

# Fiche-guide de TD sur la climatisation

## 1) Objectifs du TD

L'objectif est d'étudier deux cycles de climatisation (un pour l'été et un pour l'hiver), et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec Thermoptim.

Signalons tout de suite qu'il n'existe pas dans Thermoptim de pictogrammes pour représenter les transformations subies par un gaz humide, de telle sorte qu'il n'y aura pas de schéma associé à ces modèles. Dans ces exemples, ne pouvant pas nous servir de l'éditeur de schémas, il nous faudra travailler directement dans l'environnement du simulateur.

Le présent document est un extrait de la fiche-guide complète avec résultats, qui est réservée aux enseignants. C'est pour cette raison que la numérotation des figures comporte des lacunes.

## 2) Références

M. DUMINIL *Air Humide*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 2 220.

AICVF *Conception des installations de climatisation, et de conditionnement de l'air*, Collection des guides de l'AICVF, PYC Edition, Paris, octobre 1999.

R. CASARI *Cahier Technique, données théoriques et technologiques, conduite de projets, mallette pédagogique Conditionnement d'air*, septembre 1992, Paris, Documentation interne, École des Mines de Paris.

## 3) TD principal

### 3.1 Enoncé

La conception d'une installation de climatisation comporte une série d'étapes distinctes :

- il faut tout d'abord déterminer les conditions climatiques de référence qui seront utilisées pour calculer les charges enthalpiques et hydriques. En pratique, on se base sur les données climatiques publiées par les services météorologiques nationaux, que l'on corrige éventuellement comme indiqué ci-dessous. Les valeurs à prendre en considération ne sont pas les conditions extrêmes mais celles susceptibles d'être atteintes ou dépassées quelques jours par an en moyenne. Pour l'hiver, des corrections doivent être apportées aux températures pour les sites en altitude (- 1 °C tous les 200 m) et pour les villes (+ 1 à 2 °C selon la taille de l'agglomération), et une estimation des humidités relatives peut être obtenue simplement (100 % au bord du littoral ou d'un lac, 90 % ailleurs) ;
- les conditions d'ambiance doivent ensuite être définies. Pour les applications industrielles ou spécifiques, on se reportera aux indications des Guides de l'AICVF. Pour la climatisation de confort, on notera que la plupart des personnes en bonne santé ne ressentent pas de différence notable tant que l'humidité relative reste comprise entre 30 et 60 % et que la température est inférieure à 25 °C. En première approximation on pourra donc choisir pour l'été une température de 25 °C et une humidité relative de 60 %, et pour l'hiver une température de 19 ou 20 °C et une humidité relative de 30 % ;
- une fois ces valeurs choisies, il devient possible de calculer les charges enthalpiques et hydriques (on se référera aux Guides de l'AICVF ou aux méthodes proposées par le CSTB pour le calcul détaillé des déperditions thermiques d'un bâtiment). La charge enthalpique  $Q$  est alors donnée par l'équation (3.1), dans laquelle  $\varphi_p$  représente les pertes par les parois,  $\varphi_i$  les pertes par infiltration d'air (qui ne doivent surtout pas être confondues avec celles dues au renouvellement d'air qui sont implicitement prises en compte par la méthode de calcul),  $\varphi_s$  les apports solaires et  $P$  l'ensemble des apports internes dus aux occupants, à l'éclairage, aux appareils ménagers, machines, équipements de bureautique...

$$Q = \varphi_p + \varphi_i + \varphi_s + P \quad (3.1)$$

- la droite de soufflage peut alors être déterminée, en effectuant les bilans suivants (les notations sont celles de la section 4.8.7 du tome 1) :

bilan sur l'eau :  $\dot{m}_{\text{eau}} = \dot{m}_{\text{air}} (w_{\text{su}} - w_1)$

bilan enthalpique :  $\dot{m}_{\text{air}} (q'_{\text{su}} - q'_1) = \dot{Q} + \dot{m}_{\text{eau}} h_{\text{eau}}(t_1)$

et en éliminant le débit d'air on obtient le rapport de pente  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{\Delta q'}{\Delta w} = \frac{\dot{Q} + \dot{m}_{\text{eau}} h_{\text{eau}}(t_1)}{\dot{m}_{\text{eau}}} \quad (3.2)$$

Dans le diagramme psychrométrique, la droite de soufflage est la droite de pente  $\gamma$  qui passe par le point représentatif de l'ambiance désirée. Chacun des points de cette droite correspond à un débit de soufflage différent.

Le choix de ce débit dépend de différents facteurs, comme par exemple l'écart de température maximal admissible pour éviter tout désagrément (généralement de 6 à 12 °C selon la technique employée), ou le taux de brassage requis (généralement compris entre 3 et 20 volumes/heure) pour assurer une bonne homogénéité sans faire de courants d'air ;

- une fois le point de soufflage déterminé, il reste à choisir un traitement d'air permettant d'amener un mélange d'air extérieur et d'air intérieur dans cet état. Le taux de recirculation de l'air dépend des contraintes d'hygiène. Plus il est important, plus la dépense énergétique le sera aussi. Les exemples qui suivent montrent comment les traitements élémentaires peuvent être combinés pour former une gaine de traitement d'air convenable. On notera qu'en première approximation le ventilateur réchauffe d'environ 1 °C l'air véhiculé. En hiver cela se traduit par un moindre besoin de chauffage, et en été par un besoin de refroidissement plus important.

Il existe de nombreux cycles de climatisation possibles, et leur présentation dépasserait le cadre de cet ouvrage. Nous nous contenterons donc de présenter deux exemples correspondant à des installations typiques de refroidissement d'été et de chauffage hivernal.

Les équations gouvernant les transformations subies par l'air humide ont été établies dans la fiche sur les propriétés des mélanges humides. Thermoptim dispose des écrans permettant de les résoudre.

## 3.2 Cycle de climatisation d'été

L'installation que nous allons étudier correspond à un grand bâtiment comme un aéroport, situé dans un endroit chaud et humide, que l'on désire climatiser.

Les données du problème sont les suivantes : on cherche à maintenir l'ambiance intérieure du bâtiment à la température de 24 °C et une humidité relative égale à 50 %. Les conditions climatiques extérieures sont les suivantes : température égale à 30 °C et humidité relative de 80 %. Il faut évacuer des apports thermiques internes et externes d'une puissance globale de 162,6 kW, ainsi qu'une quantité d'eau égale à 60 kg/h, soit 0,01667 kg/s.

Sachant que, pour des questions d'hygiène et de confort, la température de soufflage ne doit pas être inférieure à 14 °C, et que la proportion d'air recyclé ne doit pas dépasser 70 %, le but de l'exercice est de déterminer :

- les conditions de soufflage ;
- un dispositif de traitement du mélange air extérieur/air recyclé.

Un traitement possible de l'air mélangé consiste à le refroidir, en condensant l'eau en excédent, jusqu'à obtenir l'humidité spécifique correspondant aux conditions de soufflage, puis à le réchauffer jusqu'à la température de soufflage. Il en existe d'autres, mais c'est celui-ci qui sera présenté ici.

### 3.2.1 Principe des calculs

La première étape consiste à déterminer les conditions de soufflage. On sait que, dans un système d'axes ( $w, q'$ ), et tant qu'il n'y a pas sursaturation, le point représentatif du mélange est le barycentre des deux points représentatifs des deux mélanges humides, affectés des coefficients égaux à leurs débits massiques. Il en résulte que les trois points sont alignés, et que la détermination du mélange peut se faire simplement graphiquement dans un diagramme des mélanges humides utilisant ce système d'axes. Le calcul conduit aux valeurs suivantes : un débit de 12 kg/s, une humidité spécifique  $w = 0,0079$ , et une température  $t = 14$  °C.

La seconde étape permet de calculer l'état de l'air mélangé (section 4.8.2 du tome 1). On obtient une humidité spécifique  $w = 0,013$ , et une température  $t = 25,8$  °C.

Le dispositif de traitement de l'air choisi suppose de refroidir l'air mélangé en le déshumidifiant jusqu'à  $w = 0,0079$ , puis de le réchauffer jusqu'à  $t = 14$  °C.

La batterie de refroidissement choisie a une température de surface de 7 °C. Un refroidissement théorique parfait dans une batterie de dimension infinie conduirait à refroidir le mélange humide jusqu'à la température de la batterie à l'état saturé. On a coutume de qualifier une transformation réelle en prenant ce refroidissement théorique comme référence, en introduisant une efficacité  $\varepsilon$  de la batterie froide (ici 75 %). Son calcul montre que le mélange est alors refroidi à 11,7 °C.

Lorsque vous lancez Thermoptim, l'écran suivant s'affiche :

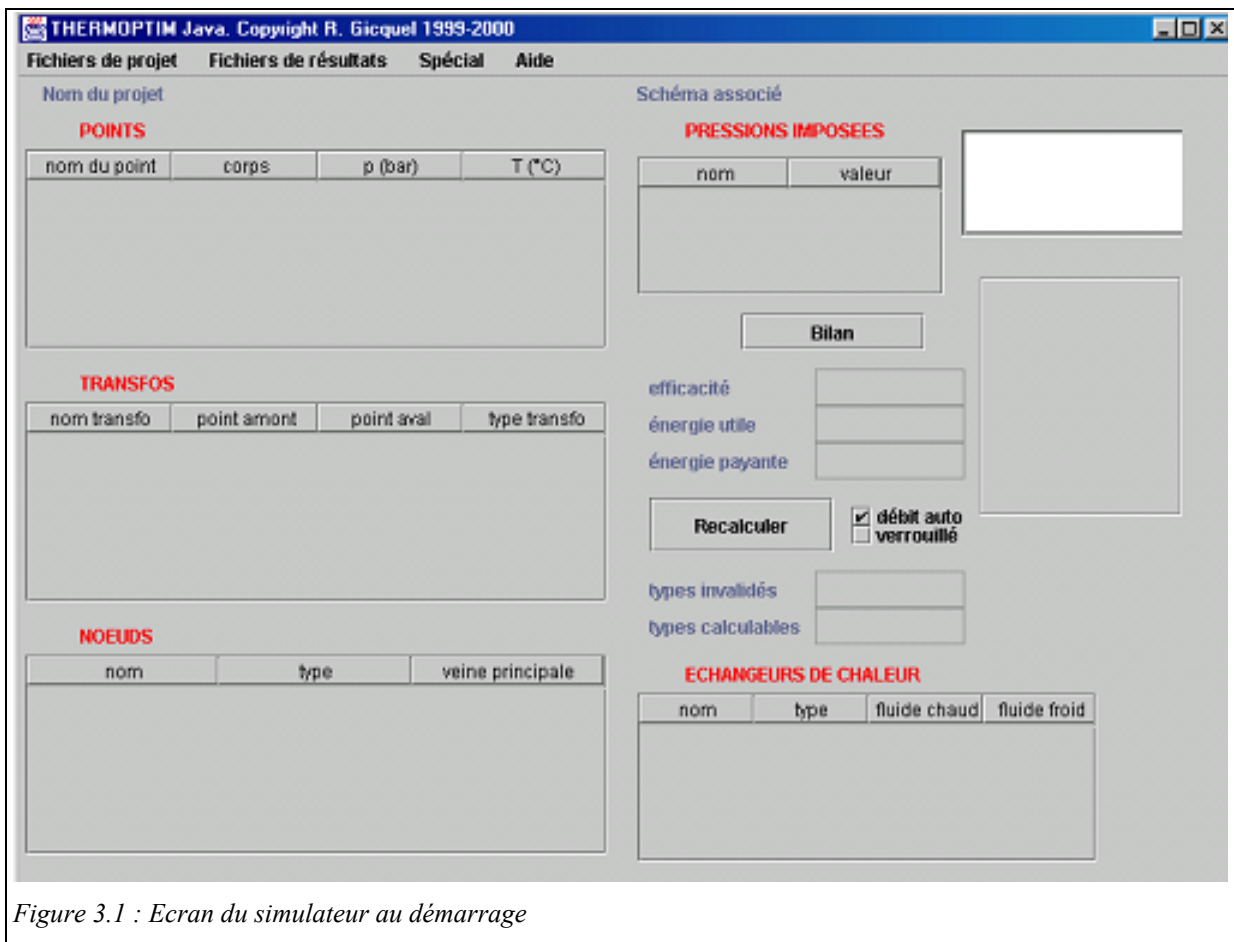


Figure 3.1 : Ecran du simulateur au démarrage

Commencez par nommer le nouveau projet, en l'appelant par exemple "climatisation". Pour cela, tapez Ctrl N ou activez la ligne "Nouveau projet" du menu Fichiers de projet, puis entrez le nom.

Dans ce qui suit, tous les points partageront le même gaz sec, l'air, et la même pression, 1 atm.

### 3.2.2 Conditions de soufflage

Commencez par créer deux points intitulés "air intérieur" et "air extérieur", en imposant leurs températures et humidités relatives respectives, ainsi qu'un troisième point, intitulé "soufflage", avec comme température 14 °C.

Pour cela, double-cliquez dans le bandeau de la table des points, entrez les noms du point et du corps. Pour ce dernier, vous pouvez soit le sélectionner dans la liste des corps de la base, qui s'affiche si vous double-cliquez

dans le champ du nom, ou l'entrer directement vous-même. Dans ce dernier cas, il faut que vous tapiez un retour à la ligne à la suite du nom, pour que ThermoOptim sache que la saisie est terminée.

Entrez alors les valeurs de la température et de la pression, et calculez alors le point, puis sélectionnez l'onglet "Gaz humides", et entrez soit l'humidité spécifique  $w$  si vous la connaissez, soit l'humidité relative  $\epsilon$ . Selon le cas, cliquez alors sur "imposer  $w$ " ou "imposer  $\epsilon$ ", pour que les propriétés humides du point soient calculées.

Pour le premier point, par exemple, vous obtenez le résultat de la figure 3.2.

Ensuite, créez une transfo humide de type soufflage, reliant les points "air intérieur" et "soufflage". Entrez les valeurs des charges thermique et hydrique dans le cadre approprié, avec un signe négatif car il s'agit de charges à évacuer, et choisissez le mode de calcul "Calculer les conditions de soufflage, la température de soufflage étant connue", puis cliquez sur "Calculer".

La transfo est calculée. Le débit de soufflage est déterminé, ainsi que l'humidité du point "soufflage" :

L'écran du point "soufflage" est alors mis à jour (figure 3.4)

### 3.2.3 Propriétés du mélange (air extérieur / air recyclé)

La première étape du traitement de l'air consiste à calculer les propriétés du mélange (air extérieur / air recyclé), qui sera ensuite refroidi. Le calcul du mélange se fait dans un noeud particulier, appelé mélangeur humide. Comme tous les noeuds, sa définition comporte deux parties : la veine principale et les branches.

Commencez par créer la transfo humide de type refroidissement dans laquelle il débouche. Créez pour cela deux nouveaux points, appelés "air mélangé" et "air refroidi", connectez-les en amont et aval de cette transfo, qui devient la veine principale. Construisez ensuite deux transfos-points associées aux points "air extérieur" (débit 0,3) et "air intérieur" (débit 0,7), et connectez les comme branches du mélangeur.

Une fois le mélangeur construit, vous pouvez le calculer (figure 3.5).

L'état du point que vous obtenez en sortie du mélangeur est donné figure 3.6.

### 3.2.4 Traitement de l'air

Le problème consiste maintenant à savoir comment traiter l'air de mélange ( $25,8\text{ °C}$ ,  $w = 0,013$ ) pour obtenir les conditions de soufflage.

Une solution consiste à le refroidir jusqu'à ce que son humidité spécifique soit égale à celle de l'air de soufflage, puis à le réchauffer pour obtenir la température désirée.

Imposez l'humidité spécifique de l'air refroidi, puis choisissez dans la transfo "refroidissement" une température de surface de batterie froide réaliste (par exemple  $7\text{ °C}$ ), prenez comme débit le débit de soufflage calculé précédemment, sélectionnez le mode de calcul approprié pour que THERMOPTIM recherche l'efficacité de batterie requise, et calculez la transfo.

Vous obtenez la température de l'air refroidi et l'efficacité de la batterie froide (figure 3.7).

Pour déterminer l'échauffement à fournir, il ne reste plus qu'à relier le point "air refroidi" et le point "soufflage" par une transfo humide de type chauffage, de même débit.

### 3.2.5 Représentation sur diagramme psychrométrique

Retournez dans l'écran principal du projet "climatisation", et ouvrez le diagramme psychrométrique en passant par l'interface Diagrammes / Simulateur.

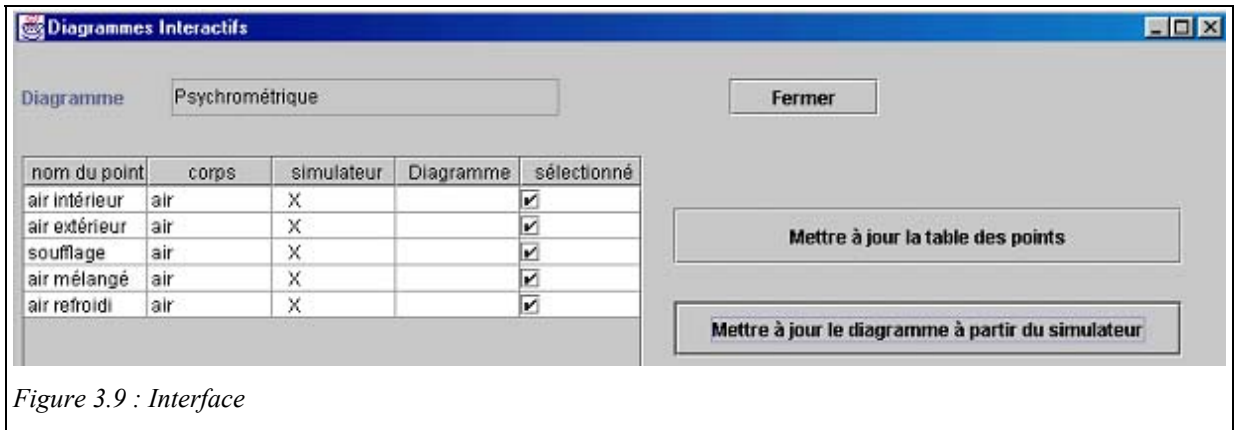


Figure 3.9 : Interface

Mettez à jour la table des points, puis le diagramme à partir du simulateur. Choisissez enfin "Points reliés" dans le menu "Cycle". Le tracé du cycle sur le diagramme psychrométrique est donné figure 3.10.

Le cycle de traitement de l'air est représenté sur le diagramme, l'air mélangé se trouvant comme il se doit sur la droite de mélange qui relie l'air intérieur et l'air extérieur.

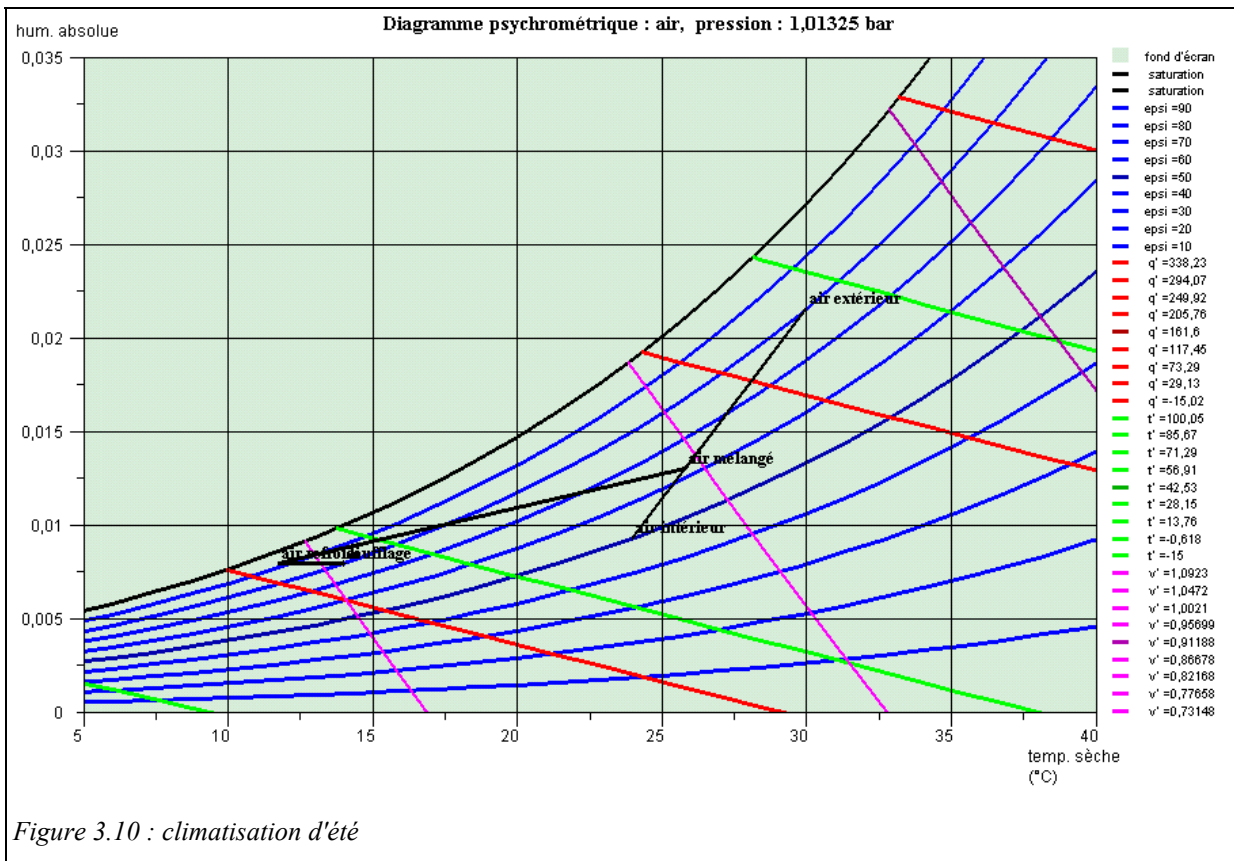


Figure 3.10 : climatisation d'été

### 3.3 Cycle de climatisation d'hiver

L'installation que nous allons étudier correspond à un grand bâtiment comme une banque, situé dans un endroit froid et humide, que l'on désire chauffer. Pour cela, on dispose d'un circuit de ventilation qui permet de souffler de l'air en différents endroits du bâtiment. Pour des raisons d'hygiène, il est nécessaire de renouveler l'air, mais une partie peut cependant être recyclée, ce qui permet de réduire les besoins de chauffage.

On recycle donc une partie de l'air intérieur, que l'on mélange à de l'air extérieur, auparavant préchauffé pour éviter tout risque de condensation sur les gaines ou de grippage des registres. Ce mélange doit être traité avant d'être injecté dans le circuit de ventilation, afin que son état corresponde aux conditions de soufflage. Celles-ci sont calculées de telle sorte que soient compensées les charges thermiques externes en tenant compte des apports internes. On suppose que la charge hydrique est nulle et que la température de soufflage est égale à 27 °C.

Un traitement possible de l'air mélangé consiste à l'humidifier de manière adiabatique jusqu'à obtenir l'humidité spécifique correspondant aux conditions de soufflage désirées, puis à le réchauffer jusqu'à la température de soufflage. Il en existe d'autres, mais c'est celui-ci qui sera présenté ici.

Les données du problème sont les suivantes : on cherche à maintenir l'ambiance intérieure du bâtiment à la température de 20 °C et une humidité relative égale à 30 %. Les conditions climatiques extérieures sont les suivantes : température égale à - 10 °C et humidité relative de 90 %. Il faut fournir un apport thermique d'une puissance de 100 kW hors renouvellement d'air, mais pas d'eau. Pour éviter toute condensation parasite, l'air neuf est préchauffé à 14 °C.

Sachant que, pour des questions d'hygiène et de confort, la proportion d'air recyclé ne doit pas dépasser 70 %, le but de l'exercice est de déterminer :

- les conditions de soufflage ;
- un dispositif de traitement du mélange air extérieur/air recyclé.

On considèrera que le ventilateur de soufflage réchauffe l'air de 1 °C.

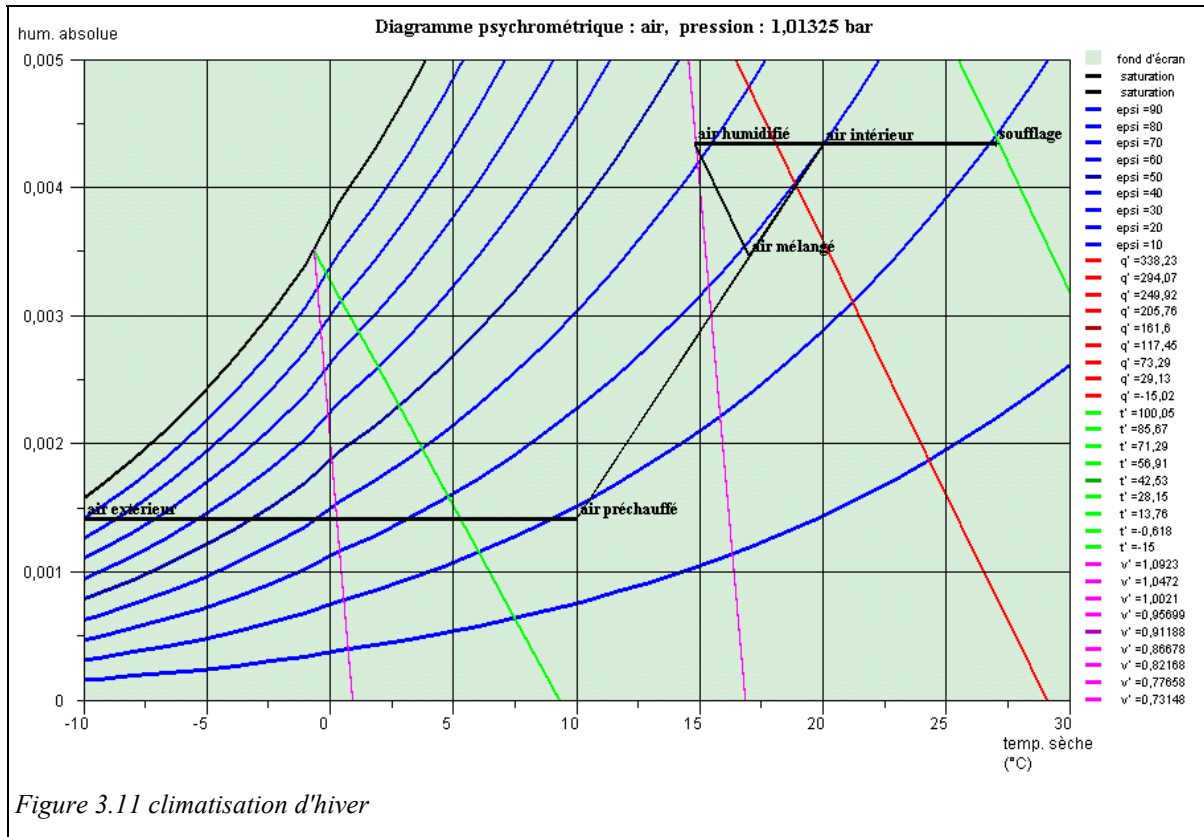
Les deux premières étapes sont analogues à celles de l'exemple précédent. Le calcul des conditions de soufflage fournit le débit d'air, l'humidité spécifique, et la température.

L'humidité spécifique de l'air extérieur est  $w = 0,0014$ . Il est préchauffé jusqu'à 14 °C. Pour l'air intérieur recyclé  $w = 0,0043$ . Compte tenu du taux de recirculation, l'humidité du mélange peut être déterminée, ainsi que sa température.

Il est donc nécessaire d'humidifier le mélange, par exemple dans un humidificateur adiabatique, d'efficacité 23,7 %, portant la température du mélange humidifié à une valeur appropriée. Rappelons qu'une humidification adiabatique est obtenue en pulvérisant de l'eau pour former une pluie qui vient asperger l'air, l'apport de chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau étant fourni par l'air. À l'instar de ce qui est fait pour le refroidissement d'un mélange humide, la référence est une humidification théorique conduisant l'air à la saturation, l'humidification réelle étant caractérisée par son efficacité  $\epsilon$ .

Un complément de chauffage portant le mélange à 19 °C (pour tenir compte de l'apport du ventilateur de chauffage) est alors nécessaire.

Le tracé du cycle sur le diagramme psychrométrique est donné figure 3.11.



#### 4) Fichiers de travail

Les fichiers de projet des modèles ThermoOptim de ces cycles sont joints au dossier dans l'archive Climatisation.zip