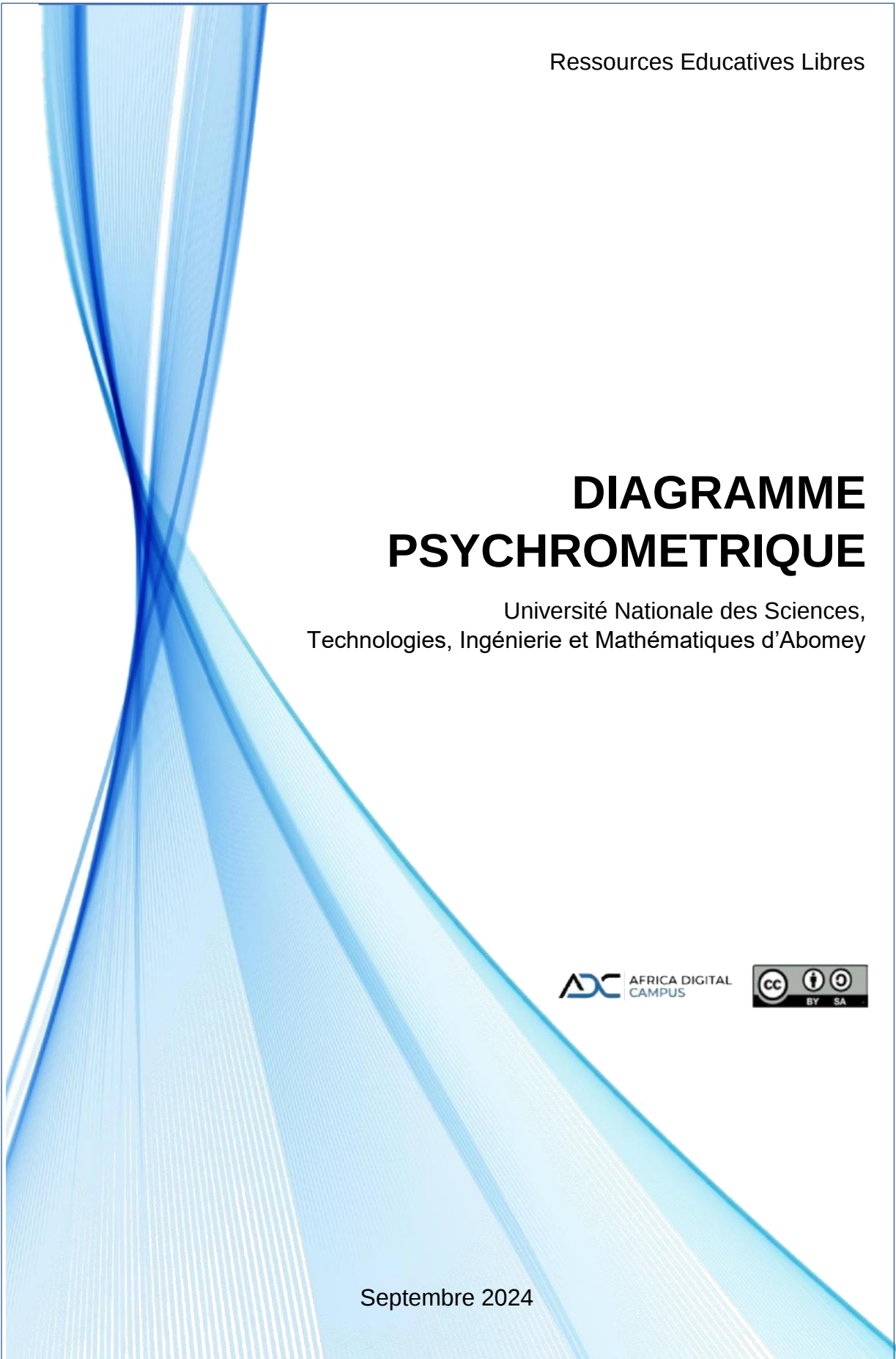




Ressources Educatives Libres

DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE

Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey



Septembre 2024

Table des matières

I. INTRODUCTION	4
II. QUE COMPRENDRE DE LA PSYCHROMETRIE ?	4
III. CLARIFICATION CONCEPTUELLE.....	4
IV. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET THERMODYNAMIQUES DE L'AIR HUMIDE	5
V. ETUDE DU DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE.....	7
VI. APPLICATIONS DU DIAGRAMME CARRIER.....	11
VII. CONCLUSION.....	11

OBJECTIFS DE COURS

Les objectifs visés par ce cours sont :

- s'approprier les différentes méthodes de détermination des propriétés de l'air humide ;
- déterminer les propriétés physiques d'un mélange d'air.

ÉLÉMENTS DE COURS

Dans cette séquence, les points ci-après seront abordés :

- Classification des thèmes ;
- Propriétés et caractéristiques physiques de l'air ;
- Etude du diagramme psychométrique ;
- Etude de cas.

I. INTRODUCTION

Les soucis de confort thermique et de climatisation sont très fréquents dans les bâtiments contemporains. C'est dans l'optique de propositions de solutions efficaces à ces soucis qu'interviennent l'étude de l'air humide et du diagramme psychrométrique. Il s'agit d'un outil fondamental dans la compréhension des propriétés de l'air frais et dans la conception des systèmes de chauffage, ventilation et climatisations (CVC). Dans cette partie du cours, sera présentée l'étude dudit diagramme ainsi que la détermination des principales caractéristiques physiques et thermodynamiques de l'air humide.

II. QUE COMPRENDRE DE LA PSYCHROMETRIE ?

La psychrométrie désigne l'ensemble des caractéristiques physiques et thermodynamiques d'un mélange gaz-vapeur. L'air humide étant un mélange gaz-vapeur, l'étude de ses caractéristiques est appelée « psychrométrie ». Un des premiers appareils permettant de mesurer deux grandeurs fondamentales de l'air humide est le psychromètre. Pour ce faire, on utilise des procédés pour chauffer, refroidir, humidifier et déshumidifier l'air. Pour faciliter la représentation des transformations de l'air et le calcul des différents éléments de l'installation de climatisation, on utilise le « diagramme psychrométrique » de l'air humide.

III. CLARIFICATION CONCEPTUELLE

Il s'agit essentiellement des mots clés en lien avec la psychrométrie :

✓ *Psychrométrie*

La psychrométrie est une branche de la science qui étudie les propriétés thermodynamiques de l'air humide. Elle permet de comprendre comment l'humidité, la température et la pression de l'air interagissent. C'est l'ensemble des caractéristiques d'un mélange gaz-vapeur, utiles pour concevoir le confort humain dans les bâtiments.

✓ *Diagramme Psychrométrique*

Le diagramme psychrométrique encore appelé diagramme de l'air humide est un graphique représentant les propriétés de l'air humide en fonction de la température sèche et de l'humidité relative pour une pression donnée. En effet, il permet de déterminer graphiquement, avec une assez bonne précision, toutes les caractéristiques de l'air en connaissant au moins deux d'entre elles. Ce diagramme permet également de reproduire graphiquement les évolutions de l'air au cours d'un traitement. Il a été établi pour une masse d'air sec de 1 kg et une pression atmosphérique souvent égale à la pression atmosphérique normale (101325 Pa), donc une altitude de 0m. Au-delà, il faut apporter des corrections. C'est l'outil indispensable de tout technicien en génie climatique.

✓ **Psychromètre**

Le psychromètre est un instrument qui permet de mesurer l'humidité relative de l'air ainsi que d'autres données énergétiques de l'air humide. Il est composé de deux thermomètres fixés à un support unique : un thermomètre dit sec et un second dit mouillé (humide).

Le premier, mesure seulement la température de l'air, tandis que le second est maintenu humide à l'aide d'une mousseline imbibée d'eau par exemple. Lorsque cette eau s'évapore, elle refroidi le thermomètre mouillé. Plus l'air est sec, plus l'évaporation est importante et plus la température du thermomètre mouillée est basse. L'écart entre les deux mesures est alors élevé. En revanche à cent pourcents (100%) d'humidité, la température de l'air et celle donnée par le thermomètre humide (mouillé) sont identiques. Pour déterminer l'humidité, il faut avoir recours à une table psychométrique qui en donne la valeur en fonction des différences des températures affichées.

Psychromètre : Pour mesurer la température sèche et la température humide de l'air

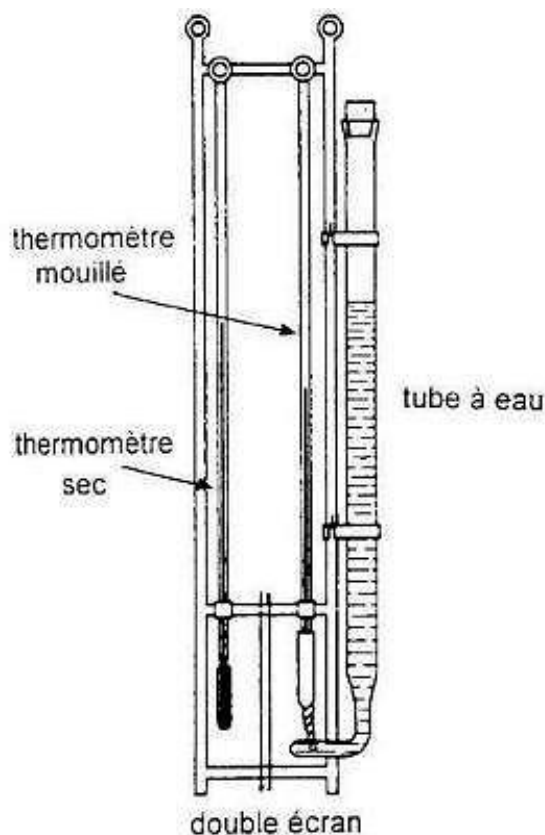


Figure 1: Schéma du psychromètre

IV. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET THERMODYNAMIQUES DE L'AIR HUMIDE

Les caractéristiques principales de l'air humide concernent en générale :

- **La température de l'air sec (t_s)** : C'est la température donnée par un thermomètre sec placé dans un courant d'air humide et protégé des rayonnements parasites (venant d'objets froids ou chauds comme le soleil).

- **La température de l'air humide (t_h)** : C'est la température de l'air circulant au-dessus d'une grande surface d'eau à l'état liquide dans un système calorifugé. C'est par exemple la température indiquée par un thermomètre placé dans un linge humide soumis à un courant d'air.
- **La température de rosée (t_r)** : C'est la température à laquelle un air humide est à la pression de vapeur saturante. À cette température l'air ne peut plus emmagasiner de la vapeur d'eau sans que celle-ci ne se condense.
- **L'humidité relative (hydrométrie) (h_r)** : C'est le rapport entre la quantité d'eau présente dans l'air et la quantité maximale d'eau que l'air pourrait contenir à la même température. C'est aussi le rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante.
- **L'humidité absolue (teneur en eau) (w)** : Encore appelée « rapport de mélange » noté Y, elle représente la quantité d'eau contenue dans l'air, exprimé en gramme (s) de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec.
- **L'enthalpie spécifique (h)** : Elle correspond à l'énergie contenue dans le fluide dans un état donné (température, pression... fixés).
- **Le volume spécifique (V_s)** : C'est le volume d'air humide par unité de masse d'air sec.

En connaissant seulement (02) deux de ces caractéristiques de l'air, on peut retrouver l'ensemble des autres propriétés de l'air humide grâce au diagramme. Outre celles-ci, il existe de nombreuses d'autres caractéristiques influant le comportement physique et thermodynamique de l'air humide. On peut faire cas de la :

- **La densité de Vapeur d'Eau (ρ)** : Elle représente la masse de vapeur d'eau par unité de volume d'air. Elle est généralement exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3) et est directement liée à la teneur en humidité de l'air. Plus l'air est humide, plus la densité de vapeur d'eau est élevée.
- **La masse Volumique (ρ)** : Elle représente la quantité de masse d'air par unité de volume. Elle est généralement exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). Elle varie en fonction de la température, de la pression et de la teneur en humidité. Plus l'air contient de vapeur d'eau, moins sa masse volumique est élevée.
- **L'entropie (s)** : L'entropie de l'air humide est une mesure du désordre thermodynamique de l'air. Elle est généralement exprimée en joules par kilogramme par kelvin ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$). L'entropie augmente avec l'humidité de l'air et est souvent utilisée pour déterminer la qualité de la vapeur d'eau contenue dans l'air.
- **La capacité thermique** : Également connue sous le nom de capacité calorifique de l'air humide, elle mesure la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'une unité de masse d'air humide d'une certaine quantité. Elle est essentielle pour comprendre comment l'air humide réagit aux changements de température et dépend de sa composition, à savoir la proportion d'air sec et de vapeur d'eau.

V. ETUDE DU DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

En génie civil et en ingénierie du chauffage, de la ventilation et de la climatisation (CVC), le choix entre le diagramme psychrométrique de Carrier et le diagramme psychrométrique de COSTIC dépend souvent des préférences du concepteur ou de l'ingénieur, ainsi que des normes et pratiques en vigueur dans une région ou une entreprise spécifique. Les deux diagrammes sont des outils psychrométriques qui servent à représenter les propriétés de l'air humide, notamment la température de bulbe sec, la température de bulbe humide, l'humidité relative et d'autres variables liées à l'air humidifié.

En effet, Le diagramme psychrométrique de COSTIC, est moins courant et est principalement associé à des utilisations spécifiques ou à des préférences personnelles généralement européenne et asiatique. Il peut être utilisé par certains professionnels du secteur, mais il n'est pas aussi répandu que le diagramme de CARRIER, qui par contre est très répandu et largement utilisé dans l'industrie de la CVC et est souvent recommandé dans de nombreuses normes et références techniques. Beaucoup d'ingénieurs et de concepteurs sont familiers avec ce diagramme et l'utilisent de manière régulière. Il fera donc l'objet principal de notre étude.

Les données du diagramme de CARRIER dépendent de la pression atmosphérique. Chaque diagramme de CARRIER est donc défini à une pression atmosphérique P donnée. Généralement, on utilise la pression atmosphérique au niveau de la mer, soit $P = 1013$ HPa.

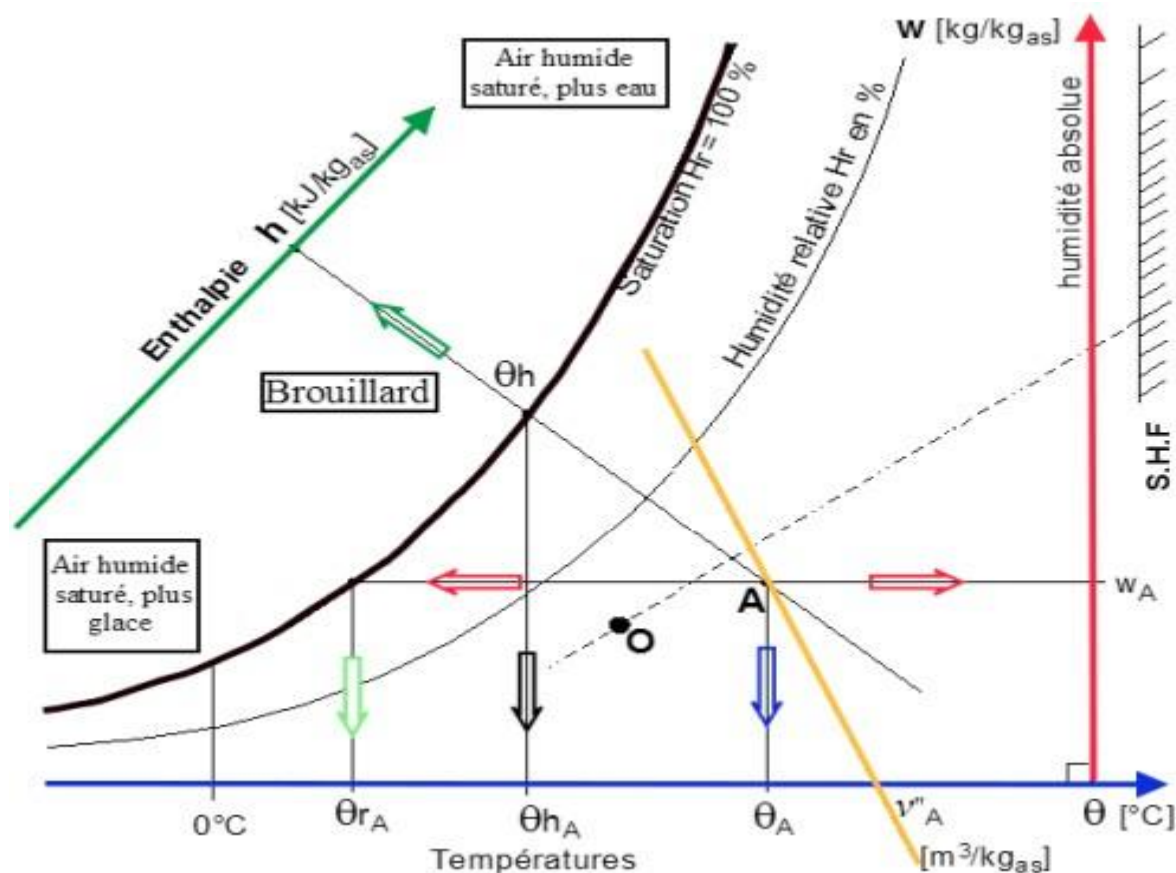


Figure 2: Diagramme psychrométrique

Le point A, situé ici aléatoirement sur le graphique, correspond à une situation donnée de l'état de l'air reportée sur le diagramme de CARRIER. Pour pouvoir placer un point sur le graphique, il faut connaître au moins deux des valeurs du diagramme, présentées ci-dessous.

Axe de température sèche θ (Axe horizontal bleue : Cf. Figure 2)

La température sèche est mesurée dans un environnement sec. Elle est notée θ ou t_s et s'exprime en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). L'axe est gradué de -15°C à 55°C . Toutes les lignes verticales parallèles à l'axe, appelées **isothermes (en rouge)**, représentent donc des zones à température sèche constante (elles ne sont pas dessinées sur ce graphique)

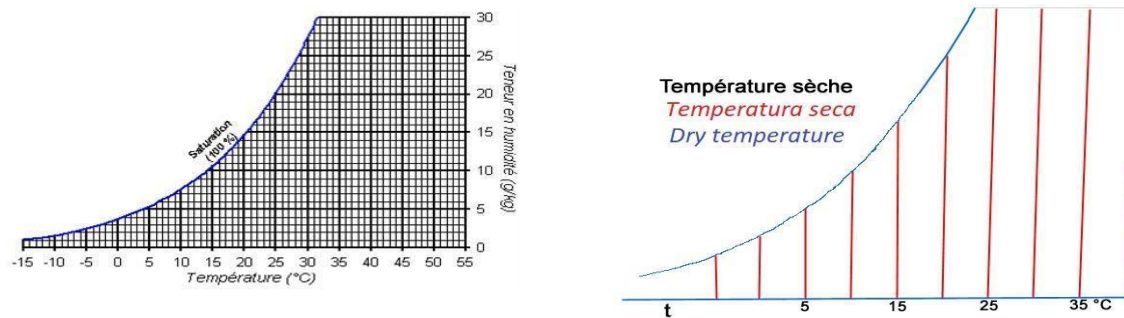


Figure 3: Axe des températures sèches & isothermes

Axe d'humidité absolue ou teneur en eau w (Axe vertical rouge : Cf. Figure 2)

L'humidité absolue correspond à la quantité de vapeur contenue dans 1 kilogramme d'air sec. Elle est notée w et s'exprime en kilogramme de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec (kg/kg. as). L'axe est gradué de 0 g/kg à 30 g/kg. Les lignes horizontales parallèles à l'axe représentent donc des données à teneur en humidité constante et sont appelées **isohyde**.

Courbe d'humidité relative ou hygrométrie H_r (Courbe fine bleue : Cf. Figure 4)

L'humidité relative correspond au rapport entre l'humidité absolue de l'air étudié et l'humidité maximale (absolue de saturation). Elle est notée H_r et s'exprime en pourcentage (%). Toutes les courbes qui suivent celle tracée sur le diagramme sont nommées iso-degré et correspondent à des valeurs d'hygrométrie constante.

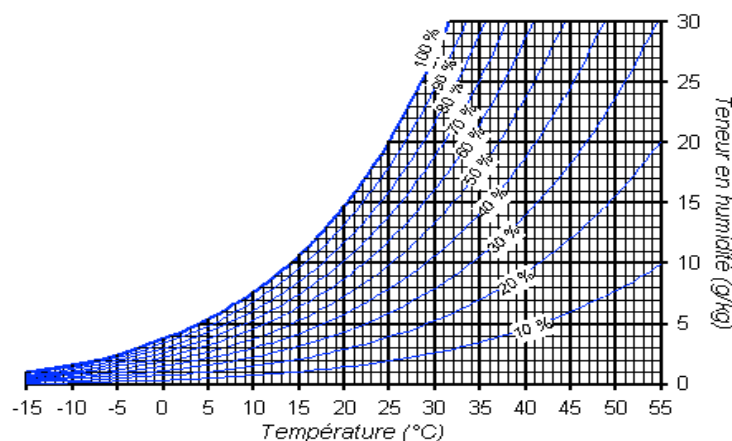


Figure 4: Illustration de l'humidité relative en bleue

✚ Limite de saturation de l'air $H_r = 100\%$ (Courbe en bleue)

L'air contient toujours une petite proportion de vapeur d'eau, mais celle-ci est limitée. Lorsque l'humidité relative atteint 100 %, l'air est totalement saturé d'eau : c'est la saturation de l'air limite, représentée sur le schéma par la courbe noire en gras. Au-delà de cette valeur, on dit que l'air est sursaturé et il y a formation de brouillard (sur le graphique, il s'agit de la zone à gauche de la courbe limite de saturation de l'air). Comme on peut le déduire par lecture graphique, lorsque la température sèche du local augmente, l'air a une capacité de saturation supérieure.

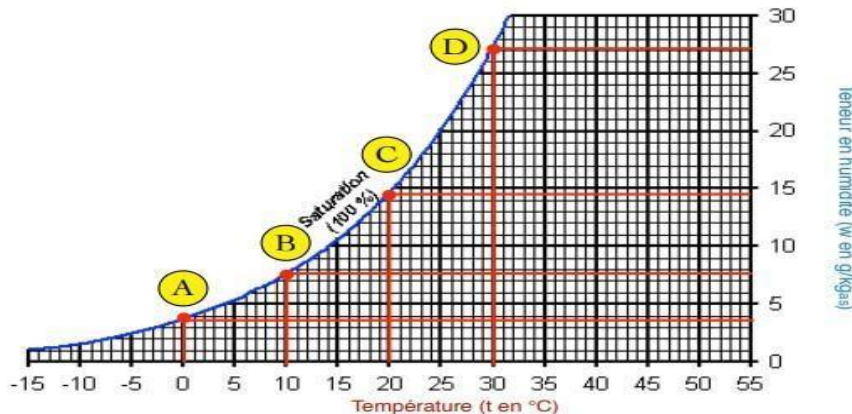


Figure 5: Illustration de la courbe de saturation en bleue

✚ Axe d'enthalpie h (Flèche oblique vert : Cf. Figure 2)

L'enthalpie correspond à la quantité d'énergie contenue dans l'air. Elle est notée h et s'exprime en kilojoules par kilogramme d'air sec (kJ/kgas). Par convention, lorsque la température est égale à 0 °C et que l'air est sec, l'enthalpie est nulle. Elle peut également prendre des valeurs négatives. Toutes les lignes perpendiculaires à l'axe de l'enthalpie sont appelées **isenthalpiques**. Pour déterminer l'enthalpie grâce au graphique, il faut tracer une ligne perpendiculaire à l'axe de l'enthalpie qui passe par le point A (voir flèche vert foncé sur le graphique). Le croisement entre cette ligne et l'axe de l'enthalpie correspond à la valeur d'enthalpie de l'air étudié.

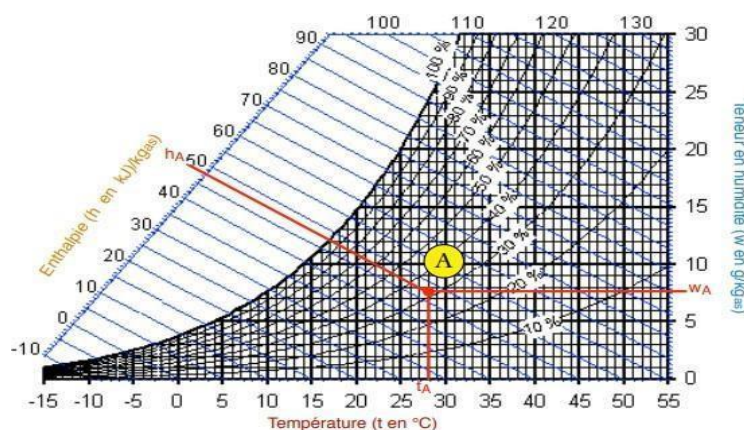


Figure 6: Illustration de l'enthalpie & isenthalpiques

+ Volume spécifique de l'air (Ligne Oblique Orange : Cf. Figure 2)

Le volume spécifique de l'air est le volume occupé par 1 kg d'air humide. Il s'exprime en m^3/kg . Le volume spécifique de l'air augmente si la température ou l'humidité absolue augmente.

+ Température de rosée θ_r (Flèche vert clair : Cf. Figure 2)

La température de rosée, ou point de rosée, est la valeur à partir de laquelle l'eau contenue dans l'air se condense et forme du brouillard. Connaître le point de rosée permet notamment de déduire la température nécessaire de l'échangeur (batterie froide) du climatiseur pour déshumidifier l'air. Pour lire la température de rosée sur le graphique, il faut suivre les isothermes jusqu'à la courbe limite de saturation de l'air. La projection sur l'axe de température sèche correspond à la température de rosée (voir flèche vert clair sur le diagramme)

+ Température humide θ_h (Flèche noire : Cf. Figure 2)

La température humide, ou température du thermomètre mouillé, est la température lue sur un thermomètre dont le bulbe est recouvert d'un coton humide, qu'on ventile pour faire évaporer l'eau. On peut déterminer la température humide par lecture graphique. Elle correspond à la projection sur l'axe de température sèche du point de croisement entre l'isenthalpique passant par le point A et la courbe limite de saturation (voir diagramme)

+ Température sèche θ (Flèche bleue : Cf. Figure 2)

Comme décrite plus haut, la température sèche correspond à la température donnée par un thermomètre placé dans un flux d'air sec. Elle se lit simplement en projetant le point A sur l'axe de température sèche (voir flèche bleue sur le diagramme).

NB : La relation suivante est toujours vraie : $\theta_r < \theta_h < \theta$.

+ Température du point de rosés en degré °C

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau dans l'air commence à se condenser lorsque l'air se refroidit. En d'autres termes, c'est la température (pour un taux d'humidité donné w) à laquelle la vapeur atteint la pression de vapeur saturante.

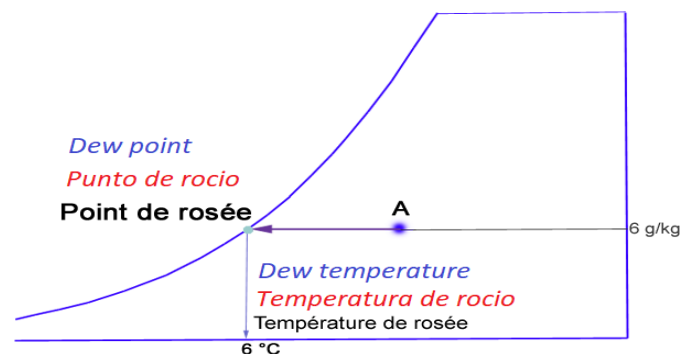


Figure 7: Illustration de la température de rosée

Température du bulbe humide en °C

La température de bulbe humide est la température lue sur un thermomètre (appelé thermomètre psychrométrique) dont le bulbe est recouvert de coton saturé d'eau et placé dans un flux d'air. En effet, l'air en contact avec le bulbe produit une évaporation qui fait baisser la température du bulbe, qui se stabilise lorsque l'air devient saturé.

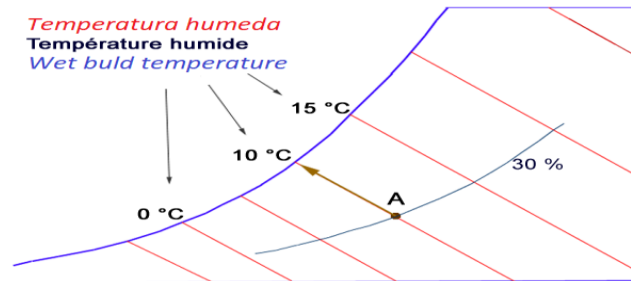


Figure 8: Illustration de la température humide

VI. APPLICATIONS DU DIAGRAMME CARRIER

Les applications du diagramme de CARRIER sont nombreuses. C'est un outil précieux pour analyser et comprendre les systèmes dynamiques et pour connaître les principales propriétés de l'air humide telles que :

- ♦ Humidité absolue ;
- ♦ Humidité relative ;
- ♦ Limite de saturation ;
- ♦ Enthalpie ;
- ♦ Température sèche ;
- ♦ Température humide ;
- ♦ Température de rosée.

À partir de la connaissance de deux de ces données, le technicien peut déduire toutes les autres caractéristiques par lecture graphique afin de diagnostiquer la qualité de l'air mais aussi de suivre les évolutions des propriétés de l'air en cours de traitement (notamment le mélange adiabatique avec condensation, le refroidissement avec déshumidification et la récupération d'énergie). Aujourd'hui, il existe des logiciels informatiques qui permettent d'obtenir des résultats extrêmement précis à partir du diagramme d'air humide.

VII. CONCLUSION

Le diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique permet de visualiser un ensemble de caractéristiques de l'air en rapport avec sa température et son humidité. Lesdites caractéristiques sont celles que l'on rencontre couramment dans les problèmes de confort humain et de climatisation. Il incombe donc à tout technicien et/ou toutes autres personnes adhérant à un projet de construction d'un ouvrage d'une quelconque nature de tenir compte de toutes ses caractéristiques pour éviter les problèmes d'inconfort humain et de climatisation. Pour ce faire, la connaissance et la maîtrise du diagramme est incontournable.