

BTS BIOQUALITE	GENIE INDUSTRIEL
Le séchage par entrainement : diagramme de Mollier	

Objectifs :

- Définir les grandeurs de l'air.
- Utiliser le diagramme de Mollier.

Le diagramme enthalpique de l'air ou diagramme de Mollier est un abaque composé de plusieurs familles de courbes qui permettent de relier entre elles les principales variables caractéristiques de l'air humide :

- sa température humide
- sa température sèche
- son degré d'humidité relative
- son degré d'humidité absolue (ou teneur en eau)
- son enthalpie

On peut ensuite en déduire sa teneur en eau maximale, son pouvoir évaporatoire...

1. DEFINITIONS DES GRANDEURS DE L'AIR

*** Pouvoir évaporatoire**

Pouvoir évaporatoire : capacité de l'air à absorber de l'eau placée à son contact. Il est mesuré en grammes d'eau supplémentaires qu'il peut absorber, par m³ d'air, jusqu'à atteindre la saturation d'eau.

*** Humidité absolue et humidité relative**

L'air humide est composé d'air sec et de vapeur d'eau.

Deux paramètres sont introduits pour quantifier les proportions entre l'air sec et la vapeur d'eau contenue dans l'air :

① **L'humidité absolue Y** (ou teneur en eau), qui s'exprime en grammes d'eau par kg d'air sec.
Par exemple si $Y = 10 \text{ g/kg}$ d'air sec, dans 1010g d'air, on a 1000 g d'air sec et 10 g de vapeur d'eau.

② **L'humidité relative H_R** (ou degré hygrométrique ou hygrométrie), qui s'exprime en pourcentage. Cette valeur précise le niveau d'humidité absolue de l'air par rapport au niveau d'humidité absolue maximal qu'il pourrait avoir compte tenu de sa température et de sa pression. Elle permet donc de connaître le niveau de saturation de l'air en eau.

$H_R = (\text{Quantité de vapeur d'eau présente dans l'air}) / (\text{Quantité maximale d'eau que peut contenir ce même air à la même température et même pression})$

En France Métropolitaine, l'humidité relative dépasse toujours 50 % mais n'atteint pas celle de la Martinique en saison des pluies (100%).

L'humidité relative de l'air est de 100% quand la vapeur d'eau se condense sur une surface froide ; cette température de condensation est appelée la température de rosée.

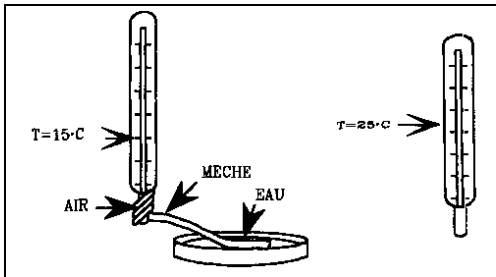
BTS BIOQUALITE	GENIE INDUSTRIEL
Le séchage par entrainement : diagramme de Mollier	

*** Relation entre humidité relative, température sèche et température humide**

Pour évaluer le pouvoir évaporatoire d'une quantité d'air donné, il faut en connaître son degré hygrométrique (H_R). On utilise alors la notion de température humide (T_H)

La température sèche T : température du mélange air sec et vapeur d'eau. Elle se mesure avec un thermomètre usuel.

La température humide T_H : température de l'air au contact de l'eau. Elle se mesure avec un thermomètre dont l'ampoule est entourée d'une mèche humide et est légèrement ventilée. Il faut que la vitesse de l'air autour du thermomètre soit d'au moins 2m/s pour que la mesure soit juste.



Document 1 : le psychromètre permet d'obtenir une mesure de la température sèche et de la température humide de l'air

Explications :

Au contact de l'air non saturé ($H_R < 100\%$) l'eau s'évapore. L'évaporation (changement d'état de l'eau) nécessite de l'énergie appelée chaleur latente. L'air transfère cette énergie sous forme de chaleur à l'eau pour qu'elle puisse s'évaporer. Ainsi la température de l'air est diminuée au contact de l'eau qui s'évapore. Plus l'hygrométrie de l'air est faible, plus il y a d'évaporation, plus l'air cède de la chaleur, plus il se refroidit.

Ainsi, la différence entre la température humide de l'air T_H et sa température sèche T est d'autant plus grande que l'hygrométrie de l'air H_R est faible.

Si l'air est saturé en eau, il ne peut pas y avoir d'évaporation : $T = T_H$

*** La température de rosée**

La température de rosée T_r est la température à partir de laquelle un refroidissement de l'air entraîne la condensation de la vapeur d'eau.
Remarque : $T_s > T_h > T_r$

*** L'enthalpie de l'air**

C'est la quantité de chaleur contenue dans l'air en kJ/kg d'air sec.

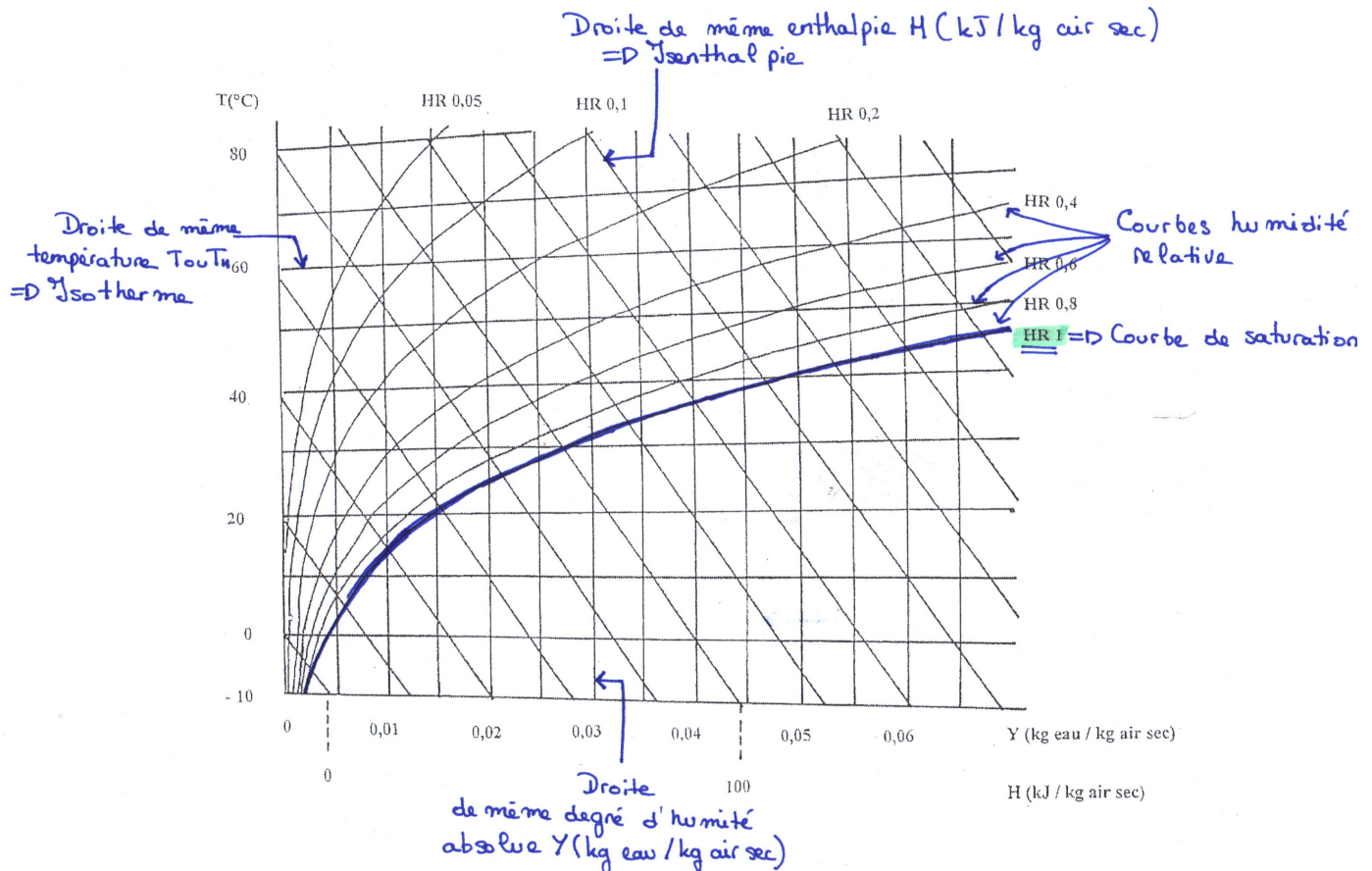
Le séchage par entrainement : diagramme de Mollier

2. PRESENTATION DU DIAGRAMME DE MOLLIER.

A pression atmosphérique, il existe des expressions mathématiques reliant température sèche (T), température humide (T_H), humidité relative (H_R) et humidité absolue (x). Pour plus de facilité on utilise le diagramme de l'air humide (de Mollier) qui permet, connaissant deux de ces valeurs, de connaître les deux autres.

Le diagramme comporte 4 catégories de courbes :

- les droites de même température : les droites isothermes
- les droites de même enthalpie : les droites isenthalpiques
- les droites de même degré d'humidité absolue
- les courbes d'humidité relative dont la courbe de saturation (où $H_R = 100\%$)



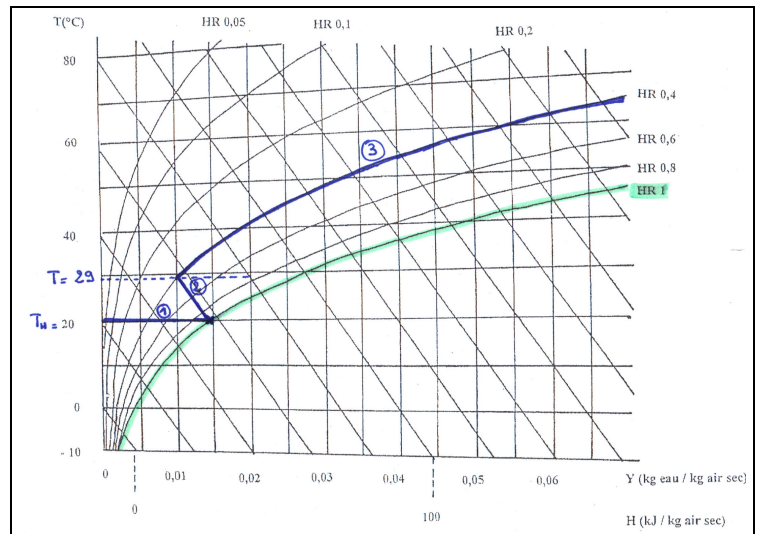
3. DETERMINATION DES HUMIDITES RELATIVE ET ABSOLUE DE L'AIR AMBIANT A PARTIR DES TEMPERATURES SECHE ET HUMIDE

- ① La température humide est reportée sur la courbe de saturation (l'air se sature en eau au contact de l'eau)
- ② On remonte la courbe de l'enthalpie jusqu'à l'isotherme de l'air plus sec (l'enthalpie de l'air sec est la même quel que soit la quantité d'eau qu'il contient.)
- ③ L'humidité relative de l'air ambiant est déterminée par extrapolation grâce au point d'intersection :
 - de l'isotherme de l'air sec
 - de l'enthalpie
- ④ L'humidité absolue est déterminée au niveau du même point d'intersection par lecture verticale.

Ex : Quelles sont les humidités absolue et relative de l'air ambiant pour $T = 29^\circ\text{C}$ et $T_H = 20^\circ\text{C}$?

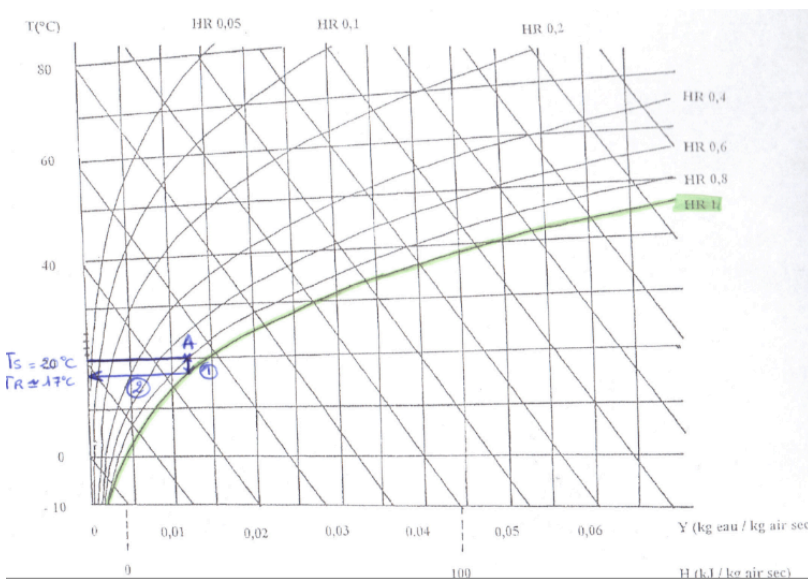
On trouve graphiquement :

- $H_R = 0,4$
- $x = 0,01 \text{ kg d'eau par kg d'air sec}$



4. DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE ROSEE OU POINT DE ROSEE A PARTIR D'UNE TEMPERATURE SECHE ET DES HUMIDITES ABSOLUE OU RELATIVE

- ① On place le point caractéristique de l'air à partir des données.
- ② On descend la droite de l'humidité absolue jusqu'à la courbe de saturation. En effet, le point de rosée est la température à laquelle le refroidissement de l'air entraine la condensation de la vapeur d'eau, donc une HR de 100%. L'humidité absolue ne varie pas.
- ③ On déduit la température de rosée.



Ex : Quel est le point de rosée d'un air à 20°C et dont l'humidité relative est de 0,8.

On trouve graphiquement $T_R = 17^\circ\text{C}$.

Le séchage par entrainement : diagramme de Mollier

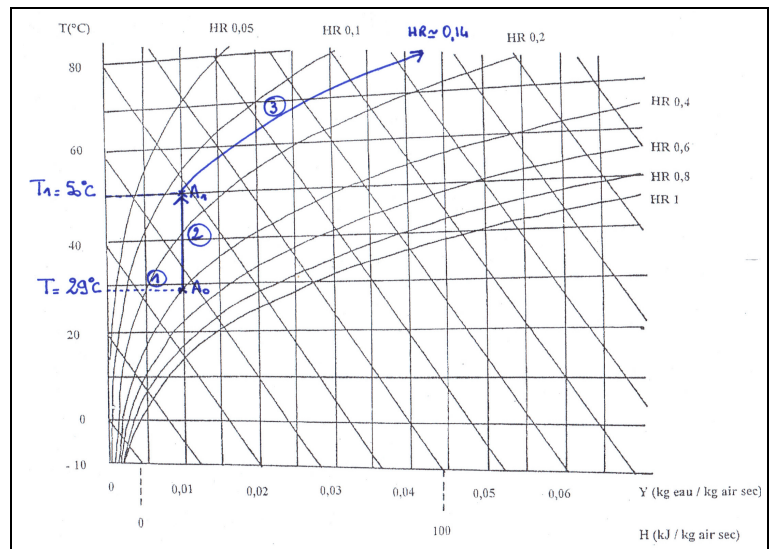
5. SUIVI DU PROCESSUS DE SECHAGE SUR LE DIAGRAMME DE MOLLIER

* Détermination de l'humidité relative de l'air chaud entrant

- ① L'air ambiant extérieur représenté par le point A_0 (A_0 est caractérisé par sa température sèche T_0 , son degré d'hygrométrie absolue x_0 , son humidité relative H_{R0}).
- ② Lors du séchage, l'air s'échauffe sans modification de son degré d'hygrométrie absolue. Juste avant le contact avec le produit il est caractérisé par le point A_1 : température sèche T_1 (température de séchage) et degré d'hygrométrie absolue x_0 .
- ③ L'humidité relative est déterminée par extrapolation grâce au point d'intersection :
 - de l'isotherme de l'air chaud
 - de l'humidité absolue

Ex : Dans un séchoir, quelle est l'humidité relative de l'air chaud entrant à 50°C sachant que la température sèche de l'air ambiant est de 29°C et que sa teneur en eau est de $0,01$ kg d'eau par kg d'air.

On trouve graphiquement $H_R = 0,14$



* Détermination de la température et de l'humidité absolue de l'air sortant du sécheur

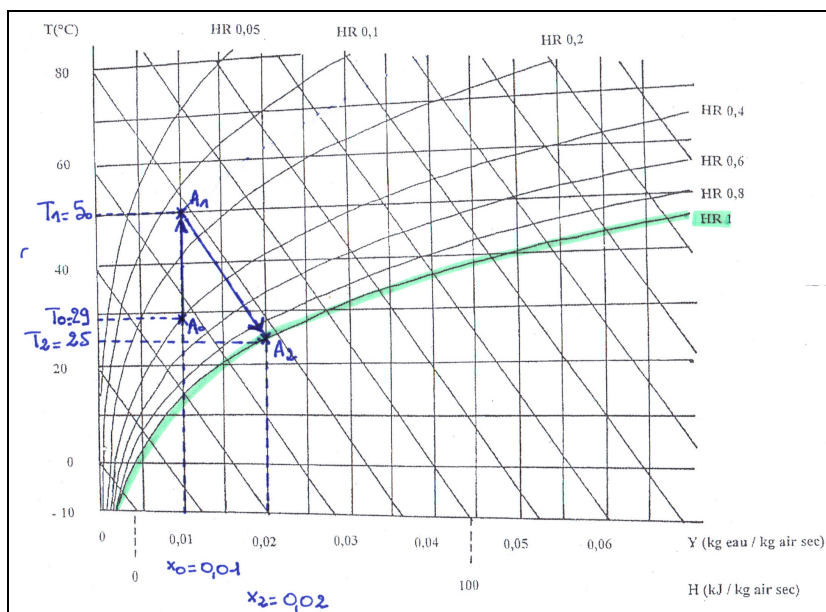
Au contact du produit humide, l'air se charge en eau jusqu'à atteindre 100% d'humidité relative (saturation).

Il cède sa chaleur pour permettre l'évaporation de l'eau. Ainsi la température de l'air diminue.

L'échange énergétique entre l'eau et l'air se fait de façon :

- isenthalpique
- jusqu'à une hygrométrie de 100%

En suivant la droite des isenthalpes jusqu'à la courbe d'humidité relative correspondante, on peut ainsi déterminer le point A_2 qui représente l'air à la sortie de l'enceinte.



Cet air a une température T_2 et une humidité relative x_2 .

Ex : Quelles est la température de l'air et quelle est sa teneur en eau en sortie d'un séchoir qui fonctionne avec une température de chauffé de 50°C et une température sèche ambiante de 29°C ? On considère que l'air se sature en eau au contact du produit ($H_R = 1$)

On trouve graphiquement :

- $T_2 = 25^\circ\text{C}$
- $x_2 = 0,02$ kg d'eau / kg d'air sec

BTS BIOQUALITE	GENIE INDUSTRIEL
Le séchage par entrainement : diagramme de Mollier	

EXERCICES

UTILISATION DU DIAGRAMME DE MOLLIER

EXERCICE 1 : DETERMINATION DES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DE L'AIR

A partir d'un point tracé sur le diagramme et caractérisant un air. Tableau à retenir.

HR	Lecture par extrapolation des courbes de saturation
Humidité absolue	Lecture verticale
Enthalpies	Lecture inclinée
Température sèche	Lecture sur les isothermes quasi horizontales
Température humide	Descendre le long de l'isenthalpe jusqu'à l'intersection avec la courbe de saturation, lire la température sur l'isotherme
Point de rosée	Descendre verticalement jusqu'à l'intersection avec la courbe de saturation

1. Soient les airs A et B placés sur le diagramme de MOLLIER, déterminer les caractéristiques de chaque air et rassembler les résultats dans le tableau ci-dessous.

Points	Humidité absolue	Humidité relative	Température humide	Température sèche	Enthalpie	Point de rosée
A						
B						

- Déterminer l'humidité relative d'un air C dont la température du thermomètre humide est de 45°C et la température du thermomètre sec est de 72°C.
- On considère de l'air à 60°C présentant une hygrométrie de 47%, déterminer la masse d'eau par kg d'air sec.

EXERCICE 2 : UTILISATION DU DIAGRAMME DE MOLLIER

Un air est à 15°C et à une humidité relative de 60

- Quelle est sa teneur en eau ?
- Quelle est son enthalpie ?
- A quelle température se trouve le point de rosée ?
- Quelle est la température du thermomètre humide ?

BTS BIOQUALITE	GENIE INDUSTRIEL
Le séchage par entrainement : diagramme de Mollier	

EXERCICE 3 : SECHAGE DE COSSETTES DE BETTERAVES

Un séchoir à air chaud sèche 1,5 tonnes / heure de cossettes de betteraves dont l'humidité est de 80%. Le débit de l'air est de 50 tonnes par heure (compté en air sec), sa température sèche est de 20°C et la température humide est de 10°C.

Après passage dans une batterie de chauffage, sa température atteint 105°C.

L'air alimente le séchoir et sort à la température de 53°C.

1. Calculer la capacité évaporatoire du séchoir.
2. Déterminer la teneur en eau du produit séché.
3. Calculer la consommation énergétique spécifique ($C_{\text{air}} = 0,28 \text{ kWh.tonne}^{-1}\text{°C}^{-1}$).
4. Calculer le rendement thermique de l'installation.

EXERCICE 4 : ATOMISATION DU LAIT

On atomise 4 tonnes par heure d'un concentré de lait écrémé à 48% d'extrait sec. On obtient une poudre de 4% d'humidité

Quelle est la capacité évaporatoire de la tour de séchage ?

L'air entre dans l'atomiseur à 195°C avec un débit de 56 tonnes à l'heure. Il en sort à 95°C.

D'autre part, les pertes thermiques entraînent une chute de température de l'air de 8°C.

Evaluer la quantité moyenne d'énergie nécessaire pour évaporer une tonne d'eau (chaleur spécifique de l'air : $0,28 \text{ kWh.tonne}^{-1}\text{°C}^{-1}$)

EXERCICE 5 : SECHAGE DE PATES ALIMENTAIRES

Des pâtes sont séchées dans un séchoir en continu.

Le débit des pâtes est de 1,5 tonnes par heure et leur humidité de 30%.

L'air extérieur, aspiré au débit de 27,3 tonnes par heure (compté en air sec) est à 16°C.

Il est chauffé dans une batterie de chauffage jusqu'à 75°C, alimente le séchoir et ressort à 40°C.

1. Sachant que l'humidité absolue W de l'air est :

- en entrée $W_e = 0,009 \text{ kg / kg air sec}$

- en sortie $W_s = 0,02 \text{ kg / kg air sec}$

Calculer la capacité évaporatoire du séchoir et en déduire la teneur en eau des pâtes en sortie du séchoir.

2. La chaleur spécifique de l'air étant de $0,28 \text{ kWh / °C/T}$, calculer le rendement thermique du séchage ainsi que sa consommation énergétique spécifique CES (par tonne d'eau évaporée).