}_{H2O} (20 °C) = 2338 Pa. Il n'y a donc plus d'air dans la phase gaz, et la pression de 17.5 mmHg est uniquement dur à la vapeur d'eau.

V.5.3 Hygroscopicité :

Après essorage ou égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur Pm qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides (figure V.2).

- Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur Pm du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée.
- Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidité. Dans un tel cas, la tension de vapeur Pm du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température, et le solide est dit hygroscopique.

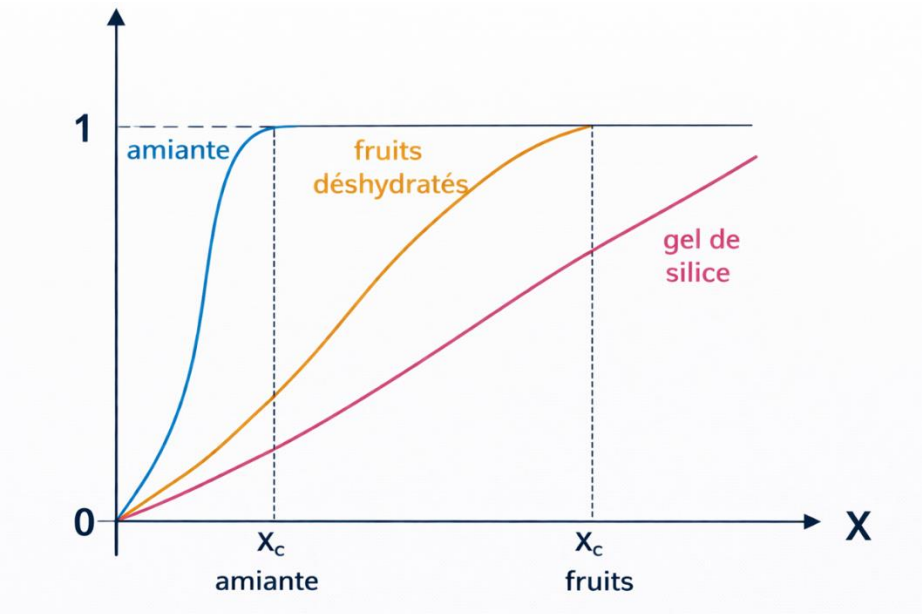


Figure V.6 ; Hygroscopie de quelques matériaux.

Plusieurs exemples de produits sont donnés sur la figure V.6 :

On s'aperçoit qu'en réalité tous les solides ont une certaine hygroscopicité. En dessous d'une humidité relative du solide inférieure à X_C (l'humidité d'un solide en équilibre avec de l'air saturé (φ = 100%) à la limite du domaine d'hygroscopicité), on observe que le solide humide est en équilibre avec un air non saturé en eau (humidité relative inférieure à 1). Bien entendu, dans le cas de composés comme l'amiante, l'hygroscopicité est négligeable. Par contre elle est marquée pour des solides poreux, des gels, des produits alimentaires déshydratés.

V.6 Diagramme enthalpique de l'air humide :

Les calculs relatifs au séchage sont assez complexes. Ils peuvent être beaucoup simplifiés par l'utilisation de diagrammes. L'évaporation de l'eau par l'air constituant un cas particulier extrêmement important, plusieurs diagrammes ont été élaborés pour ce cas, mais pourraient tout aussi bien l'être pour d'autres produits.

Ces diagrammes permettent de déterminer graphiquement les changements d'état de l'air humide. Ils permettent aussi de suivre l'évolution de ces paramètres au cours de l'opération du séchage sans avoir recours à des calculs fastidieux.

En séchage, la représentation la plus utilisée est le diagramme de Mollier-Ramzine, sur lequel l'enthalpie H (exprimée en kJ/kg d'air sec) est portée en ordonnées et le taux d'humidité absolue Y (exprimé en kg d'eau/kg d'air sec) en abscisses.

Les températures apparaissent sous la forme d'isothermes. Les axes sont obliques et l'inclinaison de l'axe des abscisses est choisie de manière à ce que l'isotherme à 0 °C soit perpendiculaire à l'axe des ordonnées. C'est un diagramme à quatre entrées, on peut donc, pour un air donné, placer son point caractéristique sur le diagramme de Mollier en connaissant deux de ces valeurs. Le diagramme nous permet alors d'en déduire les deux autres.

L'humidité relative apparaît sur des courbes iso-humidité relative (**f**igure V.7). Les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide à pression atmosphérique sont établies en considérant 1 kg d'air sec contenant Y kg d'eau.

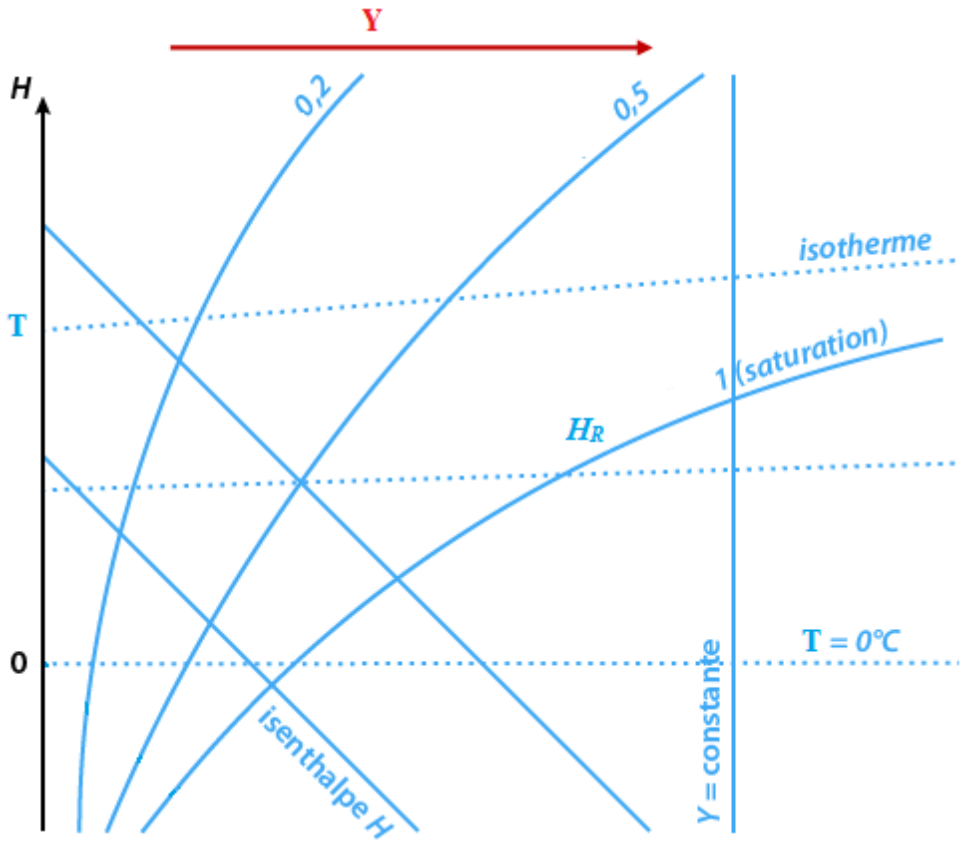


Figure V.7 : Diagramme enthalpique de l'air humide (diagramme de Mollier-Ramzine).

Ce diagramme est utilisé pour résoudre les problèmes de séchage par entrainement lorsque le gaz utilisé est de l'air et que le liquide imprégnant le solide est de l'eau. Le diagramme présente les propriétés de l'air humide.

La température de rosée (Tr) est mesurée comme étant la température à laquelle, il faut refroidir l'air humide (à humidité absolue Y constante) pour atteindre la saturation (à H_R == 100%). Elle se lit à l'intersection de la droite (Y constante) avec la courbe de l'humidité relative H_R = 100%. (figure V.8)

La température humide (Th) se lit à l'intersection de la droite isenthalpe passant par (T°, Y) de l'air avec la courbe de l'humidité relative H_R = 100%. (figure V.8)

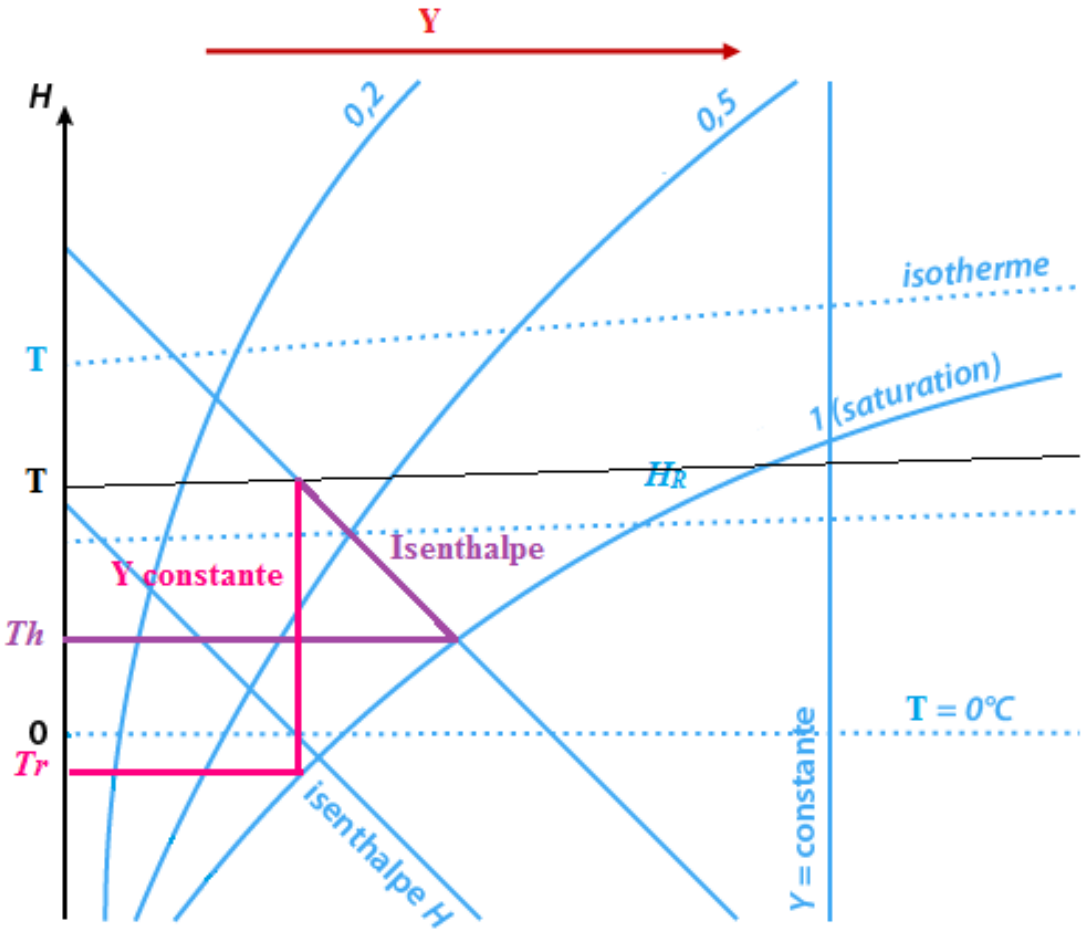


Figure V.8 : Exploitation du diagramme enthalpique de l'air humide pour déterminer Th et Tr.

Exemple d'application :

Pour le point (**A**) sur le diagramme de l'air humide : (figure V.9)

L'humidité absolue, Y = 15 g d'eau / kg d'air sec
La température sèche, T° = 45°C
L'humidité relative, H_R = 25%
L'enthalpie, H = 83.7 kJ/kg d'air
La température de rosée, Tr = 20 °C
La température humide, Th = 26.6 °C.

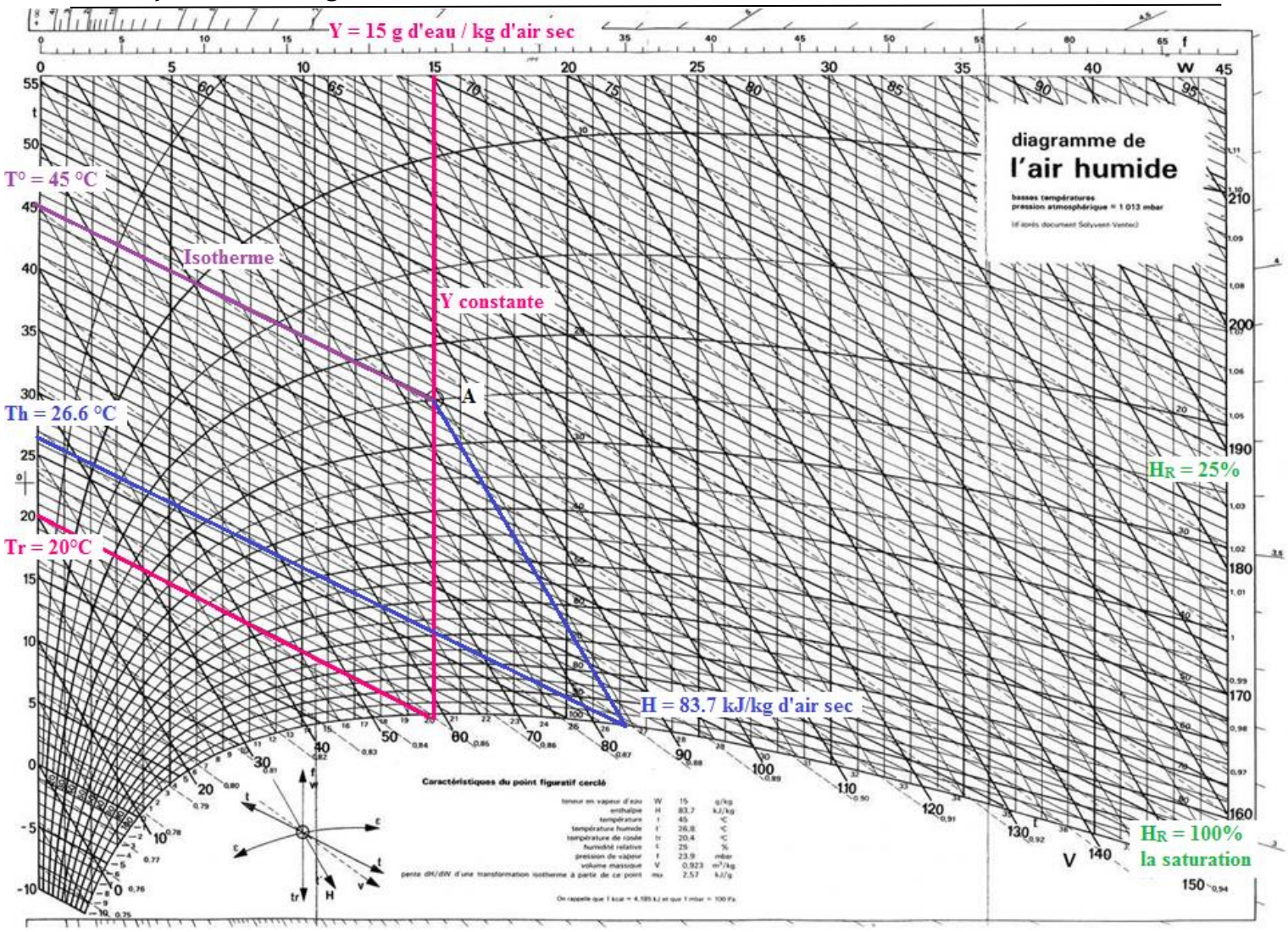


Figure V.9 : Exploitation du diagramme enthalpique de l'air humide pour déterminer les paramètres enthalpique de l'air humide.

V.7 Diagramme psychrométrique :

Les propriétés des mélanges air-vapeur d'eau sont données, sous une forme graphique, dans des diagrammes psychrométriques. Ceux-ci sont disponible sous des formes différentes, n'étudierons ici que leurs caractéristiques essentielles.

Le diagramme psychrométrique fondamental consiste en un graphique de la température du thermomètre sec (en abscisses) et l'humidité absolue (en ordonnées). Si nous choisissons la pression totale pour laquelle il faut construire le diagramme, nous pouvons y tracer les lignes d'humidité relative constante et la température humide constante. En effet, si la température sèche, la pression totale et l'humidité absolue sont données, l'humidité relative et la température humide sont alors déterminées. La pression partielle de la vapeur d'eau est fixée par l'humidité absolue et la pression totale, par conséquent, on peut construire une seconde échelle en ordonnées pour indiquer la pression partielle de la vapeur d'eau.

La plupart des diagrammes psychrométriques indiquent l'enthalpie des mélanges air-vapeur d'eau pour 1 kg d'air sec. Les valeurs fournies supposent l'enthalpie de l'air sec est nulle à -20 °C et que l'enthalpie de la vapeur d'eau est choisie dans les tables de vapeur d'eau (lesquelles sont basées sur l'hypothèse que l'enthalpie du liquide saturé est nulle à 0 °C). Ce procède est satisfaisant parce que nous n'intéressons habituellement qu'aux différences d'enthalpie. Le fait que les lignes d'enthalpie constantes soient essentiellement parallèles aux lignes de température humide constante découle

naturellement du fait que la température humide est essentiellement égale à la température de saturation adiabatique.

Pour faciliter la représentation, des transformations de l'air au cours du procédé du séchage des corps humides, on utilise le "diagramme psychométrique" de l'air humide. À noter que le diagramme est valable pour tout mélange gaz-vapeur. Ici, nous étudions le mélange air-vapeur. Un tel diagramme précise, pour tous les états que peut occuper l'air humide, ses caractéristiques physiques :

V.7.1 Température sèche :

C'est la température repérée et lue sur un thermomètre ordinaire. La lecture de cette température se fera sur l'échelle horizontale du bas du diagramme et s'exprime en degrés Celsius (°C). Toute droite verticale est une isotherme.

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique que l'on appelle plus couramment : température sèche : Ts en °C ou °F.

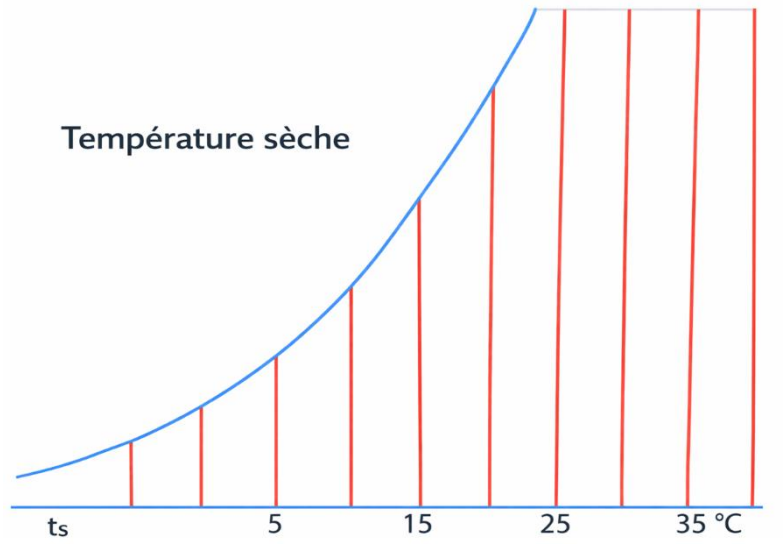


Figure V.10 : Température sèche sur le diagramme psychrométrique.

V.7.2 Humidité absolue :

L'humidité absolue de l'air humide Y (g eau/kg air sec ou kg eau/kg air sec) sont lues sur les ordonnées (axe vertical de droite) du diagramme de l'air humide. Les lignes horizontales, appelées isohydres, sont des lignes à teneur en vapeur d'eau constante.

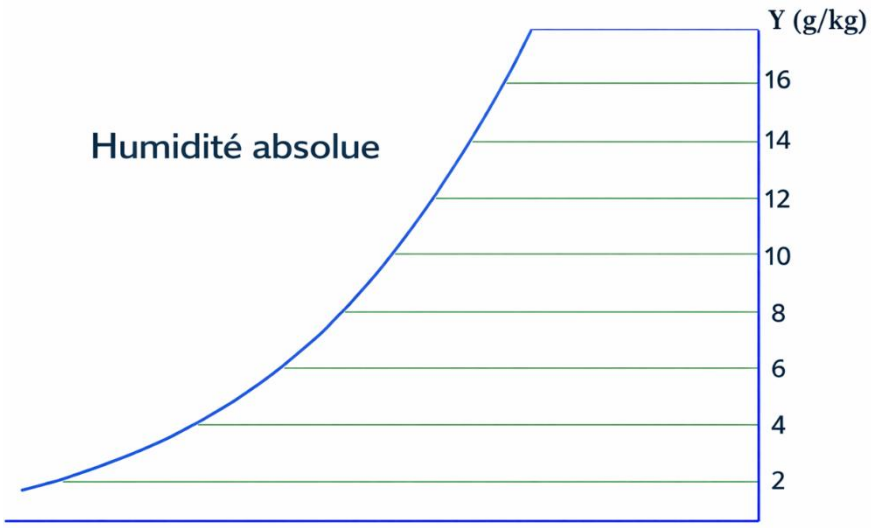


Figure V.11 : Humidité absolue sur le diagramme psychrométrique.

V.7.3 Température de rosée :

Si on se déplace à partir d'un point A placé dans le diagramme ci-dessous le long de l'isohydre passant par A dans le sens du refroidissement de l'air, l'intersection de cette droite avec la courbe de saturation donne le point de rosée Tr.

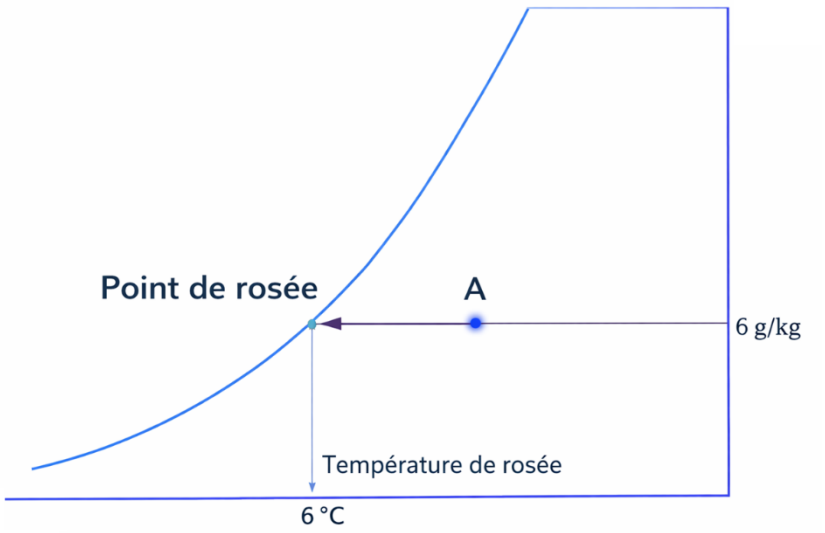


Figure V.12 : Température de rosée sur le diagramme psychrométrique.

V.7.4 Humidité relative ou pourcentage d'humidité :

L'air situé sur la courbe 100% correspond à un air saturé en vapeur d'eau. On dit que son humidité relative ou son pourcentage d'humidité est de 100% et c'est une courbe à humidité relative constante.

Si on divise la teneur en vapeur d'eau de l'air saturé en deux, l'air obtenu présentera une humidité relative de 50%. On peut tracer ainsi un réseau de courbes à différentes valeurs d'humidité relative.

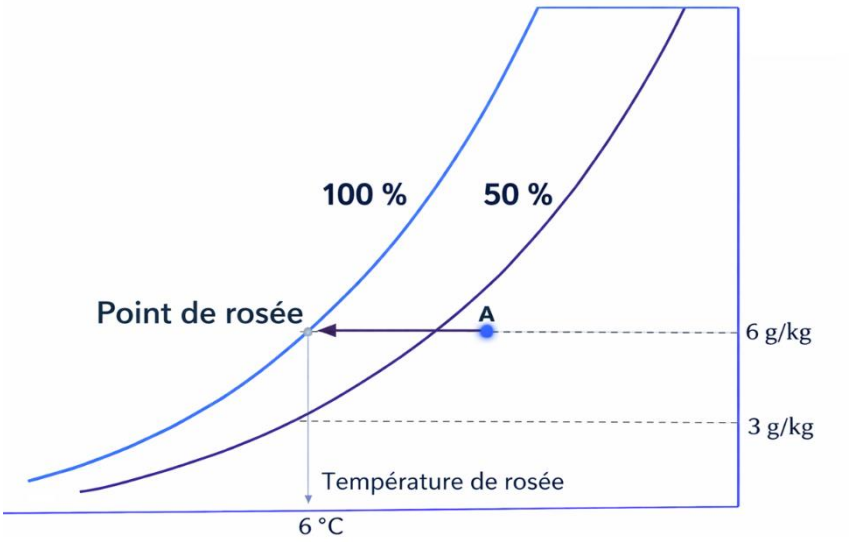


Figure V.13 : Humidité relative sur le diagramme psychrométrique.

V.7.5 Enthalpie de l'air humide :

L'enthalpie H est la quantité de chaleur totale de l'air humide considéré. Elle s'exprime en kJ/kg air sec ou en kcal/kg air sec.

On considère que, l'air dont la température Ts = 0 °C et la teneur en vapeur d'eau Y = 0 g/kg air sec, a une enthalpie H = 0 kJ/kg air sec. Le réseau de droites obliques perpendiculaires à l'échelle des enthalpies constitue des lignes à enthalpie constante, appelées isenthalpes.

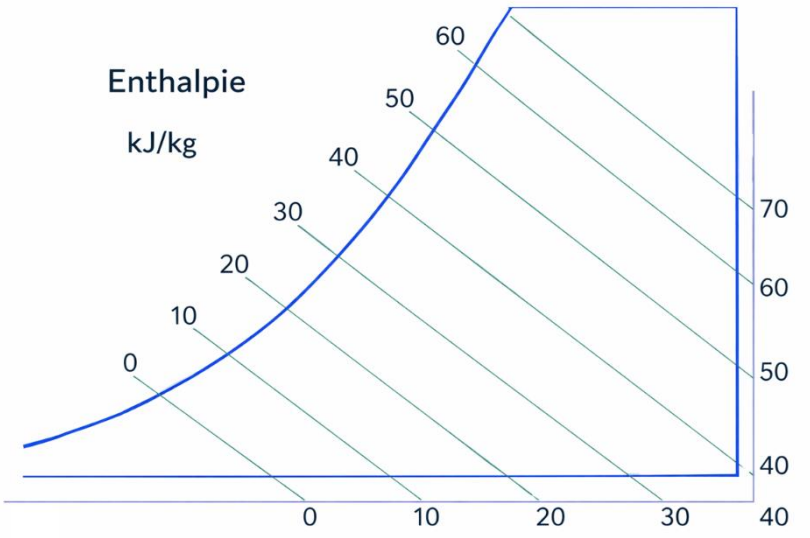


Figure V.14 : Enthalpie de l'air humide sur le diagramme psychrométrique.

V.7.6 Température humide de l'air :

Si d'un point A du diagramme on se déplace sur une isenthalpe (ou courbe de saturation adiabatique), on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide de l'air Th.

On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé psychromètre.

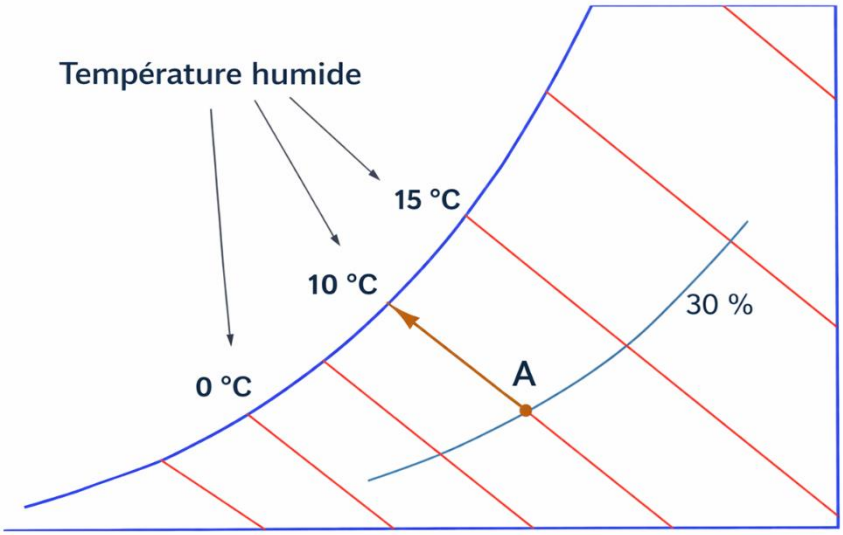


Figure V.15 : Température humide de l'air sur le diagramme psychrométrique.

V.7.7 Volume spécifique :

Symbole : v (m^3/kg d'air sec).

C'est le volume d'air humide rapporté au kg d'air sec.

Exemple d'application :

Pour poser un point sur le diagramme il faut connaitre deux caractéristiques de l'air, prenons par exemple la température sèche et l'humidité relative.

T_S = 32 °C.

H_R = 40%.

On place le point sur le diagramme (P) et on détermine les autres caractéristiques, qui sont regroupées dans le tableau.

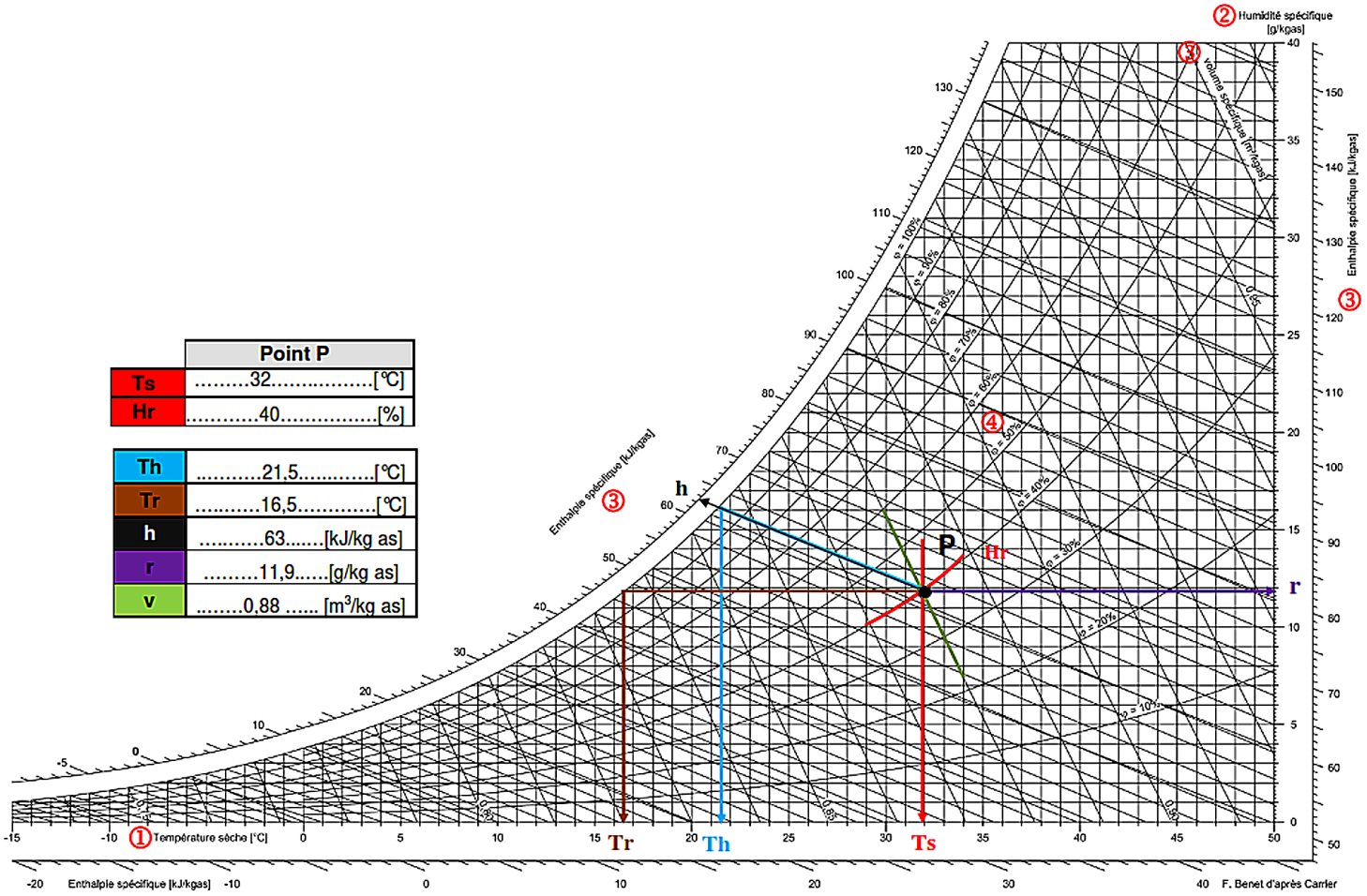


Figure V.16 : Exploitation du diagramme psychométrique pour déterminer les paramètres enthalpique de l'air humide.

VI.8 Principe opérationnel des systèmes de séchage :

V.8.1 Généralités :

Le séchage par voie thermique résulte d'un double transfert de matière et de chaleur.

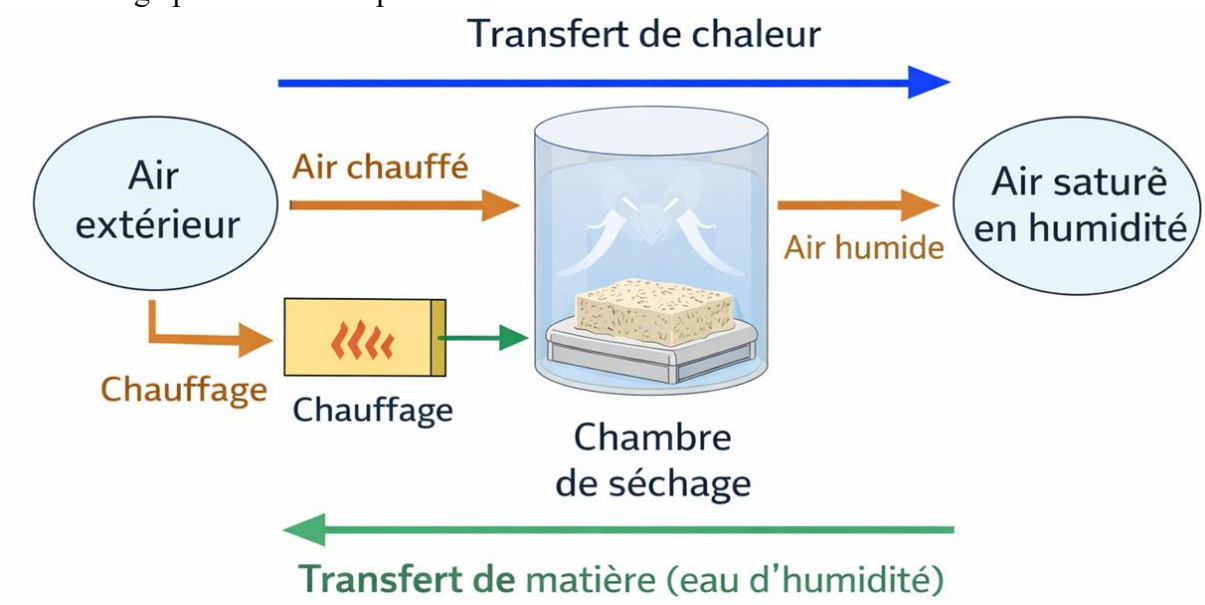


Figure V.17 : Principe opérationnel des systèmes de séchage.

La chaleur fournie au solide humide permet à l'eau d'humidité de se vaporiser pour ensuite être éliminée vers le milieu extérieur.

Le transfert de chaleur se fait à travers le milieu extérieur par convection, conduction ou rayonnement. Puis, il se fait à travers les profondeurs du solide humide par conduction.

Le transfert de matière se fait en sens inverse. L'eau migre tout d'abord de l'intérieur du solide vers sa surface par diffusion sous l'effet d'une différence de concentration entre l'intérieur du solide et sa surface qui a commencé à sécher. Dans un deuxième temps, l'eau est éliminée vers le milieu extérieur.

V.8.2 Séchage par ébullition :

La technique consiste à porter la température du solide à sécher jusqu'à la température d'ébullition. Pour entraîner les vapeurs hors du sécheur, on peut soit utiliser un gaz vecteur balayant en continu l'enceinte du sécheur, soit travailler sous vide et donc en plus abaisser la température d'ébullition.

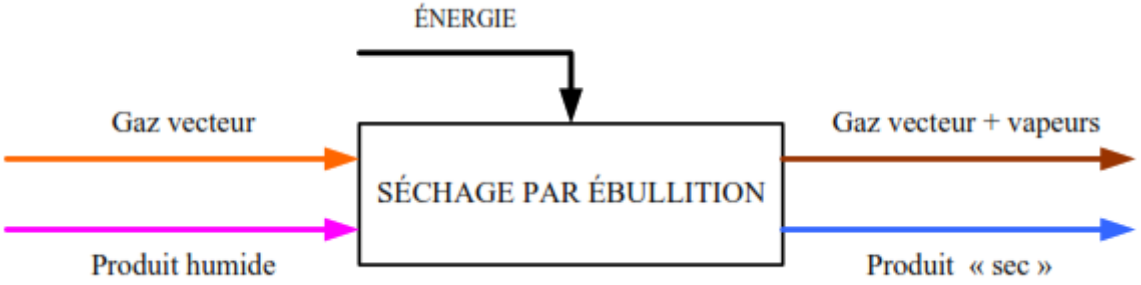


Figure V.18 : Séchage par ébullition.

Différentes techniques permettent d'apporter l'énergie nécessaire au séchage par ébullition :

- ***Séchage par conduction :*** Le transfert thermique vers le produit à sécher se fait par contact avec une paroi chauffée.
- ***Autres modes de séchage :*** L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'humidité n'est pas apportée au solide humide par conduction à travers une paroi mais par d'autres moyens tels que : rayonnement thermiques, microondes ou courant électrique.

Avantages de la technique par ébullition :

- Moins coûteux que le procédé par entraînement.
- Permet, en travaillant sous vide, de récupérer un solvant pur (intéressant lorsque le solvant n'est pas de l'eau).
- Permet de sécher des produits qui par leur nature ne peuvent être mis en contact avec l'air (risque d'oxydation par l'oxygène de l'air).

Inconvénients :

On ne peut arriver jusqu'à un séchage complet du produit sans atteindre des températures élevées qui risquent d'altérer la qualité du produit.

V.8.3 Séchage par entraînement :

Ce mode de séchage est très répandu, le gaz de séchage (communément de l'air, ce peut être aussi de l'azote ou de la vapeur d'eau surchauffée) assurant simultanément les transferts de chaleur et de matière. L'eau d'humidité n'entre pas nécessairement en ébullition mais se vaporise à la surface du solide, ***la pression partielle de l'eau dans le gaz de séchage étant inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau d'humidité à la température du solide humide pendant le séchage.***

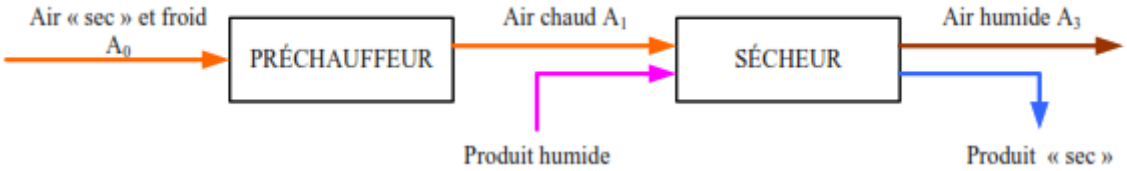


Figure V.19 : Séchage par entrainement.

V.8.4 Conduite et optimisation du séchage par entrainement :

On utilisera de l'air comme gaz de séchage.

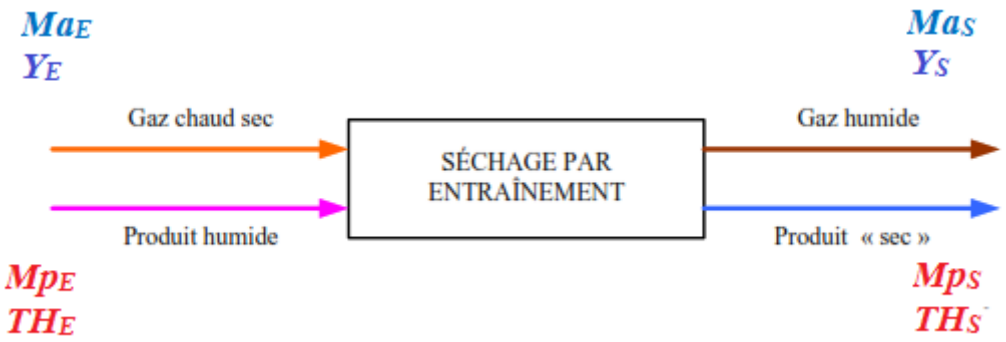
Circuit du séchage sur le diagramme de Mollier :



A_1 a la même humidité absolue Y que A_0 car l'air ne s'est pas chargé d'eau dans le préchauffeur.

Séchage adiabatique : Le séchage peut être considéré comme adiabatique s'il n'y a pas de pertes thermiques sur l'installation. Dans le cas d'un séchage adiabatique de l'eau, l'air de séchage évolue le long d'une isenthalpe (H constante).

Bilan Matière : calcul de la capacité évaporatoire du sécheur :



Ma_E : Débits d'air sec à l'entrée du sécheur.
Ma_S : Débits d'air humide à la sortie du sécheur.
Mp_E : Débit de produit solide humide en entrée du sécheur.
Mp_S : Débit de produit solide sec à la sortie du sécheur.
Y_E, Y_S : Humidité absolue de l'air à l'entrée et à la sortie du sécheur respectivement.
TH_E, TH_S : Taux d'humidité du produit solide à l'entrée et à la sortie du sécheur respectivement.
Ma : Masse de l'air sec.
Ms : Masse du solide sec.

$$TH = \frac{masse\ d'eau}{masse\ du\ produit\ sec}\ \left(\frac{kg}{kg}\right)$$

$$Y = \frac{masse\ d'eau\ vapeur}{masse\ d'air\ sec}\ \left(\frac{kg}{kg}\right)$$

Bilan en eau :

$Ma_E + Mp_E = Ma_S + Mp_S$

$Ma_E\ Y_E + Mp_E\ TH_E = Ma_S\ Y_S + Mp_S\ TH_S$

Avec : $Ma_E = Ma_S = Ma$ (débit d'air sec constant)

Rendement massique du séchage :

$$rendement = \frac{Eau\ éliminée}{Eau\ éliminable}100 = \frac{MaS\ YS - MaE\ YE}{MpE\ THE}100$$

Capacité évaporatoire du sécheur : C'est le débit d'eau (V) éliminé par le sécheur. Le liquide éliminé de la phase solide et capté par la phase gaz lors du séchage :

$$V = Ma\ (Y_S - Y_E) = M_S\ (TH_E - TH_S)$$

On a pour le solide :

Masse du produit humide à l'entrée du sécheur
= Masse du solide sec + Masse eau entrant avec le solide

=> $Mp_E = M_S + M_S \times TH_E$
=> $Mp_E = M_S\ (1 + TH_E)$

Masse d'eau = $M_S \times TH_E$ car: $TH_E = \frac{\text{masse d'eau}}{(\text{masse du produit sec}) = M_S}$

On admet également que :
Masse du produit sec à la sortie du sécheur
= Masse du solide sec + Masse eau sortant avec le solide

=> $Mp_S = M_S + M_S \times TH_S$
=> $Mp_S = M_S\ (1 + TH_S)$

Masse d'eau = $M_S \times TH_S$ car : $TH_S = \frac{\text{masse d'eau}}{(\text{masse du produit sec}) = M_S}$

Egalement, on a pour l'air :

Masse de l'air sec à l'entrée du sécheur
= Masse d'air sec + Masse eau vapeur entrante avec l'air

=> $Ma_E = Ma + Ma \times Y_E$
=> $Ma_E = Ma\ (1 + Y_E)$

Masse d'eau vapeur = $Ma \times Y_E$ car: $Y_E = \frac{\text{masse d'eau vapeur}}{(\text{masse d'air sec}) = M_a}$

On admet également que :
Masse de l'air humide à la sortie du sécheur
= Masse d'air sec + Masse eau vapeur sortante avec l'air
=> $Ma_S = Ma + Ma \times Y_S$
=> $Ma_S = Ma\ (1 + Y_S)$

Masse d'eau vapeur = Ma x Y_S car: $Y_S = \frac{\text{masse d'eau vapeur}}{(\text{masse d'air sec}) = M_a}$

V.9 Bilan thermique sur l'air circulant dans le séchoir :

Les bilans s'écrivent sur la base de la matière sèche et de l'air sec :

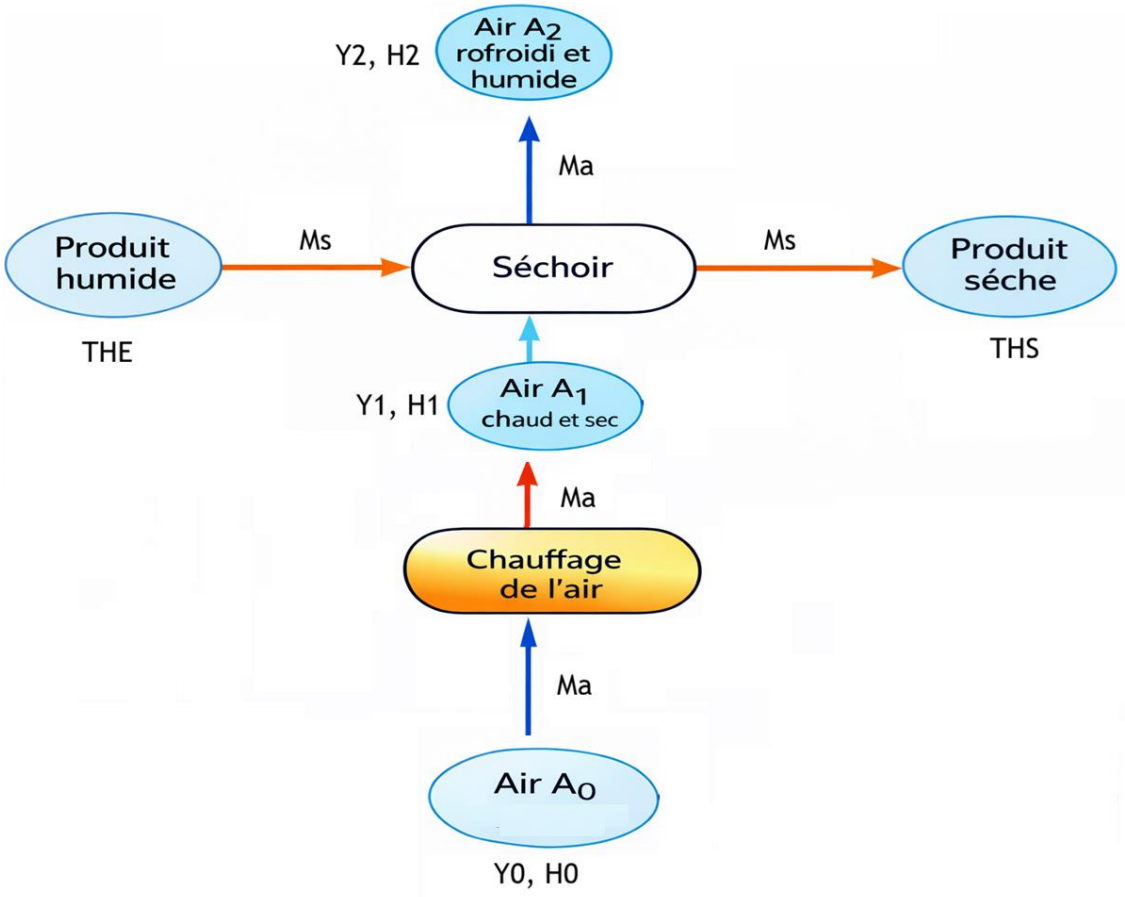


Figure V.20 : Séchoir fonctionnant à courants croisés.

Ce qui entre = Ce qui sort

$$Ma\ H_0 + Q = MaH_1 = MaH_2$$

Avec :

- Q : la quantité de chaleur nécessaire pour le chauffage de l'agent de séchage (l'air).
- MaH_θ : le flux de chaleur apporté par le gaz à l'entrée dans le préchauffeur.

H_1 et H_2 sont égaux si on considère que le séchage se fait de manière isenthalpique.

La quantité de chaleur Q nécessaire pour le chauffage de l'agent de séchage est égale à ;

$$Q = Ma\ (H_1 - H_0) = Ma\ (H_2 - H_0)$$

Pour obtenir l'élimination de 1 kg de vapeur d'eau, on doit fournir un flux de chaleur :

$$q = \frac{Q}{m_{eau}} = \frac{M_a}{m_{eau}}\ (H_2 - H_0)$$

D'où :

$$q = \frac{H_2 - H_0}{Y_2 - Y_1}$$

V.10 Choix du procédé de séchage :

Le choix de l'appareil de séchage approprié dépend de plusieurs facteurs importants, comme. Voici une explication plus détaillée de ces critères :

- **Nature du produit :** Il est essentiel de prendre en compte l'état physique du produit à sécher, qu'il s'agisse d'un liquide, d'un solide ou d'une pâte. Chaque forme de produit peut nécessiter des techniques de séchage différentes.
- **Taux d'humidité initiale et finale :** Le pourcentage d'humidité initial dans le produit et le taux d'humidité cible que nous souhaitons atteindre sont des facteurs déterminants pour le choix de la méthode de séchage. Certains produits nécessitent un séchage complet, tandis que d'autres peuvent nécessiter seulement une réduction partielle de l'humidité.
- **Débit de produit :** Le débit de produit à sécher par unité de temps, est un facteur clé. Certains équipements de séchage sont plus adaptés à des débits élevés, tandis que d'autres sont conçus pour des opérations à plus petite échelle.
- **Sensibilité à la chaleur :** La sensibilité du produit à la chaleur est cruciale. Certains produits peuvent être endommagés ou altérés par des températures élevées, tandis que d'autres sont plus résistants. Il est essentiel de choisir un procédé de séchage qui convient à la tolérance à la chaleur du produit.
- **Sécurité :** Si le produit est toxique, inflammable ou comporte d'autres risques potentiels, la sécurité de l'opération de séchage est un facteur essentiel. Il peut être nécessaire d'utiliser des équipements spéciaux pour garantir la sécurité des travailleurs et éviter les accidents.

D'autres considérations peuvent également entrer en jeu, comme les exigences de qualité du produit final, les coûts énergétiques associés au procédé de séchage et les considérations environnementales. En fonction de ces facteurs, divers types d'équipements de séchage, tels que les séchoirs rotatifs, les séchoirs à lit fluidisé, les séchoirs sous vide, les séchoirs à bande, etc., peuvent être envisagés pour répondre aux besoins spécifiques de séchage de chaque produit.

V.11 Appareillage :

La classification des appareils peut s'effectuer suivant le procédé (continu ou discontinu), le mode de séchage (convection, conduction ou rayonnement), ou le type de produits traités (solide en blocs, poudre, pâte, film…).

V.11.1 Séchage par conduction :

Les étuves constituent un exemple séchoir en discontinu : elles conviennent pour de faibles quantités ou pour des produits couteux exigeants des conditions de séchage très particulières. On peut donner deux exemples de séchoirs continus :

- ***Les sécheurs à tambour rotatifs :*** ils sont constitués par un long cylindre légèrement incliné tournant à l'intérieur d'une enceinte chauffée par des gaz de combustion d'un bruleur. Le solide descend sous l'action de la gravité et de l'entrainement. Le mouvement de rotation permet le renouvellement du solide au niveau des surfaces chauffantes. Ils sont très appropriés pour des produits minéraux supportant des températures élevées.

- ***Les séchoirs à cylindres :*** ils sont constitués cylindres creux animés d'un lent mouvement de rotation et chauffés à l'intérieur par un fluide caloporteur. La matière à sécher s'écoule entre les cylindres. Ils conviennent pour les produits sous forme de films (textiles, papier, matière plastique) …

V.11.2 Séchage par convection :

On distingue pour les séchoirs discontinus ceux fonctionnant par léchage (courant de gaz parallèle à la matière) et ceux fonctionnant par traversée (courant de gaz perpendiculaire à la matière).

Dans les étuves le produit est fixé sur des plateaux. Deux exemples importants de séchoirs continus peuvent être indiqués :

- ***Les sécheurs à tambour rotatif :*** ils présentent de grandes analogies avec les séchoirs du même type fonctionnant par conduction mais ici l'air chaud est directement en contact avec le produit. Ce type de séchage est adapté aux produits pulvéruleux non collants.

- ***Les séchoirs à lits fluidisés :*** ce séchage convient pour des poudres divisées qui sont placées sur un support poreux. Un courant d'air chaud est soufflé sous la couche de matière et un lit fluidisé s'établit, les échanges thermiques sont alors intenses et l'efficacité du séchage est très grande.

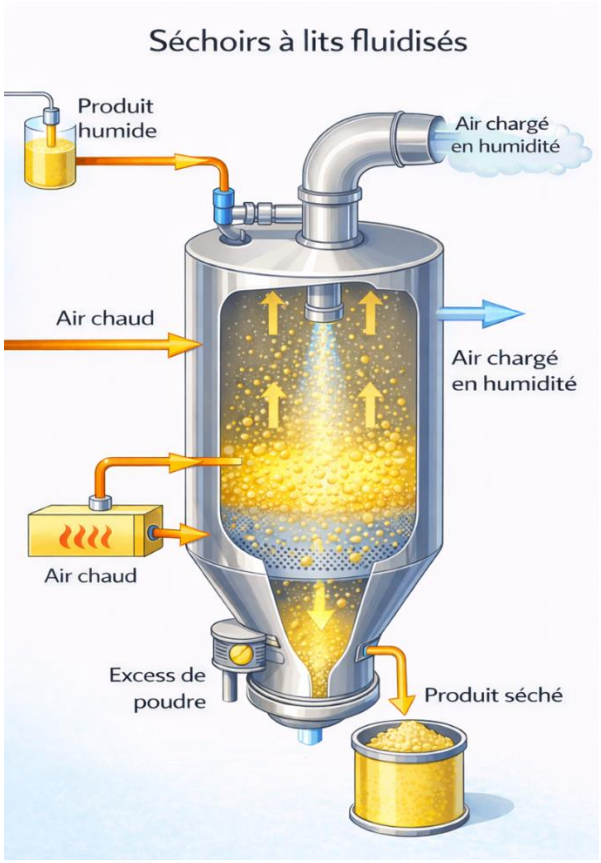


Figure V.21 : Séchoir à lit fluidisé.

V.11.3 Séchage par atomisation :

Ce procédé est applicable directement à des solutions, des émulsions ou des suspensions fines. Il permet notamment de regrouper en une seule opération la suite d'opérations de cristallisation, de filtration et d'essorage.

Le système de pulvérisation en très fines gouttelettes du liquide préchauffé conditionne l'efficacité du séchage. Il est constitué d'une turbine tournante à grande vitesse. L'air est introduit chaud par un disperseur dans la chambre. Pendant son trajet dans l'appareil, toute l'eau est évaporée par l'air.

Ces séchoirs fonctionnent en continu et s'appliquent à de grosses productions. Ils ont l'inconvénient de nécessiter la vaporisation de très grandes quantités de solvants et consomment donc beaucoup d'énergie ce qui freine leur développement. Beaucoup de produits peuvent être séchés par ce procédé :

- Produits minéraux (pigments, engrais…).
- Produits organiques (colorants, polymères, produits pharmaceutiques…).
- Produits alimentaires.
- Lessives.

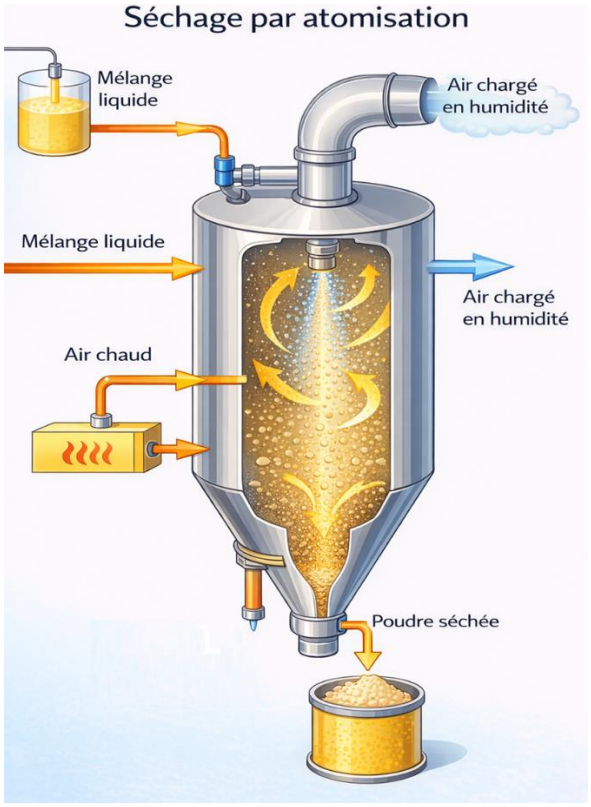


Figure V.22 : Séchage par atomisation.

Annexes : Diagrammes de l'air humide.

