

Mesure de l'humidité - Théorie

Loi de Dalton

L'air est un mélange de différents gaz. En conditions ambiantes normales, les gaz se comportent de manière parfaite, cela signifie que les molécules de gaz n'entrent pas en interaction et la **loi de Dalton** s'applique :

La pression totale d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles

$$p \text{ [mbar, hPa]} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots$$

La pression partielle est définie comme la pression qu'exercerait le gaz s'il remplissait à lui seul la totalité du volume.

De l'eau à l'état gazeux (vapeur) est une composante supplémentaire du mélange gazeux. En conditions normales, elle se comporte comme un gaz parfait. Avec la loi de Dalton on obtient donc pour p :

$$p \text{ [mbar, hPa]} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots + e$$

ou $p \text{ [mbar, hPa]} = p_{da} + e$

e pression partielle de vapeur d'eau

p_{da} pression partielle de l'air sec

Tension de vapeur au-dessus d'un liquide

La concentration de vapeur d'eau dans l'air est limitée. La pression partielle maximale de la vapeur d'eau est fonction de la température. De l'air à haute température peut contenir plus de vapeur d'eau que de l'air à basse température.

Ce comportement s'explique de la manière suivante :

Dans un liquide, les molécules se déplacent à des vitesses (ou avec des énergies) différentes, la valeur moyenne de cette énergie étant proportionnelle à la température du liquide (Fig. 1).

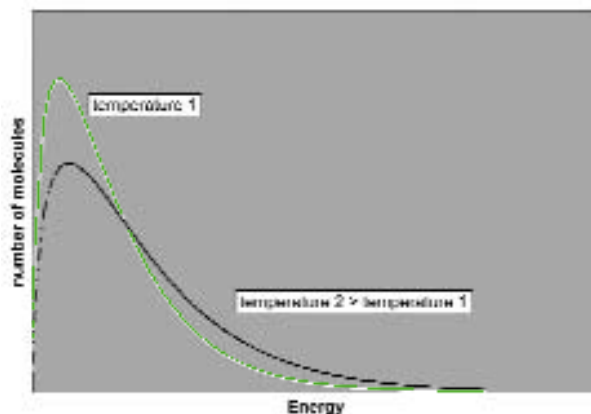


Fig.1: Répartition statistique de l'énergie des molécules dans un liquide

En fonction de l'énergie nous avons une répartition statistique des molécules d'eau.

Les molécules avec une énergie inférieure à l'énergie de liaison du liquide ne peuvent pas quitter la surface de l'eau.

Ceux avec une énergie supérieure peuvent quitter la surface. Elles s'évaporent et augmentent la pression partielle de vapeur dans l'eau (Fig. 2).

Le phénomène opposé s'applique sur les molécules de vapeur d'eau. Ceux avec une énergie inférieure à l'énergie de liaison du liquide condensent sur la surface de l'eau et diminuent la pression partielle de vapeur d'eau.

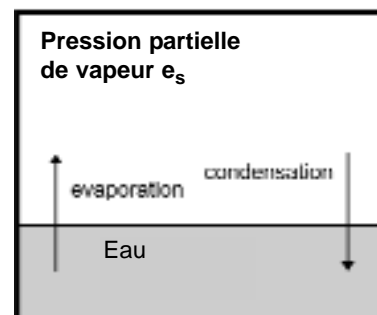


Fig.2 : Equilibre à une température T.

Dans un récipient étanche, partiellement rempli d'eau, à une température T (illustration 2), un équilibre s'établit entre l'évaporation et la condensation.

En raison de cet équilibre entre évaporation et condensation, la pression partielle de la vapeur d'eau (ou la concentration des molécules d'eau) dépend exclusivement de la température.

Plus la température est élevée, plus l'énergie des molécules d'eau est importante, c'est-à-dire qu'avec une augmentation de la température, l'équilibre se fait à une pression partielle de vapeur d'eau plus élevée.

La concentration d'équilibre la plus élevée possible à une température T est la pression de vapeur d'équilibre (elle peut être exprimée aussi en pression partielle de vapeur d'eau e ou en quantité de molécules d'eau/m³). Cette valeur ne peut pas être dépassée à cette température. Une concentration plus élevée entraînerait immédiatement de la condensation et donc un rétablissement de l'équilibre.

Cette concentration de vapeur maximale possible pour une température T est appelée concentration de saturation ou tension de vapeur de saturation au-dessus de l'eau e_{ws} lorsqu'elle est exprimée en pression partielle.

pression de vapeur saturante au dessus de l'eau e_{ws}

à une température T.

La tension de vapeur saturante e_{ws} dépend de la température de manière exponentielle : voir Tab.1.

Tension de vapeur au-dessus de la glace

A des températures inférieures à 0,01 °C (point triple de l'eau), l'eau peut exister tant sous forme liquide que solide (glace), la forme liquide n'étant alors pas stable.

Pour des températures inférieures à 0,01 °C, il existe en plus de la tension de vapeur au-dessus de l'eau une tension de vapeur au-dessus de la glace. (Tab. 2).

T [degC/°F]	e_{ws} [mbar]	T [degC/°F]	e_{ws} [mbar]
100/212	1014.19	0/32	6.112
90/194	701.82	-10/14	2.8652
80/176	474.16	-20/-4	1.2559
70/158	312.02	-30/-22	0.5103
60/140	199.48	-40/-40	0.1903
50/122	123.53	-50/-58	0.0644
40/104	73.853	-60/-140	0.0195
30/86	42.470	-70/-94	5.187E-03
20/68	23.392	-80/-112	1.190E-03
10/50	12.281	-90/-130	2.298E-04
0.01/32.018	6.117	-100/-148	3.622E-05

T [degC/°F]	e_{is} [mbar]
0.01	6.117
0/32	6.112
-10/14	2.5989
-20/-4	1.0324
-30/-22	0.3800
-40/-40	0.1284
-50/-58	0.0394
-60/-140	0.0108
-70/-94	2.615E-03
-80/-112	5.472E-04
-90/-130	9.670E-05
-100/-148	1.402E-05

Tab.1: Tension de vapeur saturante e_{ws} au-dessus de l'eau.

Tab.2: Tension de vapeur saturante e_{ws} au-dessus de la glace.

On obtient ainsi à 0,01 °C deux courbes pour la tension de vapeur saturée, qui sont représentées avec une échelle logarithmique sur l'illustration 3. De -100 °C à 100 °C, la tension de vapeur saturée augmente d'un facteur 8.

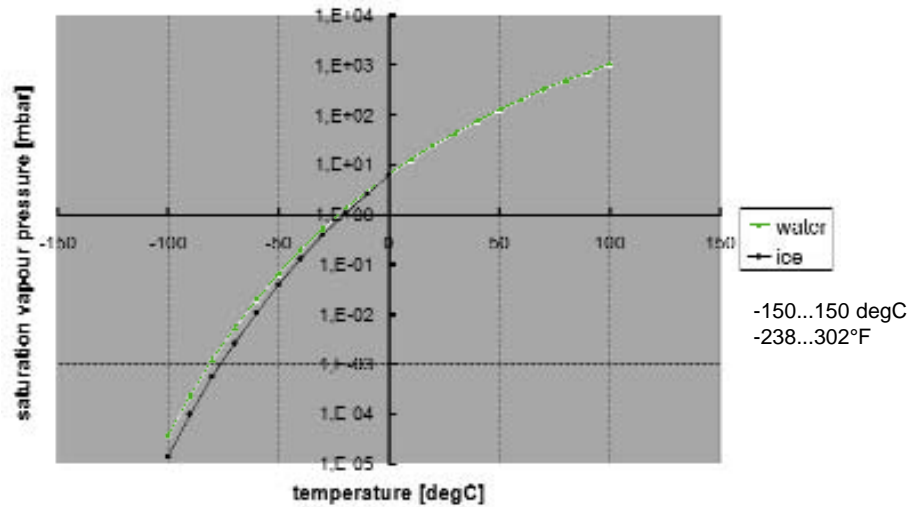


Fig.3 : tensions de saturation au-dessus de la glace et de l'eau. La courbe se divise en deux graphes sous le point triple (0,01 °C).

Correction des gaz parfaits

Jusqu'à présent, l'eau était considérée comme un gaz parfait, c'est à dire avec des molécules d'eau agissant indépendamment l'une de l'autre dans le mélange gazeux.

En réalité, il existe une faible interaction entre les molécules, en raison de laquelle la pression de vapeur saturée dans l'air augmente. Ce fait est décrit par un facteur d'agrandissement $f(p, T)$.

A pression normale, le facteur d'agrandissement est proche de 1 et peut donc être négligé. Dans ce cas, la vapeur d'eau peut être considérée comme un gaz parfait.

Paramètres de l'air humide

Humidité Relative HR [%HR]

Les valeurs enregistrées dans les tableaux 1 et 2 indiquent la pression de vapeur saturée e_{ws} de l'eau en fonction de la température. Ces valeurs maximales ne peuvent pas être dépassées. Dans le cas normal, la pression partielle de vapeur e est toutefois plus faible.

L'humidité relative est définie comme le rapport entre la pression de vapeur partielle e et la pression de vapeur saturée e_{ws} :

$$RH = (e / e_{ws}) * 100 \quad [\% \text{ HR}]$$

Humidité Absolue (densité de vapeur) dv [g/m³]

c'est la masse d'eau contenue dans 1m³ de gaz.

$$dv = mv / v \quad [\text{g/m}^3] \quad \begin{array}{l} mv... \text{ masse de vapeur d'eau} \\ v... \text{ volume d'air} \end{array}$$

Point de Rosée T_d [degC / °F]

Lorsque l'on refroidit de l'air non saturé, le taux d'humidité et la pression partielle de vapeur d'eau restent d'abord constants. L'humidité relative augmente toutefois, car l'air froid peut absorber moins d'humidité :

$$RH = (e / e_{ws}) * 100 \quad e_{ws} = e_{ws}(T) \quad [\%] \quad T \text{ diminue} \implies e_{ws} \text{ diminue} \implies RH \text{ augmente}$$

A 100% HR la tension de vapeur e dans l'air correspond à la pression de vapeur saturée au-dessus de l'eau $e_{ws}(T)$:

$$e = e_{ws}(T)$$

Si l'on continue à abaisser la température, il y a condensation.

La température du point de rosée T_d est la température à laquelle commence la condensation.

Rapport de mélange r [g/kg / gr/lb]

r représente le rapport entre l'eau présente dans l'air en grammes et la masse de l'air sec pour obtenir une certaine humidité relative ou pression partielle de vapeur e .

Enthalpie Spécifique h [kJ/kg / lbf/lb]

L'enthalpie de 1 kg d'air humide avec une humidité relative **HR** et un rapport de mélange correspondant r avec une température **T** est l'énergie nécessaire pour

- chauffer l'air sec de 0°C à T
- évaporer l'eau (chaleur latente de l'eau)
- chauffer la vapeur de 0°C à T

L'enthalpie spécifique est une valeur relative, cela signifie que seules les variations sont intéressantes et non pas la valeur absolue. La variation de l'enthalpie est la mesure de l'énergie nécessaire à transformer de l'air humide d'un état d'équilibre à l'autre.

exemple 1 :

Pour chauffer de l'air de 20 °C à 25 °C et faire passer le taux d'humidité de 40% HR à 60% HR, il faut une enthalpie spécifique de 20,2 kJ/kg.

	T [degC]	RH [%RH]	h [kJ/kg]
state 1	20	40	34.6
state 2	25	60	54.8
		difference	20.2

exemple 2 :

Avec une humidité relative constante de 40%, il ne faut que 10,3 kJ/kg pour chauffer de 20 à 25 °C.

	T [degC]	RH [%RH]	h [kJ/kg]
state 1	20	40	34.6
state 2	25	40	44.9
		difference	10.3

exemple 3 :

Réchauffage de 20 à 25 °C avec pression partielle de vapeur constante (par ex. $e = \text{const}$, $r = \text{const}$, $Td = \text{const}$), l'humidité relative baisse de 40% à 29.5% HR. Il ne faut que 5,1 kJ/kg d'énergie.

	T [degC]	RH [%RH]	h [kJ/kg]
state 1	20	40	34.6
state 2	25	29.5	39.7
		difference	5.1

Diagramme de Mollier

Un diagramme de Mollier permet de résoudre graphiquement de nombreux processus thermodynamiques de la technique de climatisation. L'ensemble des fonctions d'humidité est regroupé dans un diagramme

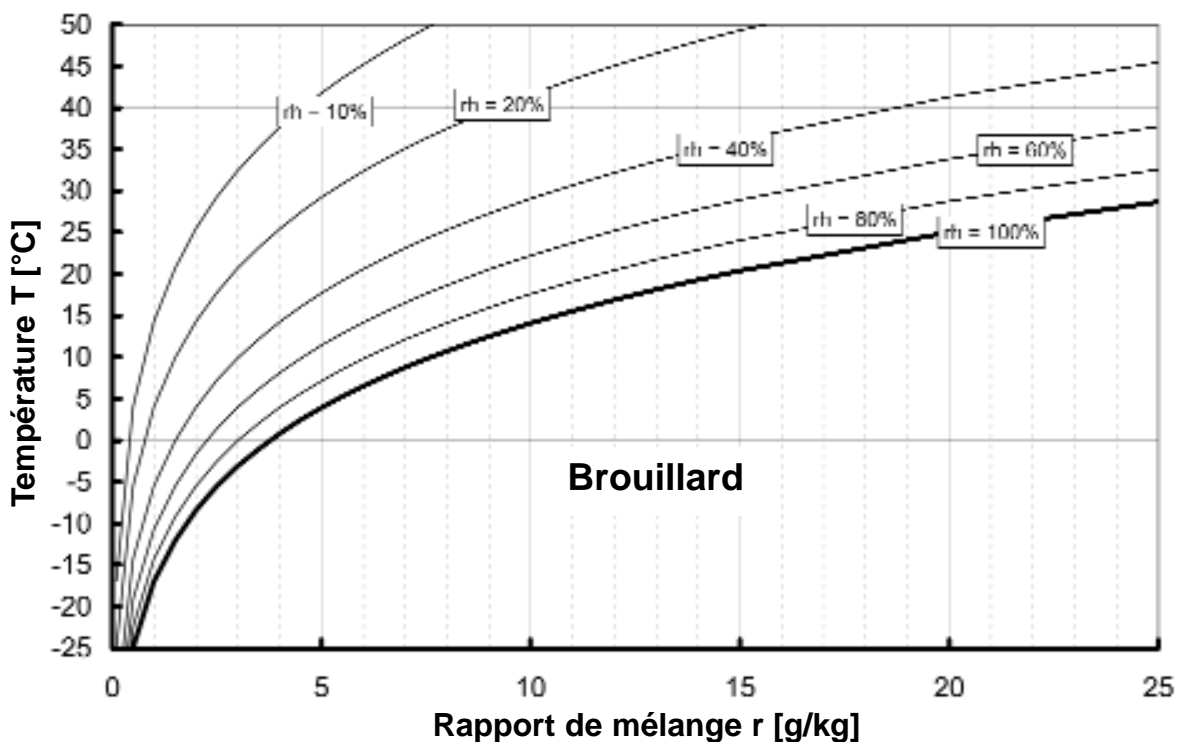


Fig. 4a : Diagramme de Mollier : courbes d'humidité constante relative. La partie située en dessous de la courbe de 100% (partie brouillard) n'est pas valide - condensation

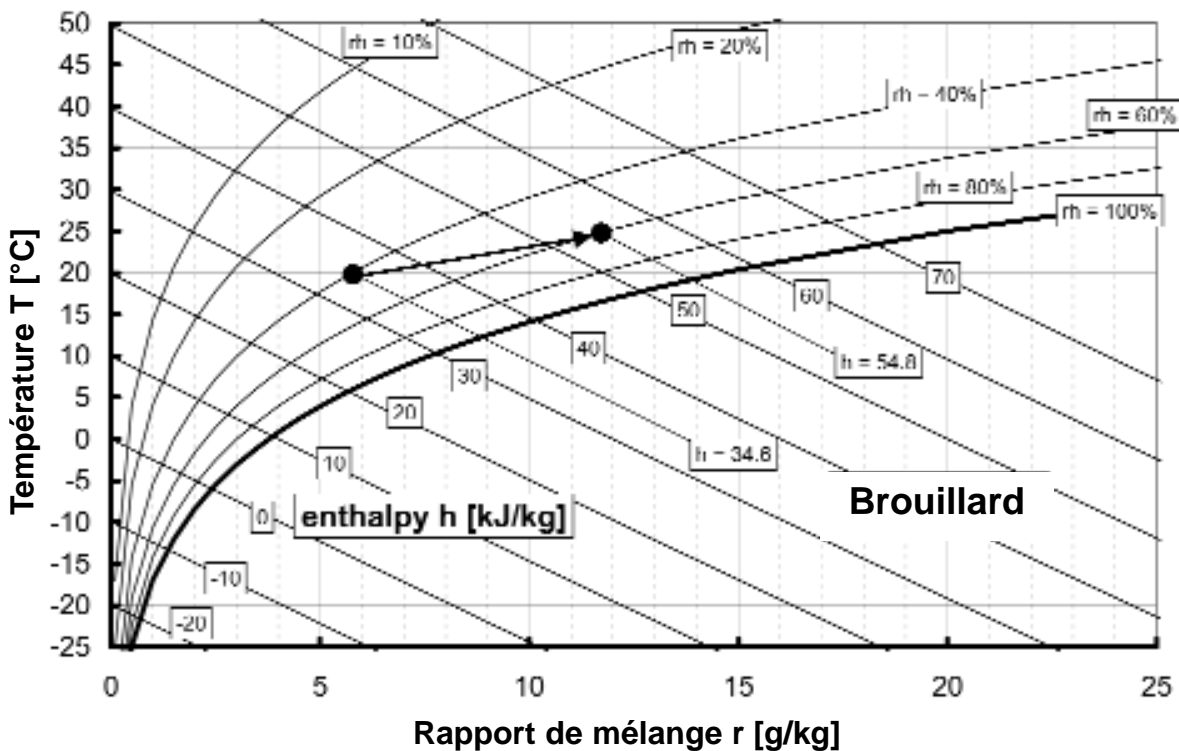
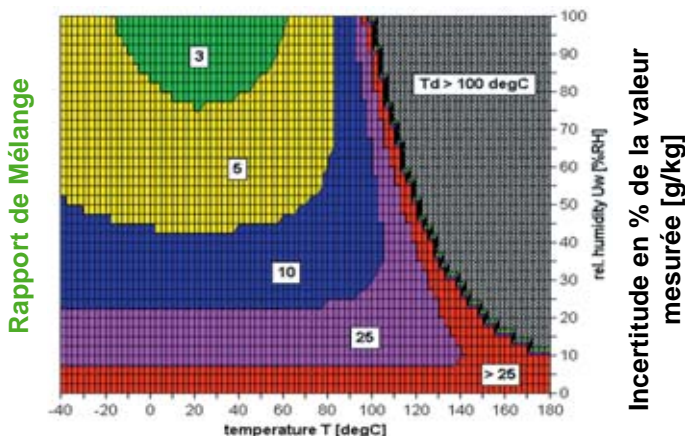
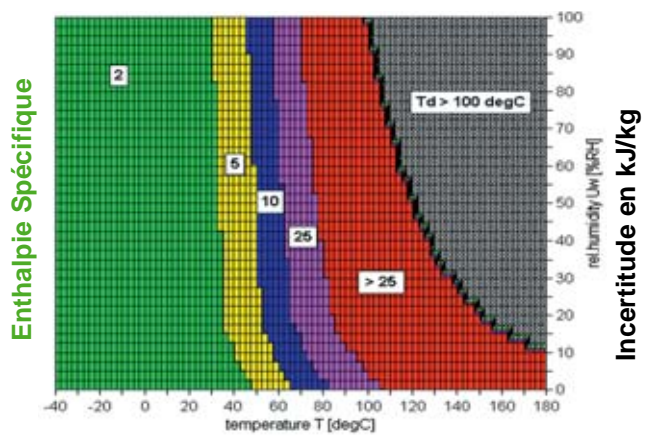
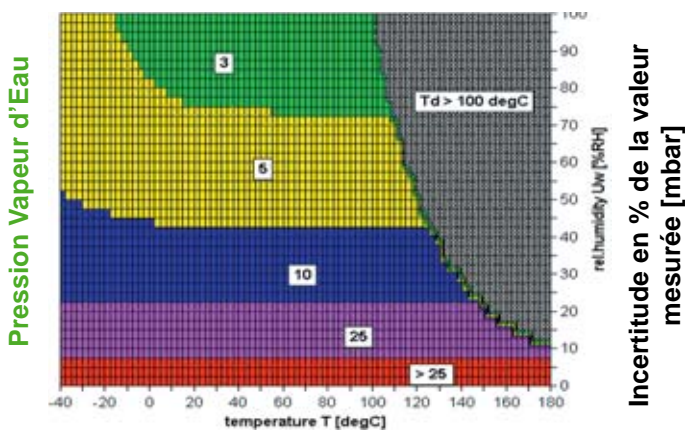
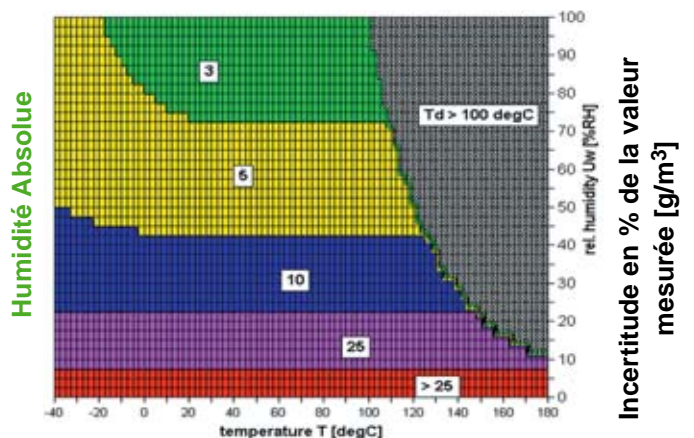
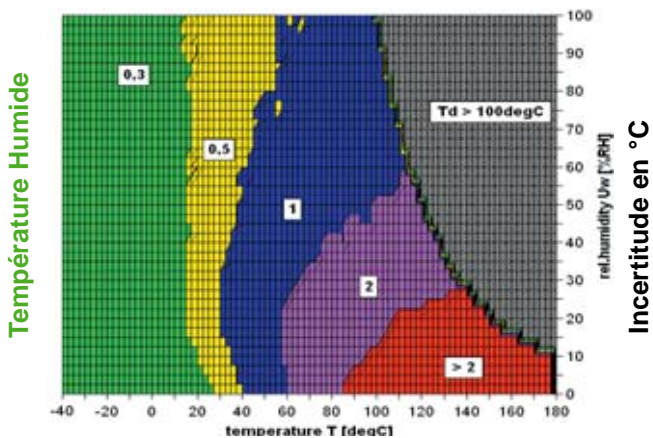
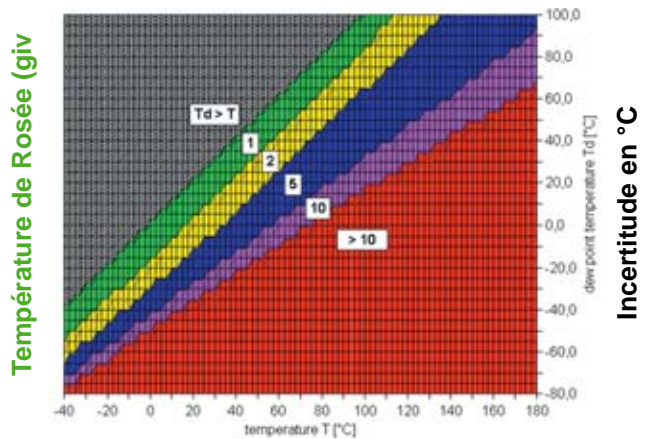
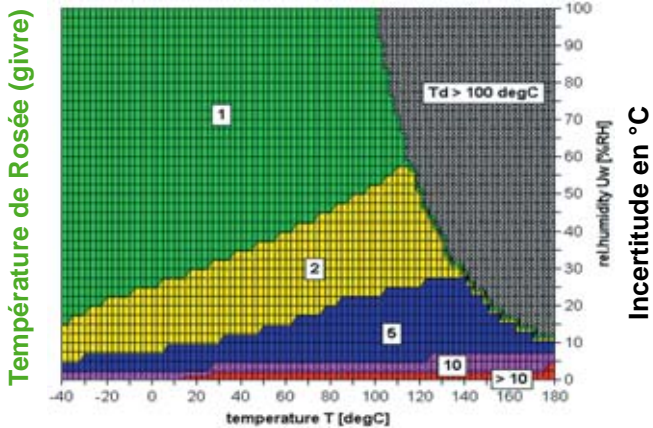


Fig. 4b : Courbes de même enthalpie rajoutées à l'illustration 4a. L'exemple 1 a également été rajouté.

Incertitude des Variables Calculées



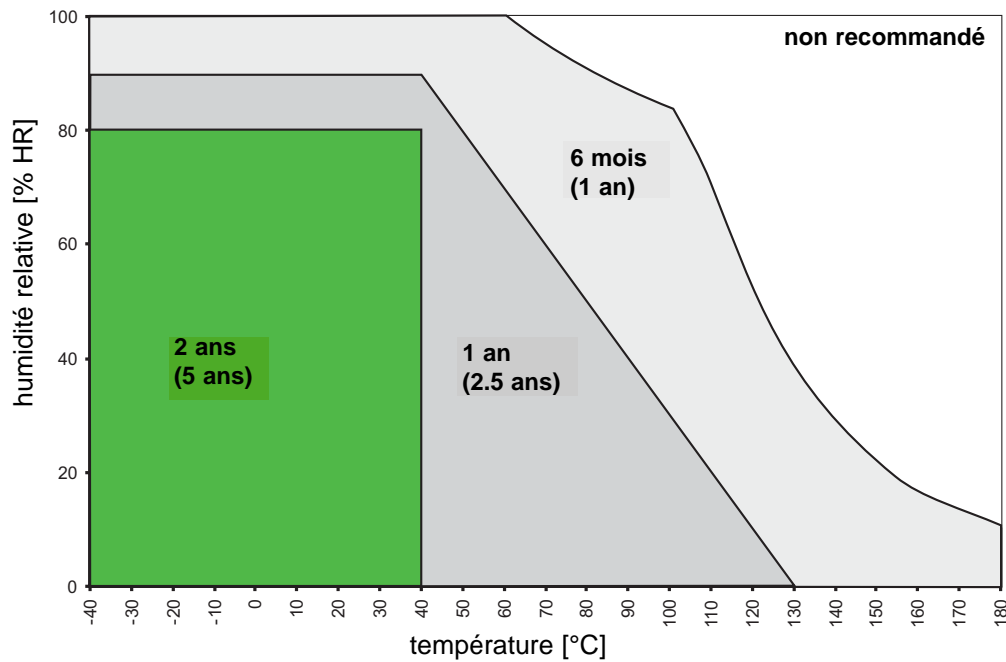
La précision des différentes fonctions de calcul dépend de la précision de mesure de l'humidité et de la température.

Les valeurs indiquées sont valables pour $\pm 2\%$ HR et $\pm 0,2$ °C.

De plus grandes précisions peuvent être atteintes par une calibration spéciale de l'humidité et de la température.

Entretien des transmetteurs HR

Grâce à leur excellente fiabilité et à leur stabilité dans le temps, les transmetteurs de température et d'humidité relative E+E ne nécessitent aucun entretien dans des conditions normales d'utilisation. Pour une utilisation en environnement très pollué, le filtre de protection doit être régulièrement remplacé par un neuf. Pour des exigences de haute-précision dans des conditions extrêmes d'humidité et de température, les transmetteurs peuvent être réétalonnés régulièrement. L'intervalle de réétalonnage peut être étendu par un étalonnage humidité élevée ou faible spécifique E+E. Le graphique suivant peut être utilisé comme guide pour l'intervalle de réétalonnage :



1ère valeur pour une précision de $\pm 2\%$ HR
Seconde valeur pour une précision de $\pm 5\%$ HR

Calibration d'Humidité - Théorie

Tout le monde reconnaît que l'humidité relative est une des valeurs physiques les plus difficiles à calibrer. Dans la pratique, il est bien plus compliqué d'obtenir une humidité définie qu'une pression ou une température définie, par exemple. Il existe différentes possibilités de représenter l'humidité, toutes les méthodes classiques nécessitant une grande stabilité et une mesure précise de la température.

Solutions salines saturées

Dans une chambre étanche partiellement remplie d'une solution saline saturée, on obtient une humidité relative avec une bonne précision dans le volume gazeux au-dessus de la solution saline saturée. Cette humidité relative dépend de la nature du sel utilisé et de la stabilité de la température de la chambre de mesure. L'homogénéité de la température doit être supérieure à 0,5°C pour avoir une précision de $\pm 2\%$ HR.

Solutions salines non saturées

Au lieu de solutions salines saturées, on peut également utiliser une solution LiCl non concentrée. L'humidité relative souhaitée est déterminée par la concentration de la solution.

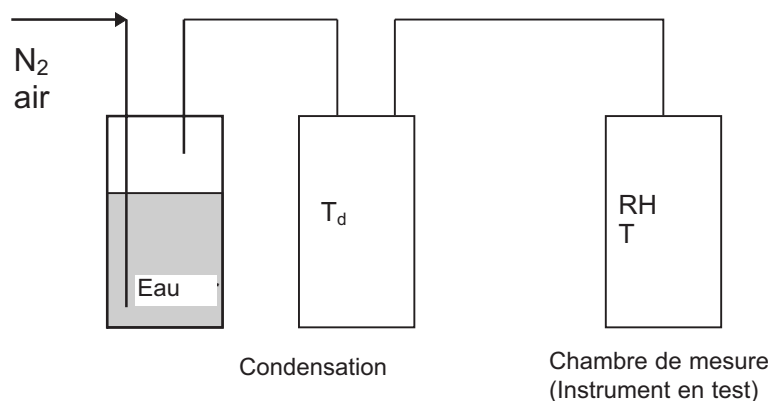
Générateur de mélange

Un flux gazeux (air ou azote) est divisé en deux flux partiels, dont l'un est saturé d'humidité (100% HR) et l'autre, par contre, est complètement asséché (0% HR). Ces deux flux partiels sont ensuite de nouveau mélangés dans la chambre de mesure. L'humidité relative désirée peut être réglée en variant le rapport du mélange.

Générateur à deux températures

Un flux gazeux (air ou azote) est saturé d'humidité puis refroidi jusqu'à la température du point de rosée T_d correspondant à l'humidité relative désirée à la température T . L'excédent d'humidité se condense et la pression partielle de vapeur d'eau correspond alors à la pression de vapeur saturée.

L'air saturé est chauffé à la température T et la pression partielle de vapeur d'eau correspond à l'humidité relative souhaitée. (principe du inverse du miroir à point de rosée).



Dans un réacteur à deux températures construit de manière idéale, la précision ne dépend que de la mesure de deux températures (T , T_d).

La longue durée de stabilisation lors d'une modification de l'humidité désirée constitue un inconvénient.

Générateur à deux pressions

De l'air à une pression **p1** constitué d'air sec et de vapeur d'eau à une pression **e** est détendu à une pression **p2**. Au cours de la détente, toutes les composantes de l'air sont détendues avec le même rapport **p2/p1**, ce qui signifie que la pression de vapeur **e** est également détendue.

Etat initial :

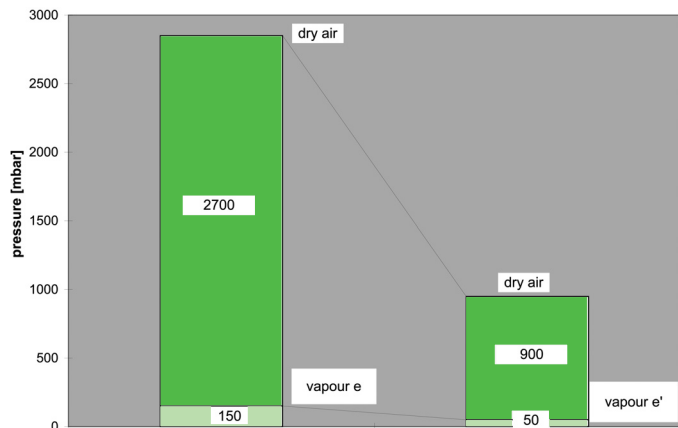
pression totale **p1 = pda + e**

Etat après détente :

pression totale **p2 = p1 * p2/p1 = p2/p1 * (pda + e)**

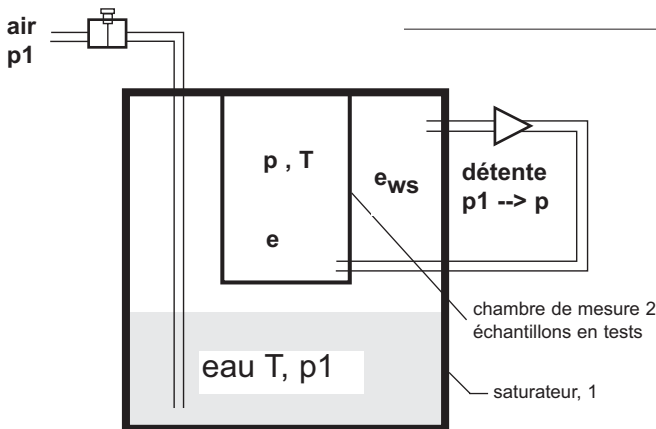
Après la détente, la pression de vapeur de l'air humide se réduit à :

$$e' = p2/p1 * e$$



Générateur d'humidité à deux pressions HUMOR 20

Le générateur d'humidité HUMOR 20 se compose de deux chambres, l'une étant montée dans l'autre.



Représentation schématique d'un réacteur à deux pressions

De l'air ou de l'azote est admis à une pression **p1** à travers une chambre de saturation remplie d'eau 1. La pression partielle de vapeur d'eau **e_ws** est au maximum, HR est à 100%.

L'air saturé est ramené à la pression ambiante **p** par l'intermédiaire d'une valve de détente et introduit dans la chambre de mesure. En raison de leur construction, la chambre de saturation et la chambre de mesure sont à la même température. Dans ces conditions, la pression partielle de vapeur d'eau **e_ws** est réduite dans la même proportion que la pression totale et on a alors :

$$e = e_{ws} * p/p1$$

En conséquence **RH = e/e_ws = p/p1**

L'humidité relative générée dépend donc du rapport des deux pressions, ce qui permet un temps de stabilisation très court. En réglant la pression **p1**, on amène l'humidité relative dans la chambre de mesure à la valeur souhaitée. La pression partielle de saturation **e_ws** ne dépend que dans une faible mesure de la pression. Cette correction est effectuée à l'aide d'un microprocesseur.

Une mesure reproductible des pressions s'effectue à l'aide de deux capteurs de pression très stables à long terme. L'humidité de l'air générée est déterminée à partir des deux valeurs mesurées.