

- 📖 **Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. (GRET, 1995)**
 - ➔ **Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le séchage**
 - ☐ **Chapitre IX: Éléments d'approfondissement de la théorie du séchage**
 - 📄 **(introduction...)**
 - 📄 **Lectures du diagramme enthalpique de l'air humide**
 - 📄 **Lecture de courbes de sorption-désorption**
 - 📄 **Utilisation conjointe des courbes de sorption-désorption et du diagramme de l'air pour évaluer la fin du séchage et le pouvoir séchant moyen de l'eau**
 - 📄 **Compléments sur l'énergie solaire**
 - ☐ **Chapitre X: Mesurer et contrôler le séchage**
 - 📄 **(introduction...)**
 - 📄 **Le bilan matière**
 - 📄 **Le rendement thermique**
 - ☐ **CHAPITRE XI: Exemples de calculs**

 **Exemple n° 1: Sèchage tout solaire (9 heures de rayonnement suffisant par jour)**

 **Exemple n° 2: Données**

**Sècher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements.
(GRET, 1995)**

Troisième partie: Quelques notions approfondies sur le sèchage

Chapitre IX: Éléments d'approfondissement de la théorie du sèchage

Ce chapitre se compose d'informations qui, pour la plupart, ont été soit fournies de façon simplifiée dans la partie précédente, soit seulement évoquées.

Elles ont été regroupées en quatre sections:

- lectures du diagramme enthalpique de l'air humide;**
- lectures des courbes de sorption-désorption;**
- utilisation conjointe des courbes de sorption-désorption et du diagramme de l'air humide pour la détermination de la fin du sèchage et de l'enlèvement moyen de l'eau au cours, de ce sèchage;**

- compléments sur l'énergie solaire.

Lectures du diagramme enthalpique de l'air humide

Le diagramme enthalpique de l'air 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, sa teneur en eau maximale, son pouvoir évaporatoire et son enthalpie. Il faut dans un premier temps rappeler la définition de chacune de ces grandeurs.

RAPPEL DES DÉFINITIONS

On définit par « pouvoir évaporatoire » de l'air sa capacité à absorber de l'eau placée en son contact, mesurée en grammes d'eau supplémentaires qu'il peut absorber, par mètre cube d'air, jusqu'à atteindre la saturation d'eau.

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

- l'humidité absolue (teneur en eau), qui s'exprime en grammes d'eau par kg d'air sec. Par exemple si $x = 10$ g/kg d'air sec, dans 1,01 kg d'air on a 1 kg d'air sec et 10 g de vapeur d'eau;

- l'humidité relative (degré hygrométrique), 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 la température de l'air et de la pression. Elle permet donc de connaître le niveau de saturation de l'air en eau.

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)

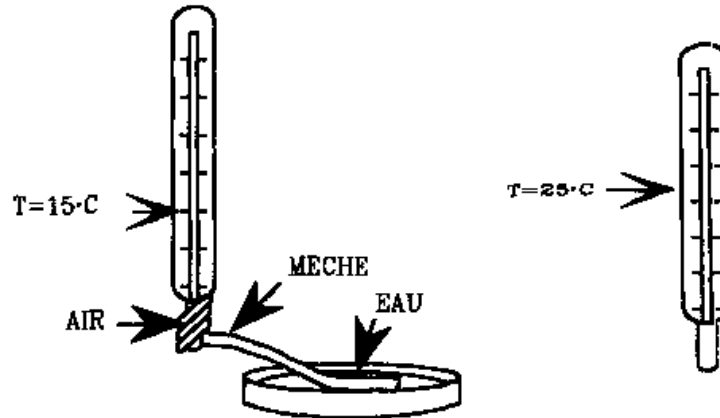
La température du mélange air sec + vapeur d'eau se mesure avec un thermomètre usuel (par exemple à alcool jusqu'à 50°C , à mercure jusqu'à 300°C). On l'appelle aussi température sèche.

Si l'on fait circuler cet air au-dessus d'eau libre suffisamment lentement, il s'établit un équilibre énergétique dans les transferts de chaleur et de matière entre l'air et cette eau libre.

L'air, lorsqu'il est plus chaud que l'eau, apporte l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau libre (en surface) et la vapeur d'eau ainsi formée se mélange à l'air. L'énergie fournie à l'eau par l'air est ainsi récupérée par celui-ci sous forme d'énergie contenue dans la vapeur d'eau (appelée chaleur latente).

◆ la surface de l'eau, l'air atteint une température d'équilibre appelée température de thermomètre humide de l'air. L'air est alors saturé de vapeur d'eau (humidité relative $H_R = 100\%$), il n'y a plus d'évaporation, l'air ne se refroidit plus.

◆ chaque degré d'humidité relative de l'air correspond donc une température limite de refroidissement de l'air au contact de l'eau appelée température humide.



La température sèche

La température sèche se mesure avec un thermomètre. Ici, $T = 25^\circ\text{C}$.

La température humide se mesure avec un thermomètre dont l'ampoule est entourée d'une mèche humide. Les lacets de chaussures en coton font d'excellentes mèches. Il faut que la vitesse de l'air autour du thermomètre soit d'au moins 2 m/s pour que la mesure soit juste.

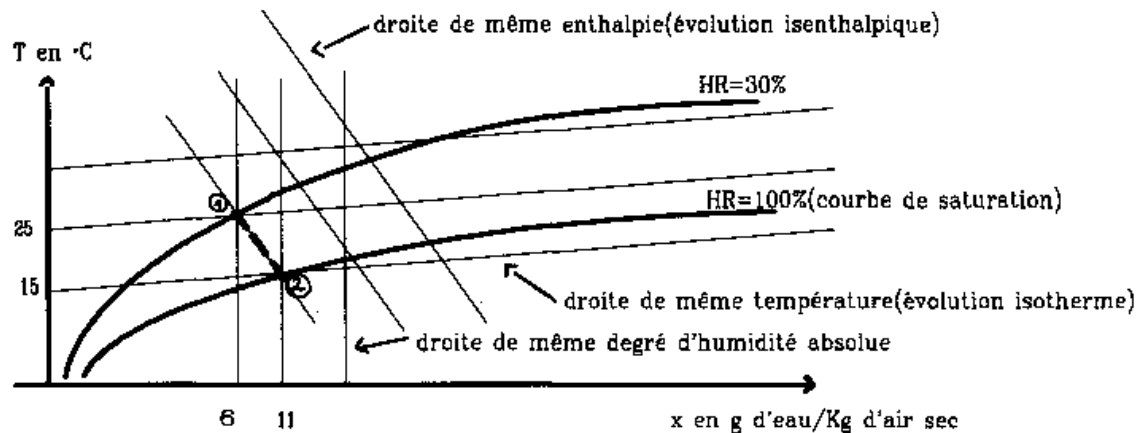
L'énergie contenue dans l'air est dénommée enthalpie. Une opération de séchage où il y a conservation du niveau énergétique de l'air est appelée isenthalpique (du grec « iso » signifiant pareil). De même, une transformation des caractéristiques de l'air dans laquelle la température est restée constante s'appelle une transformation isotherme.

RELATIONS ENTRE CES VARIABLES: LE DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

En toute rigueur, les relations qui s'établissent entre ces variables dépendent de la pression. Toutefois, dans le cadre des transformations envisagées ici, la pression peut être envisagée comme constante (pression atmosphérique, de fluctuations négligeables).

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 qui permet, connaissant deux de ces valeurs, de connaître les deux autres.

Le diagramme ci-dessous fournit une représentation simplifiée du diagramme de l'air humide, présenté plus en détail sur la page suivante.



Représentation simplifiée du diagramme de l'air humide

Comment lit-on ce diagramme?

Prenons le cas, porté sur le graphique ci-dessus, d'un air dont la température sèche est de 25°C , et dont on cherche connaître l'humidité relative. La mesure de la température humide de cet air et la lecture du diagramme de l'air humide permettent d'obtenir le résultat. Supposons que la mesure de la température humide de l'air fournisse la valeur de 15°C (cas représenté sur le diagramme). En portant cet air au contact d'eau libre, il subit une évolution (1) vers (2) de type isenthalpique (même enthalpie de l'air) jusqu'à atteindre une humidité relative de 100%. Sa

température est alors, par définition, la température humide de l'air, soit 15°C. Ce point d'arrivée (2) peut donc être représenté sur le diagramme, l'intersection de la droite de même température de l'air de 15°C (droite de transformation isotherme) et de la courbe de l'air porteur à saturation d'eau (HRs = 100 %). Le point (2) est donc déterminé. À partir de ce point, et puisque l'on sait que la transformation a été isenthalpique (sans apport ni retrait d'énergie de l'air), on remonte par la droite isenthalpique jusqu'à l'intersection avec l'isotherme à la température $T(1) = 25^\circ\text{C}$. La position du point (1) est alors connue. On trouve ainsi l'humidité relative de l'air recherché $H_R(1)$, soit 30 % dans le cas présent.

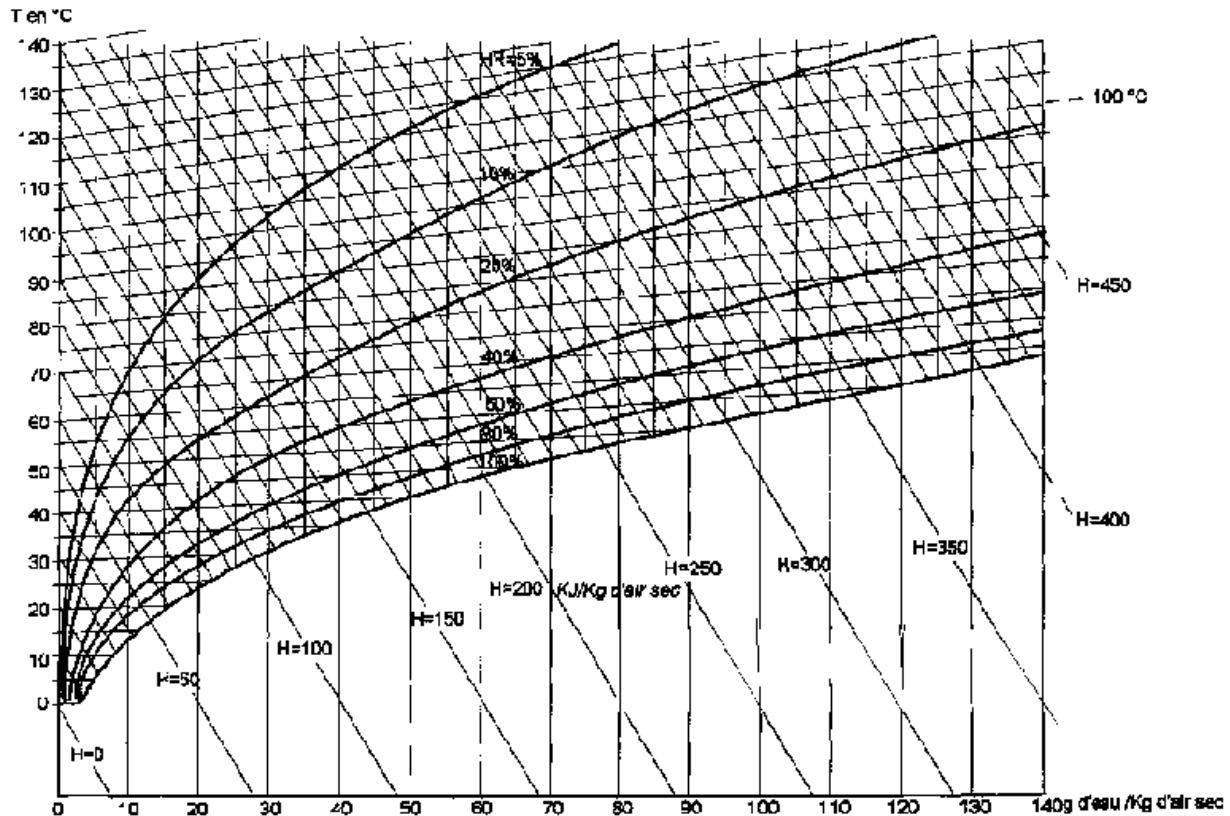


Diagramme enthalpique de l'air humide

Le diagramme humide nous donne aussi les humidités absolues pour

chaque état (1) et (2): respectivement 6 et 11 grammes d'eau par kilogramme d'air sec dans le cas présent.

Remarque: On peut aussi utiliser la table psychrométrique (cf. annexe 6) qui nous donnent directement H_R en fonction de la température sèche et de la température humide.

SUIVI DU PROCESSUS DE SÈCHAGE SUR LE DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE. DE LA THÉORIE AU CAS RÉEL.

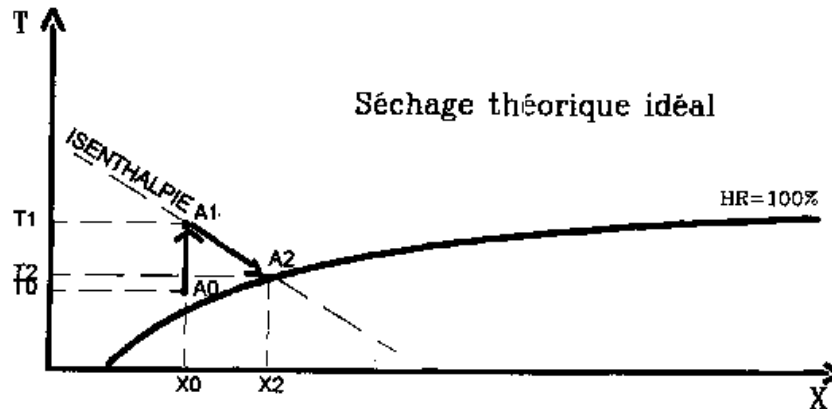
La théorie

Supposons que l'on utilise pour le séchage de l'air extérieur, situé au point A0 sur le diagramme de l'air représenté ci-dessous. Ce point caractéristique de l'air est représenté par ses paramètres de départ: sa température sèche (T_0) et sa teneur en eau initiale, ou degré d'humidité absolue (x_0).

Lors de son passage par le capteur solaire, ou toute autre source de chaleur, cet air s'échauffe sans modification de son humidité absolue (il n'a pas encore atteint le produit et contient donc toujours la même quantité d'eau par kilogramme d'air sec). Juste avant son passage sur le produit, il est caractérisé par le point A1 (même teneur en eau x_0 , température sèche portée à T_1).

Quand il se trouve en contact avec un produit humide, l'air se charge de son eau jusqu'à être saturé de vapeur et lui cède de sa chaleur: la température de l'air diminue. Dans l'enceinte de séchage opaque, il n'y a pas d'apport d'énergie. L'échange s'effectue à énergie (ou enthalpie) constante: la position de l'air sur le diagramme de l'air humide évolue de la position A1 à la position A2, c'est-à-dire:

- selon une transformation isenthalpique le long d'une droite de même enthalpie de l'air (droite isenthalpique);
- jusqu'au contact de la courbe d'humidité relative de 100 %, l'air ayant atteint la saturation.



Le séchage isenthalpique

- **A0** est le point coordonné (T_0' x_0) représentant l'air à l'entrée du capteur.
- **A1** est le point des coordonnées T_1 et x_0 représentant l'air à la sortie du capteur ou à l'entrée de l'enceinte de séchage. Son humidité absolue est la même que précédemment.
- **A2** représente l'air à la sortie de l'enceinte. Saturé ($HR = 100 \%$) il a absorbé de la vapeur ($x_2 - x_0$) et perdu de la chaleur (différence de température: $T_1 - T_2$).

Le séchage réel

En réalité, rappelons que le séchage ne se produit pas exactement de cette façon. En effet:

- l'humidité relative de l'air à la sortie du séchoir est toujours inférieure à 100 %, et cela pour trois raisons:
 - l'humidité de l'air ne peut être supérieure à l'humidité relative d'équilibre du produit; celle-ci variant au cours du séchage, l'humidité de l'air varie également, de près de 100 % au début jusqu'à l'humidité relative d'équilibre

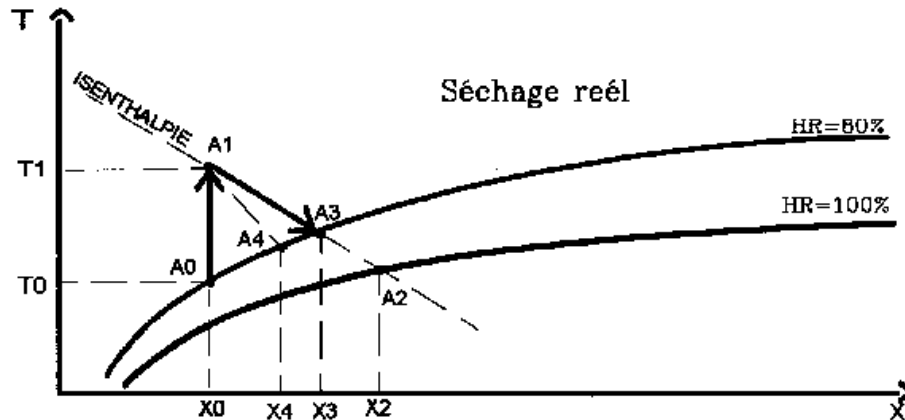
correspondant à la teneur en eau du produit sec en fin de séchage;

- l'air pas nécessairement le temps de se charger de toute la vapeur qu'il pourrait emporter;

- l'efficacité de l'échange air/produit n'est pas parfaite.

• le séchage ne se fait pas de manière parfaitement isenthalpique, c'est-à-dire sans perte de chaleur. Les pertes de chaleur par les parois du séchoir et le comportement variable du produit provoquent une perte d'enthalpie. Entre l'entrée et la sortie, le point A défini par ses paramètres de température sèche et d'humidité absolue ne suit pas parfaitement une droite isenthalpe.

Le plus souvent, à la sortie du séchoir, l'air n'est pas saturé. Il lui reste un pouvoir évaporatoire qui n'a pas été utilisé.



Le séchage réel

- A3 représente sur ce graphique la position finale qu'atteindrait l'air après son passage sur le produit si le séchage se produisait bien sans perte d'énergie (isenthalpique), mais en considérant qu'on ne peut atteindre un degré d'humidité relative de 100 % (on atteint 80 % sur cet exemple).

- A4 représente la position atteinte dans la réalité, en tenant compte du surcroît des pertes d'énergie qui font que la transformation n'est pas parfaitement isenthalpique.

LECTURES D'ENTHALPIES

L'évaluation des enthalpies de l'air (l'énergie de l'air) entre l'entrée et la sortie du séchoir fournit de nombreuses informations. Cela permet en effet d'apprécier le rendement de séchage, qui est le rapport entre l'énergie pour la vaporisation de l'eau et l'énergie qui a été fournie au système, dont on rappelle la formulation:

$$\eta = \frac{1,2 \cdot D_s \cdot (h_f \cdot h_s)}{3600 \cdot P}$$

(en %)

avec:

- D_s : débit d'air (en m^3/h);
- h_a : enthalpie de l'air à l'entrée du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- h_f : enthalpie de l'air à la sortie du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- P : puissance fournie au système (en W).

L'évaluation des enthalpies est possible à partir des mesures de températures sèches et humides en entrée et sortie du séchoir. On a vu précédemment que ces données permettent de « positionner » le point

caractéristique de l'air étudié sur le diagramme de l'air humide. On détermine alors les enthalpies d'entrée et sortie en identifiant les courbes isenthalpes qui passent par les deux points caractéristiques de l'air d'entrée et de la sortie.

Remarque 1:

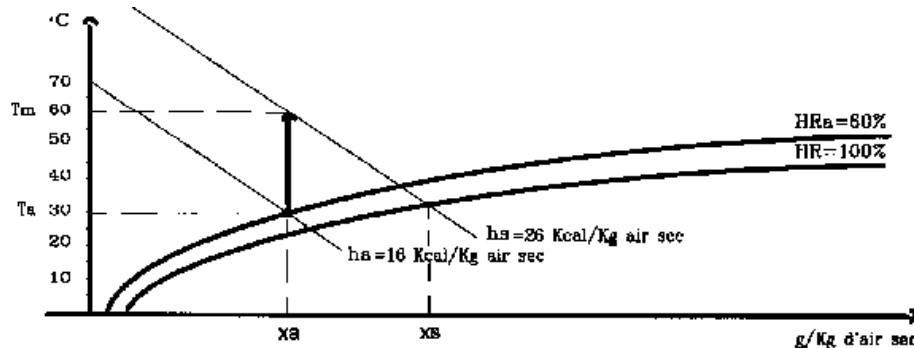
L'évaluation de ces enthalpies permet d'autre part de mieux séparer le rendement thermique entre ses deux composantes principales:

- le rendement du capteur solaire seul, qui reçoit la chaleur du soleil et fournit de la chaleur de l'air;**
- l'efficacité du passage de l'air chaud sur le produit pour provoquer son séchage.**

Il est en effet possible d'évaluer la différence d'enthalpie de l'air dans le « cas idéal », et de la comparer de la différence d'enthalpie effectivement mesurée. On a alors une mesure des pertes d'efficacité du passage de l'air pour le séchage du produit, de partir de la différence entre l'énergie que devrait contenir l'air en fin de séchage si la transformation avait été parfaitement isenthalpique, et celle effectivement mesurée: c'est la différence d'enthalpie en sortie de séchoir entre le « cas idéal » et le cas réel. La dernière est évaluée selon la méthode décrite ci-dessus. La première s'évalue rapidement, comme montré sur l'exemple d'utilisation

du diagramme ci-dessous.

Il présente l'évolution idéale d'un air, initialement à 30°C et de degré d'humidité relative 60 %, porté à 60°C. En reprenant les développements du paragraphe précédent, le point d'arrivée se situe sur la courbe d'enthalpie de 26 Kcal/kg d'air sec.



Lecture de l'enthalpie de l'air ambiant et de l'air chauffé sur le diagramme de l'air humide

Remarque 2:

Les enthalpies sont parfois fournies en kcal/kg a.s. Elles doivent être converties en kJ/kg a.s. pour être utilisées dans les formules de calcul qui sont exprimées dans le système d'unités international (1 kcal = 4,18 kJ).

Lecture de courbes de sorption-désorption

NOTION DE COURBE DE SORPTION-DÉSORPTION

Lorsqu'on place un produit humide dans une boîte d'air sec non saturé, refermée hermétiquement par la suite, ce dernier absorbe sous forme de vapeur une partie de l'eau du produit et celui-ci sèche. Au bout d'un moment, il n'y a plus d'échange d'eau: on dit qu'on a atteint l'état d'équilibre.

A l'état d'équilibre, il y a égalité entre l'humidité relative de l'air et l'activité de l'eau du produit. On l'appelle « humidité relative d'équilibre ». Elle est notée « ϕ » et exprimée en %.

Pour une température donnée, elle correspond à une teneur en eau précise du produit. Si on porte sur un graphique les différentes humidités relatives d'équilibre et les différentes teneurs en eau correspondantes du produit, on obtient une courbe.

La courbe obtenue lorsque le produit humide est placé dans un air sec (et donc perd son eau) est appelée courbe de désorption. Elle rend compte du comportement du produit lors du séchage.

La courbe obtenue lorsque le produit sec est placé dans un air humide et qu'il gagne de l'eau est appelée courbe d'absorption ou de sorption. Elle est

aussi utile puisqu'elle rend compte du comportement du produit lors du stockage. En fait, ces deux courbes sont très proches l'une de l'autre et on utilise en pratique une courbe moyenne appelée courbe de sorption-désorption.

Une telle courbe n'est valable que pour une température donnée. Ces courbes peuvent être tracées pour une teneur en eau rapportée à la masse humide (notée m_c) ou pour une teneur en eau rapportée à la masse sèche (notée X).

Les courbes de sorption-désorption sont utilisées pour la conduite du séchage. Les conditions du stockage (température et humidité de l'air) fixent la teneur en eau du produit qu'il est nécessaire d'atteindre mais inutile de dépasser pour permettre un stockage sans dégradation du produit.

Le titre indicatif, et pour une bonne partie des produits aptes au séchage, la teneur en eau qu'il est nécessaire d'atteindre correspond à une activité de l'eau dans le produit de l'ordre de 0,6. Cette valeur ne s'applique cependant pas à tous les produits.

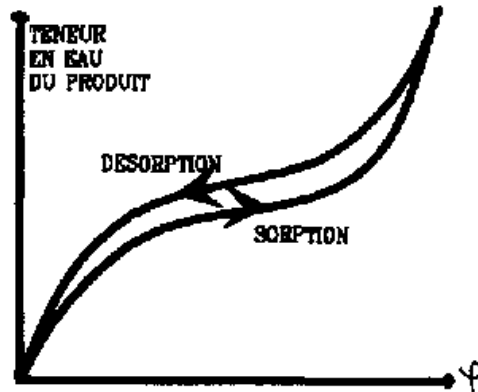
On peut également connaître, suivant le mode et le lieu de stockage, la température de l'air ambiant. On considère alors que la température du produit lui sera égale. Si, pour le produit considéré, l'humidité relative de l'air doit rester inférieure à 65 % (limite pour le développement des

micro-organismes: moisissures, levures et bactéries), on détermine à l'aide de la courbe la teneur en eau finale du produit à atteindre pour que, à la température de stockage, l'humidité relative d'équilibre, et donc l'humidité relative de l'air, ne dépasse pas 65 %. Les valeurs de teneur en eau finale fournies dans les fiches produits correspondent à des humidités relatives d'équilibre variant de 20 à 50 % selon le type de produit et sa température.

Si l'humidité de l'air de stockage est supérieure à 65 % (par exemple en saison humide en pays équatoriaux), il faut envisager de stocker les produits dans des récipients étanches à l'a* pour éviter des pertes et dégradations.

Remarque:

à titre de rappel: à même taux d'humidité relative, la conservation du produit sera d'autant plus longue que la température sera plus basse (moindre développement de la population microbienne).



Les courbes de sorption-désorption

La courbe de sorption représente le comportement du produit s'humidifiant.

La courbe de désorption représente le comportement du produit se séchant.

Utilisation conjointe des courbes de sorption-désorption et du diagramme de l'air pour évaluer la fin du séchage et le pouvoir séchant moyen de l'eau

ESTIMATION DE LA FIN DU PROCESSUS DE SÉCHAGE

Considérons le cas d'un produit dont la teneur en eau en base humide (masse d'eau/masse totale du produit) doit être de 15 % pour que sa conservation soit possible. On envisage un séchage à 60°C. Comment déterminer le moment où cette teneur en eau a été atteinte sans avoir à faire régulièrement des mesures de poids ou de teneur en eau du produit? On peut obtenir l'information à partir de mesures de températures sèche et humide de l'air en sortie de séchoir, qui indiquent l'humidité relative de cet air, et donc l'activité de l'eau du produit.

On procède comme suit:

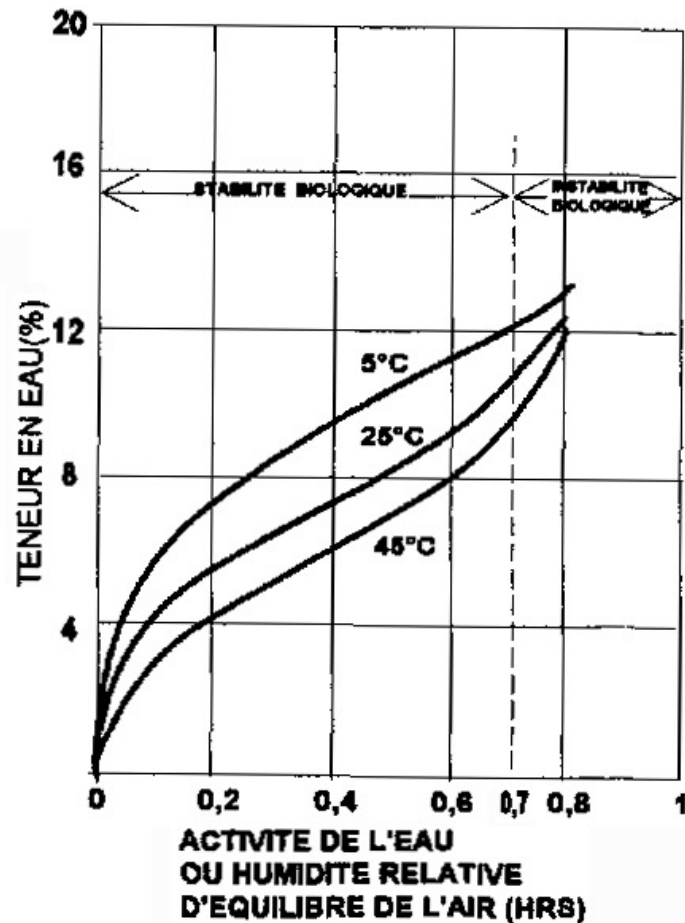
- **On convertit la teneur en eau en base humide de 15 % en teneur en eau en base sèche en utilisant la formule présentée au chapitre V:**

$$x = 100.m/(100 - m), \text{ soit ici:}$$

$$x = 100.15/(100 - 15) = 17,5 \text{ \%}.$$

- **On prend la courbe de désorption du produit considéré pour la température de 60°C présentée ci-dessous (rappel: ces courbes dépendent de la température). On y lit l'humidité relative d'équilibre de l'air avec le produit pour la teneur en eau en base sèche calculée, soit ici 70 % (cf. schémas page ci-contre).**
- **On dispose maintenant d'une information mesurable pour arrêter**

le séchage en temps voulu: les mesures de température humide et de température de l'air en sortie de séchoir, qui permettent de déterminer l'humidité relative de l'air (ci ci-dessus), et on arrête le séchage lorsque cette dernière est de 70 %.



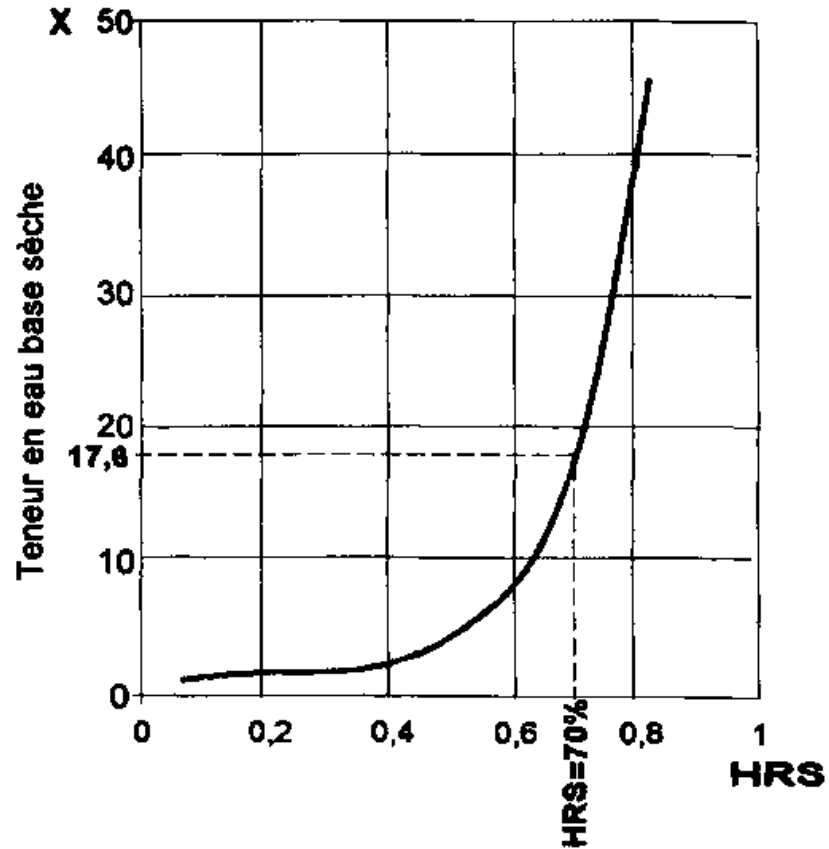
Les courbes de sorption et de desorption de la muscade à 25 et 45°C

Si la température prévue pour le stockage est de 25°C, il faudra sécher le produit jusqu'à une teneur en eau finale minimale (correspondant à $A_w < 0,7$) de 10%.

Si on estime que le stockage se fera dans une ambiance à faible humidité relative (par exemple 50 %), il faudra alors sécher le produit jusqu'à $X = 8\%$.

Si par contre le stockage se fait à 45°C, la teneur X minimale sera de 9 %.

ACTIVITE DE L'EAU OU HUMIDITE RELATIVE D'EQUILIBRE DE L'AIR (HRS)



Courbe type de désorption 60°C

ESTIMATION DU POUVOIR SÈCHANT DE L'AIR EN MOYENNE PENDANT LA DURÉE DU SÈCHAGE

Rappel

L'activité de l'eau dans le produit varie lors du séchage. Si elle était constamment égale à 1, et en supposant parfaits les échanges de masse et de chaleur entre l'air et le produit, le pouvoir vaporatoire de l'eau fournirait la mesure de l'eau qu'un kilogramme d'air peut emporter. Ce n'est pas le cas. En faisant abstraction des pertes thermiques (qui sont intégrées dans le rendement thermique), il est nécessaire de définir le pouvoir séchant de l'air, qui est toujours inférieur à son pouvoir vaporatoire puisque l'air ne sort jamais du séchoir à saturation d'eau. Pour corriger ce « problème », on retient une humidité relative de l'air de sortie du séchoir « moyenne » donnée par:

$$H_{rm} = \frac{1}{2}(100 + H_{rs})$$

avec:

- H_{rm} : humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en moyenne sur la durée totale du séchage (en %);
- H_{rs} : humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, à la fin du

séchage;

- 100: humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en début de séchage (saturation d'eau: 100 % d'humidité relative).

Calcul sur l'exemple précédent

En reprenant l'exemple traité plus haut, et en supposant que l'air était à 30°C et le degré d'humidité relative de 60 % à l'entrée du séchoir, on a $r_m = (100 + 70)/2 = 85 \%$.

Le degré d'humidité absolue de l'air à l'entrée du séchoir est lu sur le diagramme de l'air humide pour une humidité relative de 60 % et une température de 30°C, soit: 16,5 g/kg d'air sec.

Le degré d'humidité absolue de l'air en sortie du séchoir, et en moyenne sur la durée du séchage, est lu sur ce même diagramme, selon la méthode adoptée précédemment, et pour une humidité relative moyenne de 85 %, soit 28 g/kg d'air sec. Un mètre cube d'air enlève donc en moyenne: $1,2 \times (28 - 16,5) = 13,8$ grammes d'eau/m³. Le pouvoir séchant de l'air utilisé est alors de l'ordre de 14 grammes d'eau/m³, en moyenne sur la durée du séchage.

Compléments sur l'énergie solaire

NOTIONS GÉNÉRALES

Le soleil émet une puissance d'environ 380 milliards de milliards de mégawatts (1) sous forme de rayonnement électromagnétique. La terre intercepte 170 milliards de Mw de cette source d'énergie.

(1) 1 mégawatt (MW) = 1 000 kw.

Un rayonnement électromagnétique est émis par tout corps chargé d'une certaine quantité de chaleur. Ce rayonnement se caractérise par deux grandeurs:

- sa longueur d'onde, notée « λ » et exprimée en microns ($1 \mu m = 1$ millième de mm = 10^{-3} mm = 10^{-6} m);
- son flux ou puissance, notée « ϕ » et exprimée en watts (w).

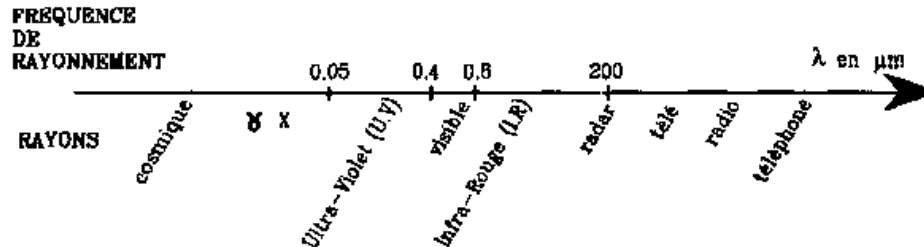
Ce sont surtout les rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre 0,8 et 200 μm qui transfèrent de la chaleur. On les appelle infrarouges.

La longueur d'onde du rayonnement émis par un corps est directement fonction de sa température. La puissance du rayonnement dépend de l'état de surface, la couleur, la composition de ce corps.

Afin de classer les corps, on définit un corps idéal, fournissant le rayonnement le plus puissant dans des conditions de températures données: le corps noir. Le corps noir a les propriétés suivantes:

- il absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit;
- la puissance qu'il rayonne est directement proportionnelle à sa température de surface et est identique dans toutes les directions.

Ainsi, le soleil se comporte comme un corps noir avec une température de surface de 5 500° C.



Compléments sur l'énergie solaire

COMMENT SE COMPORTE UN CORPS EXPOSÉ À UN RAYONNEMENT

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement, il en absorbe une partie, en réfléchit une autre, en transmet une troisième.

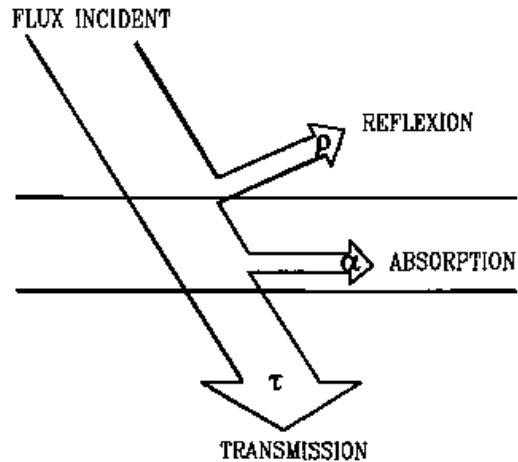
Les corps transparents transmettent le rayonnement sans modification essentielle de sa direction, alors que les corps translucides diffusent le rayonnement.

Le coefficient (ou taux) de transmission du rayonnement varie avec l'angle d'incidence du rayonnement. Pour le verre, il baisse fortement quand l'angle d'incidence d passe 50° .

L'absorption s'accompagne d'une conversion d'énergie dans le corps récepteur. Par exemple, un corps peut recevoir de l'énergie sous forme de lumière visible, la convertir en chaleur et la rayonner sous forme d'infrarouges, invisibles.

La réflexion peut être spéculaire, c'est-à-dire dans une direction précise (cas des métaux à surface polie...), ou diffuse, sans direction privilégiée. L'évolution des surfaces au cours du vieillissement tend à les rapprocher de la réflexion diffuse.

Le taux d'émission, ou émissivité, d'un corps représente sa propension à rayonner l'énergie qu'il contient sous forme de chaleur. Il est noté « ϵ ». Pour le corps noir, $\epsilon = 1$ (maximum).



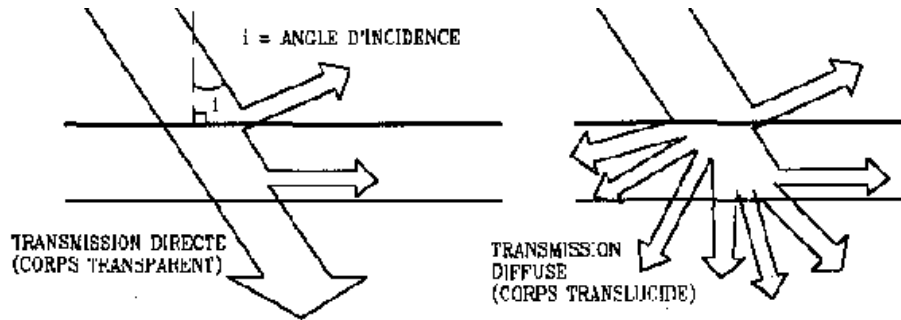
Comportement général d'un corps recevant un rayonnement

$$\frac{\text{puissance absorbée}}{\text{puissance incidente}} = \alpha = \text{taux d'absorption}$$

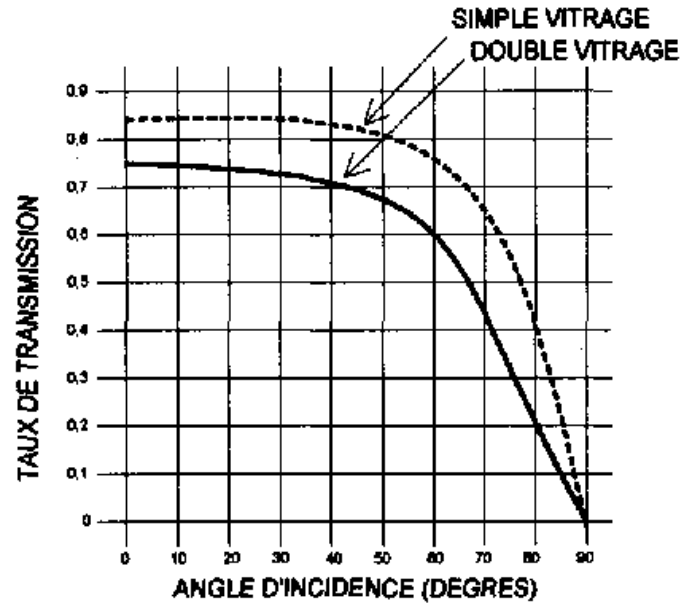
$$\frac{\text{puissance réfléchie}}{\text{puissance incidente}} = \rho = \text{taux de réflexion}$$

$$\frac{\text{puissance transmise}}{\text{puissance incidente}} = \tau = \text{taux de transmission}$$

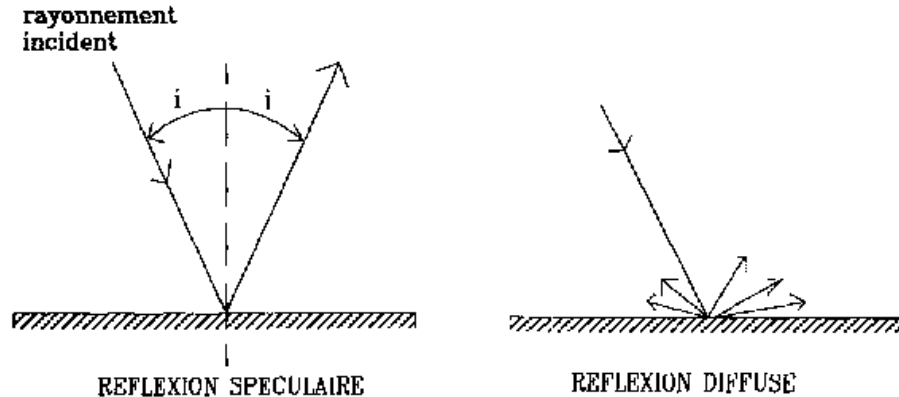
$\alpha + \rho + \tau = 1$ Pour le corps noir. $\alpha = 1$. $\rho = \tau = 0$



Différents modes de transmission du rayonnement



Variation du taux de transmission par le verre, en fonction de l'angle d'incidence



Différents modes de réflexion du rayonnement

CORPS GRIS, CORPS SÉLECTIFS, CORPS CHAUDS, CORPS FROIDS

Aucun corps dans la nature ne se comporte exactement comme un corps noir. En fait, on distingue essentiellement les corps « gris » et les corps « sélectifs ».

Le corps gris n'absorbe qu'une partie du rayonnement. Mais leur taux d'absorption est le même pour toute longueur d'onde. Inversement, ils émettent moins de rayonnement que le corps noir à la même température, mais ils le font également dans toutes les longueurs d'onde.

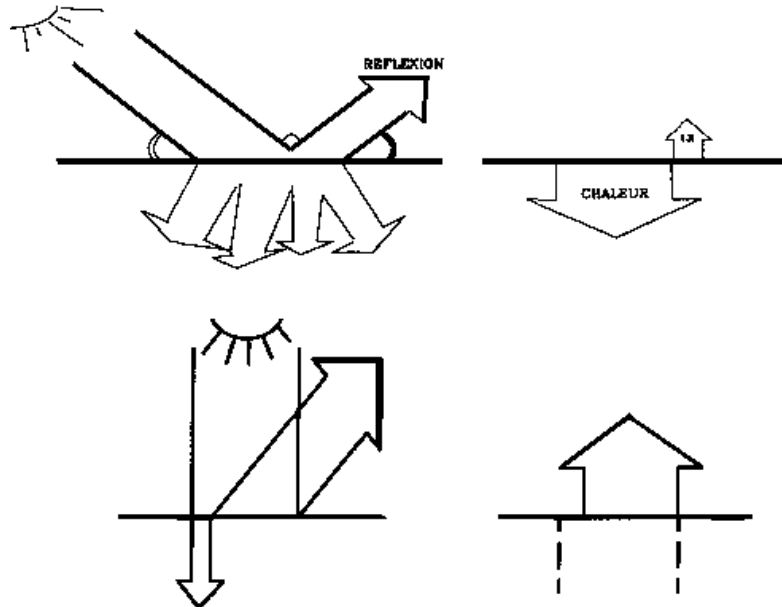
Au contraire, les corps sélectifs ne réagissent pas de la même façon aux

différentes longueurs d'onde.

Cependant pour tout corps, le taux d'absorption dans une longueur d'onde donnée est égal au taux d'émission dans la même longueur d'onde. Cela permet de distinguer les corps sélectifs « chauds » des corps sélectifs « froids »:

- les corps « chauds » absorbent beaucoup le rayonnement solaire et donc s'échauffent fortement; par contre, ils rayonnent peu dans l'infrarouge et ne peuvent donc perdre leur chaleur de cette façon; ils la perdent plus facilement par contact avec l'air et sont donc tout indiqués pour réchauffer celui-ci: on les utilise comme absorbes dans les capteurs solaires;

- les corps « froids » absorbent peu le rayonnement solaire et s'échauffent donc peu; ils perdent facilement leur chaleur sous forme d'infrarouge; ils restent frais et refroidissent l'air à leur contact; on les utilise donc en climatisation naturelle (peinture blanche, chaux, plâtre, etc.)



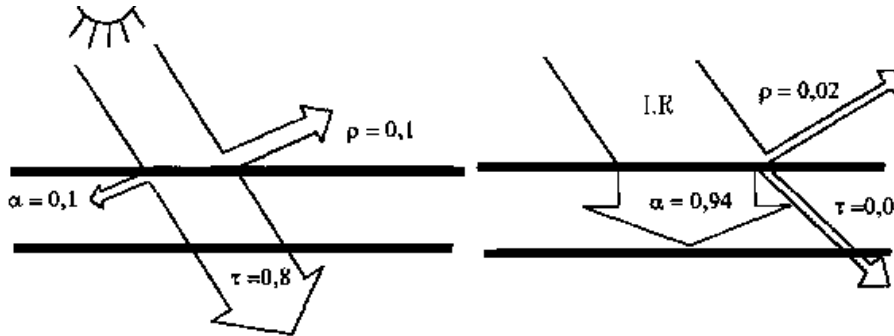
Corps chauds et corps froids

L'acier galvanisé absorbe 64% du rayonnement solaire ($\alpha=0,64$) et le transforme en chaleur.

L'acier met alors dans l'infrarouge mais il ne rayonne que 25 % de sa chaleur.

Donc l'acier galvanisé placé au soleil accumule de la chaleur. Sa température augmente. On dit que c'est un corps chaud.

Le plâtre n'absorbe que 7 % du rayonnement solaire ($\alpha=0,07$) mais rayonne 91% ($\varepsilon=0,91$) de la chaleur qu'il contient donc il reste froid placé au soleil. On dit que c'est un corps froid.



Le comportement particulier du verre

Le verre laisse passer la lumière solaire mais absorbe les infrarouges. Il permet de réaliser l'effet de serre.

LA RÉCEPTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR UNE SURFACE AU NIVEAU DU GLOBE TERRESTRE

Le rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère terrestre peut être

considéré comme constant tout au long de l'année compte tenu de la précision recherchée dans les calculs de dimensionnement. On définit alors l'intensité de ce rayonnement par la constante solaire. Il s'agit d'une puissance par unité de surface égale à 1367 W/m^2 .

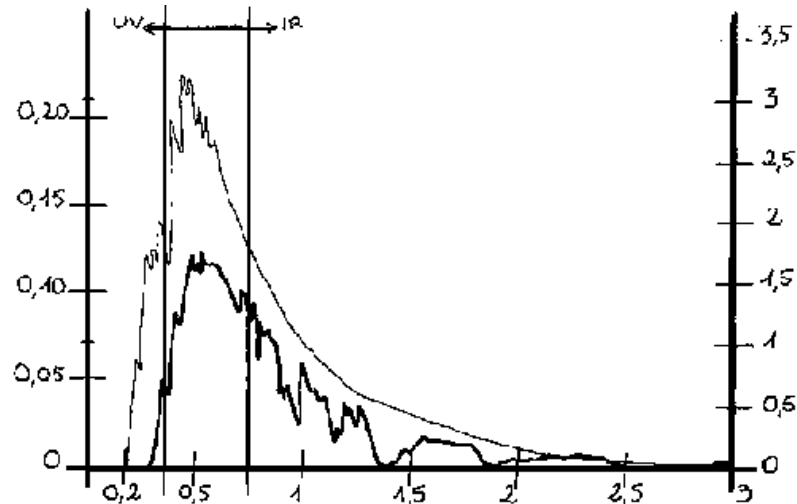
L'atmosphère terrestre composée de différents types de gaz, de gouttes d'eau, de particules solides en suspension n'autorise pas la totalité du rayonnement solaire à atteindre le sol. Une partie est renvoyée vers l'espace. Au cours de sa traversée dans l'atmosphère, des phénomènes d'absorption, de réflexion et de diffusion se conjuguent. Le rayonnement global reçu au niveau du sol par m^2 a donc été atténué. D'autre part, on réalise une distinction au point de vue qualitatif en séparant le rayonnement global en rayonnement direct et en rayonnement diffus.

Le rayonnement direct est celui qui parvient directement sur une surface au sol sans avoir été ni réfléchi, ni diffusé.

Le rayonnement diffus regroupe tout rayonnement autre que le direct, reçu par une surface au sol après avoir été renvoyé par un corps intermédiaire dans l'atmosphère. Ces corps (molécules d'air, aérosols, poussières, gaz, vapeur d'eau) peuvent soit absorber complètement le rayonnement solaire, soit en absorber une partie et en réfléchir une autre. Tous ces phénomènes participent à la diffusion du rayonnement solaire. Celui-ci n'a pas, contrairement au rayonnement direct, de direction privilégiée. On le

note D (en Wh/m^2).

L'irradiation globale (G) est donnée par la formule: $G = I \cdot \sin h + D$, avec I (irradiation), G , D en Wh/m^2 , et h : angle que fait le soleil avec l'horizontale.



Répartition de l'énergie au niveau de la couche atmosphérique (trait fin) et au niveau de la surface terrestre (trait épais) suivant les différentes longueurs d'onde

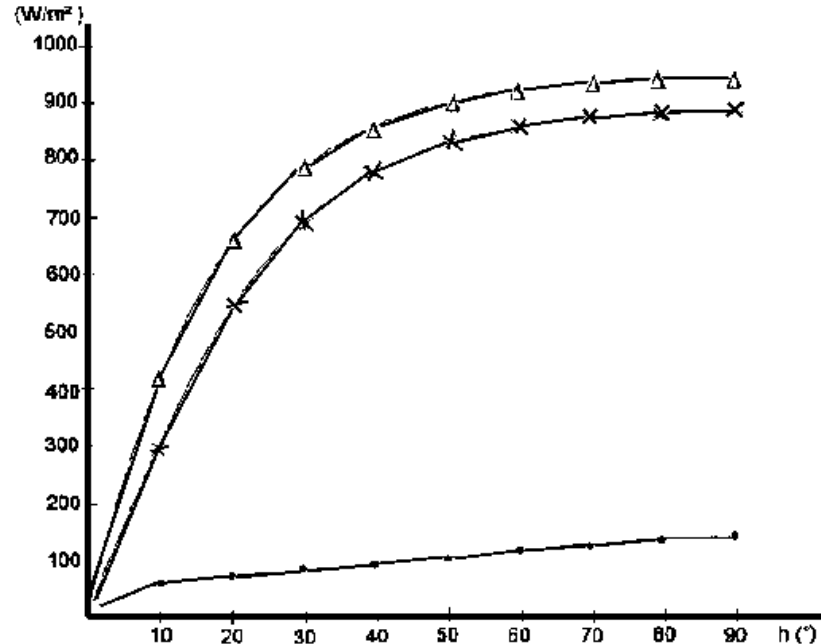
CALCUL DE LA QUANTITÉ D'ÉNERGIE SOLAIRE DISPONIBLE SUR UNE SURFACE QUELCONQUE

Le calcul théorique précis de l'énergie solaire reçue au niveau d'une surface quelconque est en fait très complexe car il prend en compte une multitude de facteurs:

- composition de l'atmosphère (présence de nuages, particules en suspension);**
- épaisseur de l'atmosphère à traverser (altitude du lieu, angle de traversée de l'atmosphère suivant l'heure et le jour de l'année);**
- angle d'incidence que fait la normale à la surface avec le rayonnement direct (plus cet angle est important, c'est-à-dire plus les rayons sont inclinés par rapport à la perpendiculaire à la surface réceptrice, plus l'intensité du rayonnement reçu sera faible);**
- albédo du relief environnant: on appelle albédo le pouvoir de réflexion que possède le relief environnant la surface réceptrice. Une partie du rayonnement global frappant le relief environnant est renvoyé proportionnellement à son albédo vers la surface réceptrice;**

- masques \diamond ventuels (tout obstacle entre la source radiante, le soleil et la surface r \diamond ceptrice).

Pour dimensionner la surface de captation d'un s \diamond choir solaire, on r \diamond alise les calculs pour un jour clair de la saison de s \diamond chage (indication maximale). Pour plus de pr \diamond cision, on choisit une journ \diamond e repr \diamond sentative de ciel clair pour chaque mois de la saison de s \diamond chage.



Quantité d'énergie solaire disponible sur une surface quelconque

Concernant le schéma de la page précédente:

Δ Rayonnement direct en saison sèche, entre 25° Nord et 25° Sud.

X Rayonnement direct en saison des pluies entre 15° Nord et 15° Sud (il n'y a pas de données exploitables pour la saison des pluies entre 25° N et 25° S).

• Rayonnement diffus en toute saison, entre 25° Nord et 25° Sud.

Pour des cas particuliers:

- en bordure de mer, retirer 10 %;**
- par brume, retirer 45 % (pour $h = 90$ %).**

Ces résultats proviennent des travaux de M. de Brichambaut (cf. Bibliographie).

Exemple:

Latitude 10°, saison sèche, $h = 60$ °,

$$I = 960 \text{ W/m}^2, D = 105 \text{ W/m}^2, \sin h = 0,87.$$

$$G = I \cdot \sin h + D, \text{ donc } G = 937 \text{ W/m}^2.$$

L'idéal est de posséder des données réelles provenant de stations météorologiques. Ce sont des données statistiques établies en faisant la moyenne des observations passées. L'irradiation est donnée pour un jour-type du mois ou de l'année. Les valeurs réellement observées varient autour de cette moyenne. Ces données sont disponibles pour tous les grands centres urbains des pays concernés par le séchage solaire. Néanmoins, si pour la zone étudiée, elles ne sont pas disponibles, on aura recours des méthodes de calculs.

Elles permettront de calculer:

- les énergies maximales mensuelles journalières (ciel clair). Elles dépendent de la latitude, de l'altitude du lieu considéré ainsi que du facteur de trouble atmosphérique;
- les énergies moyennes mensuelles journalières. Elles dépendent en outre de la fraction d'insolation du lieu considéré (rapport entre la durée réelle d'ensoleillement et la durée théorique maximale).

Les différentes méthodes de calcul sont présentés dans les ouvrages de référence de la bibliographie (« Solar engineering of thermal process », «

Le gisement solaire », « Ingénierie des systèmes solaires »).

Toutefois, les données météorologiques ne donnent que des indications pour des surfaces horizontales.

LA CHEMINÉE SOLAIRE

Rappel

L'air situé en haut de la cheminée est plus chaud, donc moins dense que celui situé en bas, qui ne l'a pas encore traversée, et également plus chaud que l'air ambiant. Suivant le principe d'Archimède, cet air plus léger subit la pression de l'air ambiant plus lourd. Cette pression (ou « terme moteur ») est donnée par:

$$\Delta mc = (\rho_1 - \rho_2).g.H \text{ en Pascal (Pa)}$$

où:

- ρ_1 est la masse volumique de l'air en bas de la cheminée (kg/m^3);
- ρ_2 est la masse volumique de l'air en haut de la cheminée (kg/m^3);
- H est la hauteur de la cheminée (m);

- g est l'accélération de la pesanteur ($\approx 10 \text{ m/s}^2$).

Vitesse d'écoulement de l'air dans la cheminée

La vitesse V de l'air dans la cheminée est donnée par (d'après L. Bernard):

$$V_{\text{air}} = \sqrt{\frac{e \cdot g \cdot H \cdot \sin \alpha}{0,02 \cdot H + e}} \cdot \sqrt{\frac{T_s}{T_e} - 1}$$

(en m/s)

avec:

- e : largeur de la face de la cheminée exposée au soleil (en mètres);
- H : hauteur de la cheminée en mètres;
- T_s : température de l'air en haut de la cheminée (en degrés Kelvin) (2);
- (2) $K = 273 + ^\circ C$ (conversion degré Celsius \rightarrow degré Kelvin).
- T_e : température de l'air en bas de la cheminée (en degrés

Kelvin);

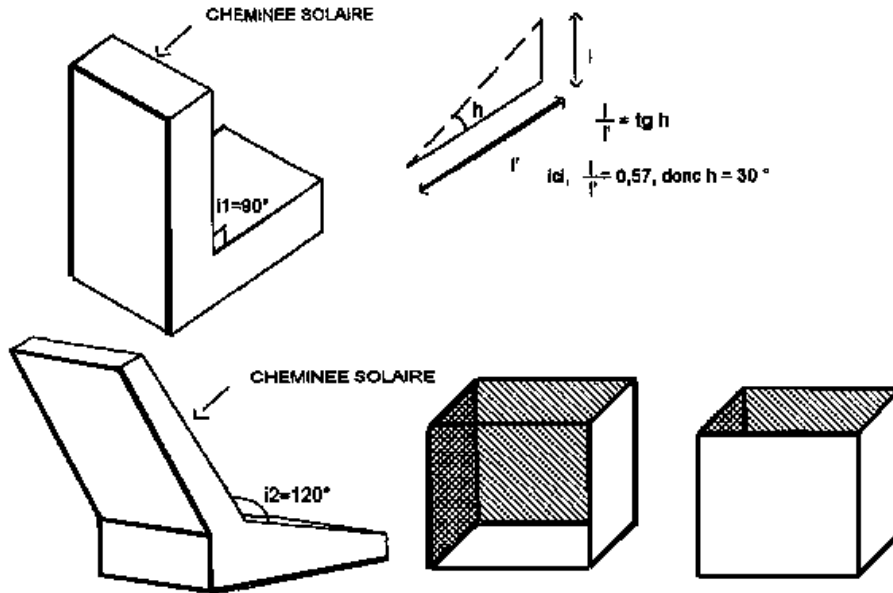
- α : angle que forme la cheminée par rapport à la hauteur du soleil.

L'angle α est donné par: $\alpha = i - h$.

α :

- i est l'angle que forme avec l'horizontale la surface de la cheminée exposée au soleil;

- h est la hauteur du soleil; h se lit sur un diagramme solaire ou se déduit du rapport entre la longueur de l'ombre portée d'un mât et la longueur de ce mât.



Détermination de l'angle α

Dans le premier cas, $i_1 = 90^\circ$, donc $\alpha_1 = i_1 - h = 60^\circ$.

Dans le deuxième cas, $i_2 = 120^\circ$, donc $\alpha_2 = i_2 - h = 90^\circ$

(Les formules s'appliquent si $i - h$ est positif).

Chapitre X: Mesurer et contrôler le séchage

La conception de matériels, la mise en place de techniques et la conduite d'une unité de séchage nécessitent des mesures de température, d'humidité, de vitesse et de rayonnement solaire. Ces mesures répondent des besoins précis.

Au stade de la conception et de la mise en place de techniques de séchage, les mesures de terrain permettent de combler les vides de la théorie pour résoudre les problèmes de dimensionnement d'un séchoir, du mode de séchage le plus adapté tel ou tel type de produit alimentaire, etc. Il est en effet, compte tenu du niveau actuel des connaissances théoriques et techniques sur le séchage, quasiment impossible de prédire l'avance comment fonctionnera exactement tel ou tel séchoir dans tel ou tel environnement, et pour telle ou telle variété de tel ou tel produit. Une bonne campagne de mesures permettra de mieux évaluer le comportement effectif du séchoir dans le cas considéré.

Les mesures sont par ailleurs essentielles lors de la conduite de l'activité de séchage, en particulier pour des niveaux de production non domestique. Elles sont nécessaires pour contrôler l'évolution d'un cycle de séchage (et veiller en particulier ce que certains paramètres ne dépassent pas les valeurs critiques admises pour une conservation des qualités du produit), et préciser le moment où le niveau de séchage requis a été atteint.

Les principaux protocoles et instruments de mesure sont précisés dans ce

chapitre.

Le bilan matière

Le bilan matière comprend la mesure des poids et l'appréciation qualitative du séchage, par un « rapport de séchage ».

LA MESURE DES POIDS

Elle sert essentiellement à déterminer deux rapports très utiles: poids initial

Le rapport de séchage:

$$P_s = \frac{\text{poids initial}}{\text{poids au moment de la mesure}}$$

Le débit produit:

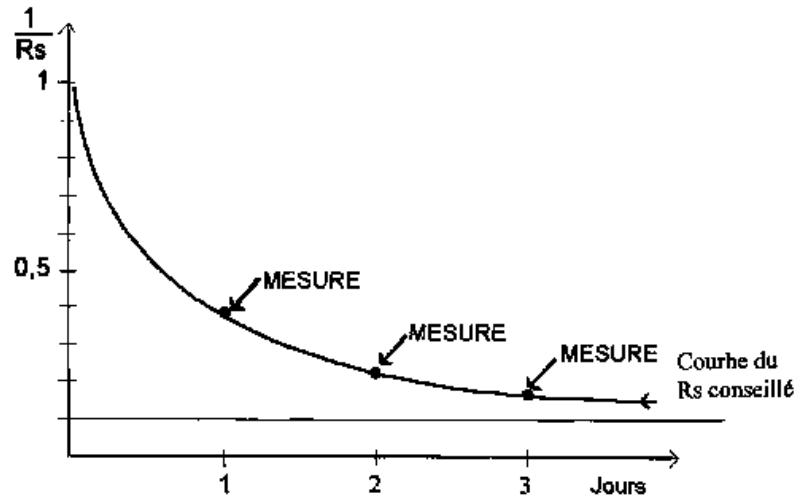
$$D_p = \frac{\text{poids de produit séché}}{\text{durée de séchage de la mesure}}$$

Les mesures des poids et des durées sont directement accessibles au sécheur. Il a un intérêt direct à les effectuer, pour préciser:

- le degré du séchage, qui peut être considéré comme satisfaisant lorsque le rapport poids initial/poids mesuré correspond au rapport poids initial/poids final conseillé sur les « fiches produit »;
- le rythme de la production, donc le rythme requis de l'approvisionnement en matière première et les capacités à satisfaire la demande du client dans les temps requis;
- la quantité de matière première dont il a besoin pour produire une certaine quantité de produit sec.

LE RAPPORT DE SÉCHAGE

Des mesures régulières du rapport de séchage et du débit produit permettent par ailleurs de contrôler l'efficacité séchoir. On peut en effet reporter sur un même graphe l'évolution constatée de l'inverse du rapport de poids R_s pendant le séchage et l'évolution considérée comme satisfaisante de ce rapport $1/R_s$ pour le produit considéré. Si les points de mesure sont au-dessus de la courbe de rythme de séchage conseillé, cela signifie que le séchage est trop lent. S'ils sont au-dessous, c'est l'inverse.



Rythme de séchage normal

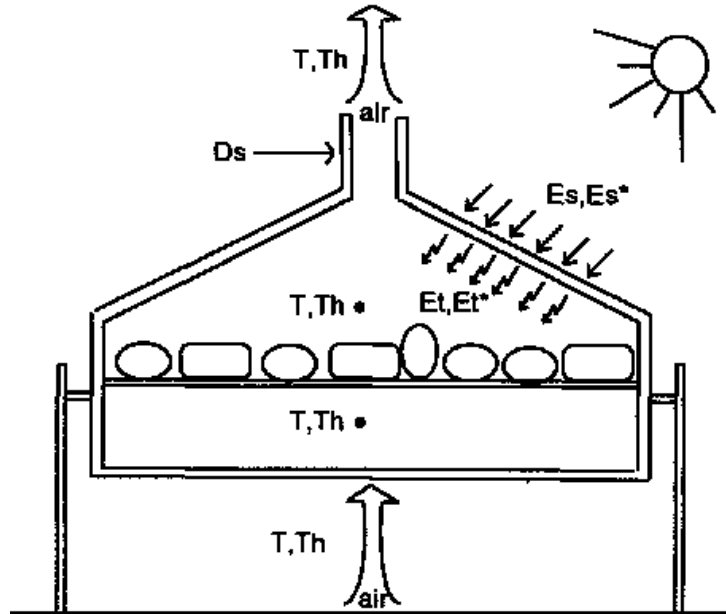
L'utilité du rapport de séchage

Le rapport de séchage est important pour le scientifique qui peut ainsi mieux identifier la phase du séchage qui ne se produit pas de façon conforme aux exigences du séchage du produit considéré, et proposer ainsi des solutions. Il est aussi utile pour l'utilisateur qui peut contrôler l'avance du séchage, et la bonne tenue dans le temps des caractéristiques du séchoir.

Il faut cependant éviter que les opérations de mesure perturbent le fonctionnement du séchoir. Une mesure matin, midi et soir est suffisante.

Le rendement thermique

Le rendement thermique permet principalement de contrôler l'efficacité des transferts d'énergies entre les sources extérieures (soleil, gaz...), l'air et le produit.



Les informations nécessaires à l'établissement du rendement thermique
 T, Th : température sèche et humide aux divers stades du séchage (en °C).

D_s : débit d'air dans le séchoir (m^3/h).

E_s, E_t : éclairement solaire, respectivement au sol, au dessus et en

dessous de la couverture transparente (en W/m^2).

G^* , E_s^* , E_t^* : irradiation solaire (en Wh/m^2).

On peut établir un rendement instantané, qui permet de mesurer l'efficacité du transfert chaleur chaque tape du séchage, ou un rendement intégré, qui mesure l'efficacité moyenne de ces transferts sur la durée totale du séchage.

LE RENDEMENT THERMIQUE INSTANTANÉ

Il exprime le rapport entre l'énergie solaire reçue par le système et l'énergie effectivement utilisée pour dégager l'eau du produit au moment de la mesure.

Soit:

$$\eta_{is} = \frac{1,2 \cdot D_s (h_f - h_a)}{3600 \cdot E_s \cdot S} \cdot 100$$

(en %)

avec:

- D_s débit d'air (en m^3/h);
- h_a : enthalpie de l'air à l'entrée du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- h_f : enthalpie de l'air à la sortie du séchoir (en kJ/kg a.s.);
- S : surface claire (en m^2);
- E_s : éclairement (W/m^2);
- h_a et h_f sont déterminés sur le diagramme de l'air humide à partir des températures sèches et humides du produit.

η_{is} est le rendement thermique du séchoir complet, au moment de la mesure.

$1,2.D_s.(h_f-h_a)$ est l'énergie fournie effectivement pour retirer l'eau du produit: la différence des enthalpies de l'air entre l'entrée et la sortie indique cette énergie par kilogramme d'air ayant traversé le séchoir. Le facteur 1,2 correspond à la masse volumique de l'air ($1,2 \text{ kg}/m^3$).

$3600.E_s.S$ mesure l'énergie solaire reçue par heure par le séchoir. Le terme: 3 600 correspond à la conversion heure/secondes ($1 \text{ h} = 3\,600$

secondes). Ce rendement (ou rendement énergétique) n'est jamais égal à un: de nombreuses pertes interviennent et font que toute l'énergie fournie n'est pas utilisée pour le séchage lui-même.

Si l'on veut obtenir les rendements des différentes phases de séchage, il suffit de remplacer h_a et h_f par les enthalpies de l'air d'entrée et de sortie des phases correspondantes. Le rendement thermique instantané permet alors de mieux préciser le comportement du séchoir lors de ces différentes phases.

Dans le cas d'un séchage mixte (solaire + gaz par exemple), il sera nécessaire d'intégrer l'énergie fournie par la source de chaleur complémentaire.

LE RENDEMENT THERMIQUE INTÉGRÉ

Le rendement instantané varie fortement avec les différentes périodes de séchage (phases I, II, III). Pour avoir une image plus globale de l'efficacité des transferts d'énergie dans le séchoir, on calcule le rendement thermique moyen sur toute la durée de séchage d'un produit (η_{ps}).

Il suffit pour cela de « découper » (discrédites) la durée totale du séchage en plusieurs périodes d'égale importance (par exemple une

heure). On mesure \diamond chaque milieu de période les enthalpies de l'air h_f et h_a \diamond la sortie et \diamond l'entrée du séchoir, le débit d'air D_s et l'éclairement E_s , comme pour un rendement thermique instantané \diamond .

La somme des termes $1,2.D_s.(h_f-h_a)$ calculés pour chaque période, multipliée par leur durée (exprimée en heures) indique l'énergie totale qui aura été utilisée pour extraire l'eau du produit lors du séchage complet.

La somme des termes $3600.E_s.S$ mesurés \diamond chaque période, multipliée par leur durée (exprimée en heures), indique l'énergie solaire qui aura été reçue par le séchoir pour un cycle complet de séchage.

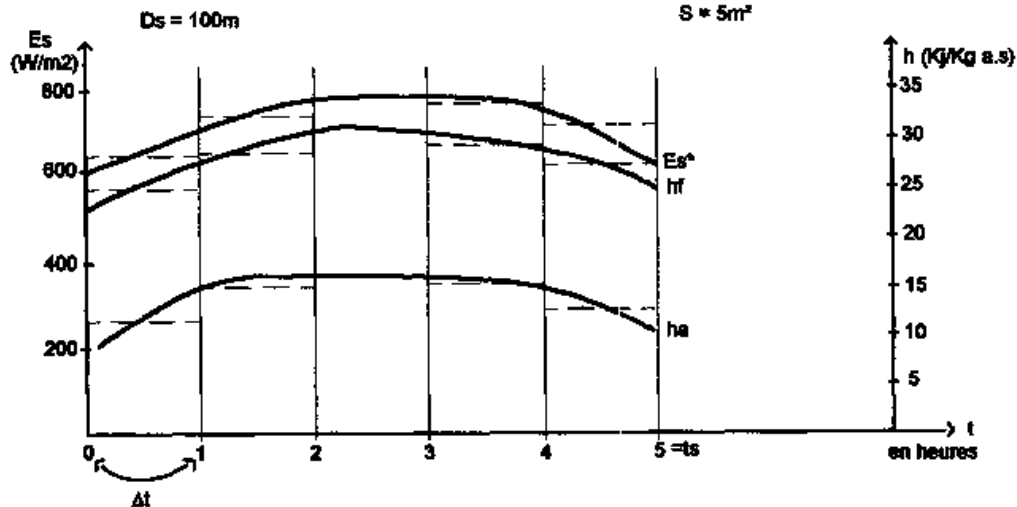
Le rendement thermique intégré est le rapport de ces deux sommes. Cf. l'encadré de la page suivante sur le calcul d'un rendement intégré.

La comparaison des mesures de G avec E_s et E_t , éclairements d'un mètre carré au sol, sur et sous la couverture transparente, permet d'apprécier l'effet de l'inclinaison de la surface de captation du séchoir et le taux de transmission de la couverture transparente (quand il y en a une).

Exemple de calcul d'un rendement intégré

Découpage par périodes de 1 h d'un cycle de séchage s'opérant de 9 h 00

◆ 14 h 00. Les valeurs sont donc ici des moyennes horaires (par exemple: pour la tranche 9 h 00-10 h 00, on prend la moyenne des mesures opérées ◆ 9 h 00 et ◆ 10 h 00) Le débit d'air est ici de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, on a 5 m^2 de compteurs solaires, et le cycle de séchage s'arrête ◆ 14 h 00.



Exemple de calcul d'un rendement intégral

	E_s (Wh/m ²)	$h_f - h_a$ (kJ/kg)	$1,2 \cdot D_s \cdot (h_f - h_a)$	
0 h 00 - 10 h 00	660	130	1 560	

9 h 00-10 h 00	000	13,0	1 500	
10 h 00-11 h 00	780	13,5	1 620	Rendement:
11 h 00-12 h 00	820	13,5	1 620	7956 / (3795 x 5)
12 h 00-13 h 00	800	13,0	1 560	soit: $\eta_{ps} = 42 \%$
13 h 00-14 h 00	735	13,3	1596	
Total/cycle	3 795		7956	

Les appareils de contrôle du processus de séchage

Pendant le séchage, il est nécessaire de contrôler:

- la température de l'air de séchage: il faut la comparer à la température maximale admissible pour le produit, indiquée sur les « fiches produit ». Ce paramètre ne devra pas excéder cette limite en phase III du séchage;
- la température du produit (pour éviter qu'elle soit supérieure à la température maximale du produit, à toutes les étapes du séchage);
- les températures sèche et humide de l'air à la sortie du séchoir avant, pendant et après le séchage, pour déterminer l'humidité de l'air (HR). Si celle-ci est nettement inférieure à l'humidité de l'air maximale, il faut envisager une diminution du débit D_s , de façon à laisser à l'air le temps de se charger de davantage d'eau dans le

séchoir (lors des phases I et II);

- le débit d'air D_S pour permettre la recherche efficace de l'optimum précédent;

- la vitesse et la direction du vent sur le site qui ont une influence sur le fonctionnement d'une cheminée solaire, sur le débit d'air dans le séchoir, sur la température du séchoir lui-même, surtout quand il n'y a pas d'effet de serre.

Avant et après séchage:

- le taux d'humidité initial et final du produit, ou

- le poids initial et final pour contrôler le rapport de séchage (R_S) (chacune de ces mesures permet d'obtenir l'autre).

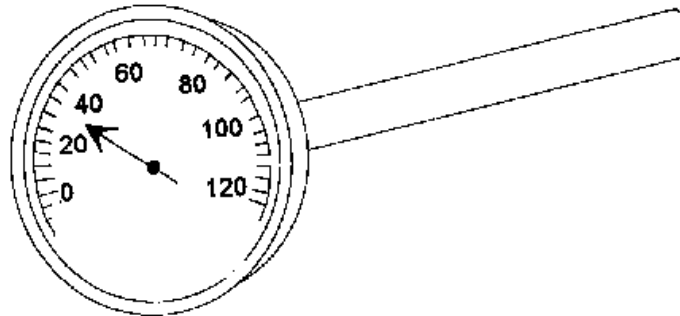
LA MESURE DE LA TEMPÉRATURE SÈCHE

L'instrument le plus simple est le thermomètre à alcool ou à mercure (alcool jusqu'à 50°C , mercure jusqu'à 300°C).

Le temps de réponse de ces appareils est assez long. Ces thermomètres usuels sont peu précis mais peu coûteux.

Les thermomètres bilame

Ils sont constitués de deux rubans métalliques à coefficients de dilatation différents, soudés entre eux. Une variation de température induit une déformation transmise à un cadran d'affichage.. Une sonde est placée à l'endroit requis. Le cadran peut se trouver jusqu'à 40 cm de l'endroit de la mesure. Ces appareils sont robustes et assez coûteux.



Thermomètre bilame

Les thermomètres à résistance électrique

Les thermomètres à résistance utilisent les propriétés des fils en métal (nickel ou platine pour des températures jusqu'à 500°C) dont la résistance électrique, mesurée, dépend de la température.

Ces appareils ont un temps de réponse assez court et sont précis.

Les thermomètres à thermistance

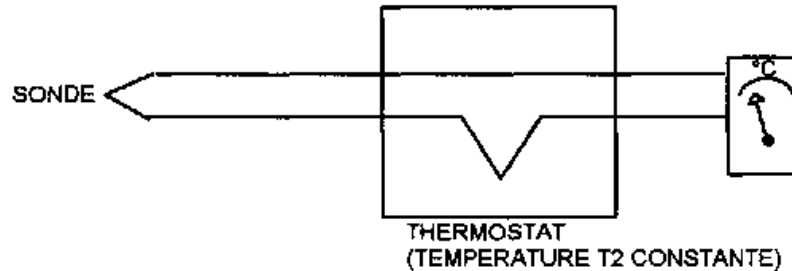
Selon le même principe que les précédents, ils utilisent le germanium ou le silicium. Ils sont très précis et réagissent presque instantanément. Ils permettent un affichage digital. Ils sont très coûteux et leur degré de précision ne se justifie guère pour des opérations de séchage.

Les thermomètres à thermocouple

Lorsqu'on porte la soudure de deux fils de métaux différents (par exemple: cuivre et constantan) à une température T_1 tout en maintenant les deux autres extrémités à température constante T_2 , il apparaît une différence de potentiel électrique entre les extrémités, proportionnelle à la différence $(T_1 - T_2)$. L'affichage est digital ou analogique. Les thermocouples les plus usuels sont constitués de:

- fer et constantan;**
- argent et constantan;**
- nickel et nickel-chrome.**

Ces appareils sont assez précis.



Principe d'un thermomètre thermocouple

0 et comment mesurer une température?

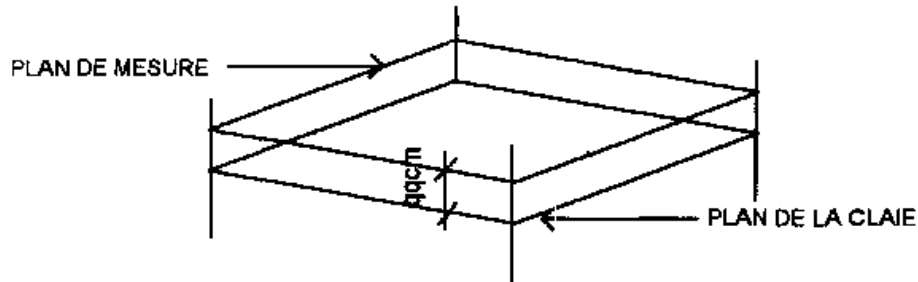
Il est toujours relativement simple de mesurer une température. Mais il n'est pas toujours évident de mesurer la bonne, pour plusieurs raisons précises ci-dessous:

- il faut éviter l'exposition du thermomètre au rayonnement solaire en l'entourant d'une surface réfléchissante (papier aluminium, etc.) et en laissant un espace entre l'enveloppe et l'instrument pour permettre une circulation de l'air. Faute de cela, le thermomètre indiquera une température plus élevée que celle que l'on cherche mesurer (chauffage direct par le soleil ou indirect par l'enveloppe);
- il faut attendre que la mesure du thermomètre soit stabilisée lorsque celui-ci ne présente pas une réponse immédiate;

- il faut toujours s'assurer que le thermomètre est bien sec pour mesurer la température de l'air. Faute de cela, une évaporation de l'eau de surface du thermomètre se produira au contact de l'air. Le thermomètre ne mesurera plus la température de l'air, mais un peu moins puisque l'évaporation de cette eau entraîne un refroidissement: la température sera plus proche de celle de l'air humide;

- enfin, compte tenu des hétérogénéités dans, les mouvements de l'air et dans les produits, la température peut varier sensiblement d'un lieu à l'autre (par exemple, entre le bord et le milieu d'une section du souffoir pour l'air, ou entre le centre et les extrémités d'une claie pour l'air et pour le produit).

Les quelques conseils qui suivent visent à préciser la façon de mesurer la température.

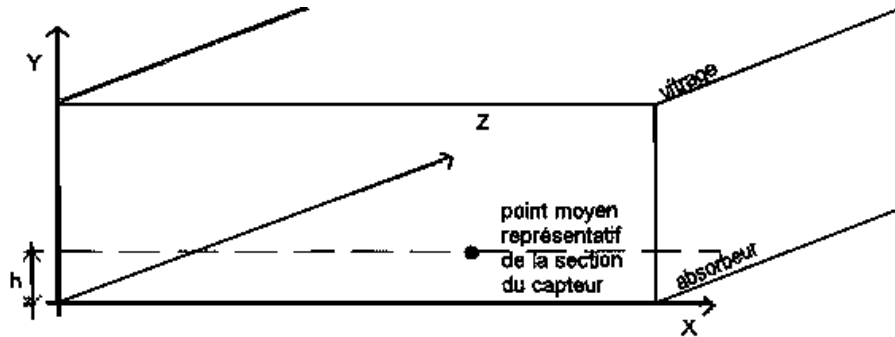


Au-dessus d'une claie ou de la sortie d'une cheminée

Plus le plan de mesure est grand, plus les hétérogénéités de température seront fortes. Il faut alors quadriller ce plan et mesurer la température à l'intérieur de chaque case. On détermine une température moyenne réellement représentative en effectuant la somme des températures de chaque case et en la divisant par le nombre de cases. On peut, pour des mesures ultérieures, mais dans des conditions identiques de répartition du produit sur les claies ou de débit d'air, mesurer la température dans deux, trois ou quatre cases représentatives de la moyenne seulement. On gardera à l'esprit que les cases situées près des bords ne sont pas représentatives de la moyenne, du fait de l'hétérogénéité de la circulation de l'air et de l'isolation.

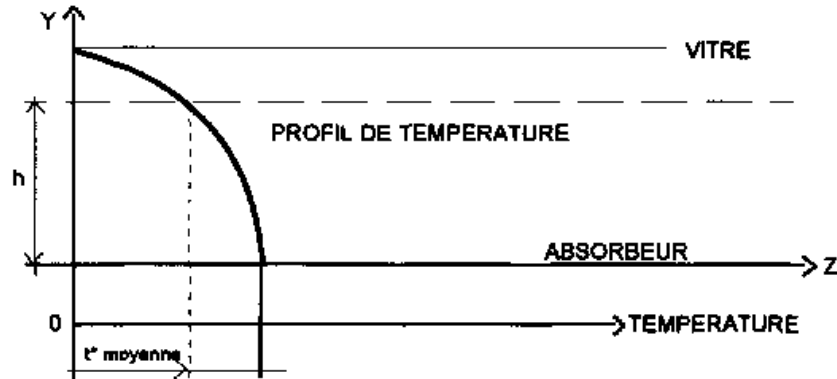
Dans un préchauffeur d'air

Si l'on veut connaître l'efficacité du collecteur solaire, il faut mesurer la température de l'air à sa sortie. à quel endroit?



Dans un pr \diamond chauffeur d'air

Dans un capteur \diamond air, le profil de temp \diamond rature est le plus souvent de la forme:



Profil de température

On détermine ainsi sur Oy la droite correspondant à la température moyenne de ce profil.

Ensuite, dans le plan xOy, sur la droite $y = h$, on effectue plusieurs relevés de température et on détermine le point représentatif de la température moyenne.

***Nota:* La méthode de recherche du point de référence doit être utilisée en régime permanent (niveau d'ensoleillement et débit d'air constant). Dans le cas contraire (régime variable), il est préférable de faire plusieurs mesures en plusieurs points.**

LA MESURE DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR

Les hygromètres à cheveux utilisent la propriété des cheveux de se raccourcir ou de s'allonger suivant l'humidité de l'air.

Ce sont des appareils simples, bon marché. Leur précision est de l'ordre de 5 %. Ils doivent être recalibrés de temps en temps pour compenser la perte d'élasticité des cheveux.

Le domaine de fonctionnement s'établit dans la gamme de 30 à 90 %

d'humidité relative.

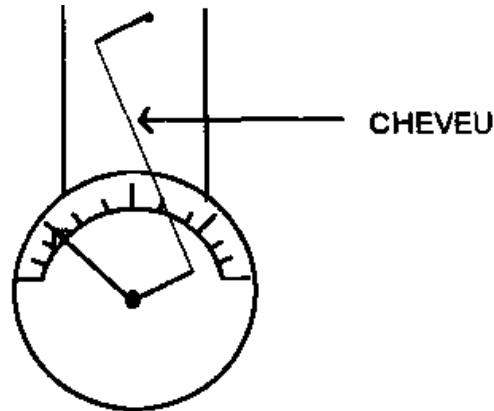


Schéma d'un hydromètre à cheveux

D'autres matériaux hygroscopiques sont utilisés pour la mesure de l'humidité: coton, cellophane, soie, etc.

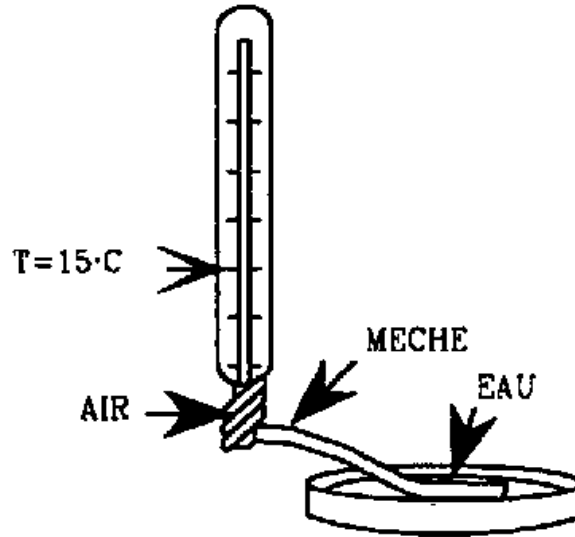
Les appareils précédents ont un temps de réponse de quelques minutes. Pour obtenir une réponse rapide, précise et fiable, il faut employer les hygromètres à capteur capacitif. Ils sont beaucoup plus coûteux que les autres systèmes.

En l'absence de tout appareil spécifique pour la mesure de l'humidité, il est

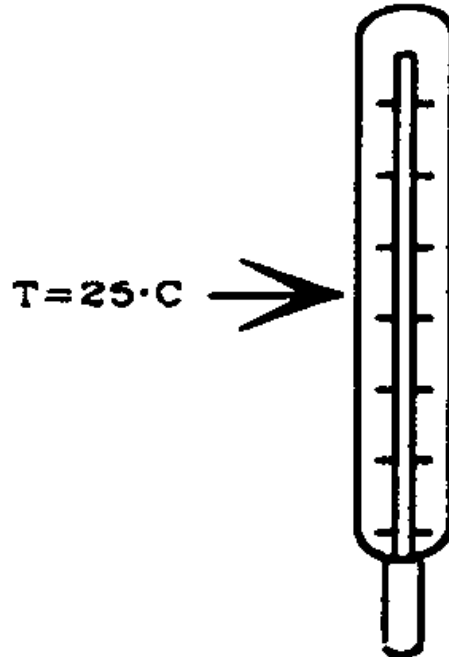
facile de fabriquer un psychromètre à deux thermomètres:

- l'un des thermomètres indique la température sèche (T);
- le bulbe de l'autre est entouré d'une mèche constamment humide (imbibée d'eau par capillarité). Le bulbe doit être placé dans un courant d'air à une vitesse supérieure à 2 m/s. Dans le cas contraire, la précision est mauvaise. Ce thermomètre indique la température humide T_h .

Principe d'un psychromètre artisanal à deux thermomètres



Mesure de la température humide



Mesure de la température sèche

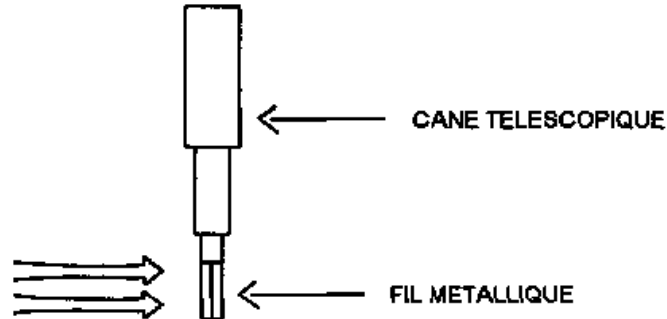
L'humidité relative est obtenue à partir de T_s et de T_h à l'aide du diagramme de l'air humide ou de la table psychrométrique.

Nota: Ce principe peut également être utilisé avec les autres capteurs de

température (thermocouples, résistances, etc.). Il est également appliqué dans le cas des psychromètres du type fronde qui servent à mesurer l'humidité de l'air en extérieur.

LES MESURES DE VITESSES ET DE DÉBITS,

Sur le terrain, le plus pratique des appareils de mesure de vitesse est l'anémomètre à fil chaud.



Anémomètre à fil chaud

Le fil métallique chauffe l'appareil se refroidit plus ou moins selon la vitesse du flux d'air.

La sonde doit être très petite pour ne pas perturber le flux d'air, et être bien dirigée perpendiculairement à ce flux.

La gamme théorique de vitesse mesurable par cet instrument est de 0,05 m/s à 30 m/s Il faut noter que les appareils les plus communs ne sont fiables qu'à partir de 0,3 à 0,5 m/s ce qui, le plus souvent, ne permet pas de mesurer des vitesses de convention naturelle.

Le moulinet à ailettes

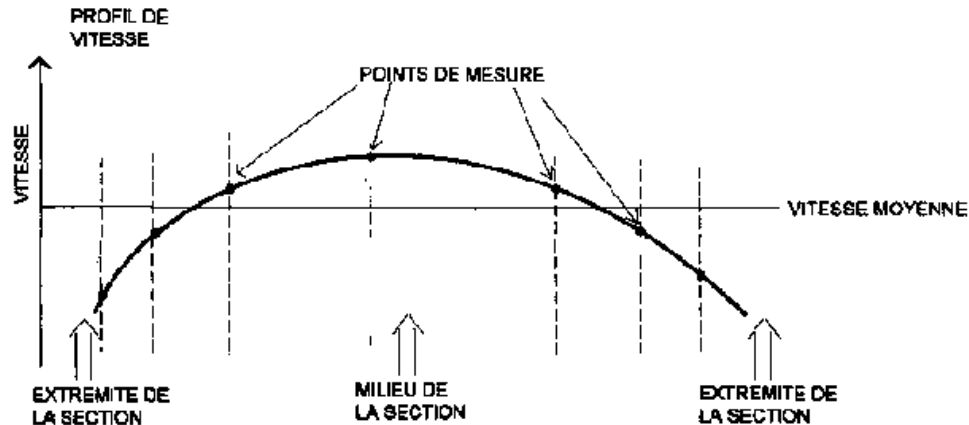
Les ailettes du moulinet placées dans le flux d'air tournent et transmettent un signal mécanique ou électrique à un afficheur. La gamme des vitesses mesurables est de 0,15 à 40 m/s Il existe des mini-moulinets (diamètre de 10 à 15 mm) dont les interférences sur le flux d'air sont faibles, mais ils sont coûteux.

La pratique de la mesure de vitesse

Il faut, dans une section donnée, mesurer plusieurs vitesses. La moyenne arithmétique de ces vitesses donne une vitesse moyenne significative.

Section circulaire

Diviser la section en plusieurs couronnes de même aire et mesurer les vitesses en différents points des circonférences.



Section circulaire

Section circulaire ou carrée

Découper la section en surfaces d'aires égales.

Remarque

Que la section soit circulaire, carrée ou autre, l'anémomètre fil chaud ou ailettes, il faut essayer de faire la mesure dans des zones d'écoulement régulier; c'est-à-dire les plus éloignées de tout coude, rétrécissement de section, ventilateur, etc.

Le tube de Pitot

Ci figure page suivante. Il ramène la mesure de vitesse à une mesure de pressions. Il est essentiellement utilisé en installation fixe pour des mesures dans des gaines de formes régulières. Il ne permet pas de mesurer correctement les faibles vitesses d'écoulement d'air (inférieures à 1 m/s)

La vitesse V dans la section est donnée par:

$$V = 4,4 \sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\rho_0} - 1\right) \cdot h}$$

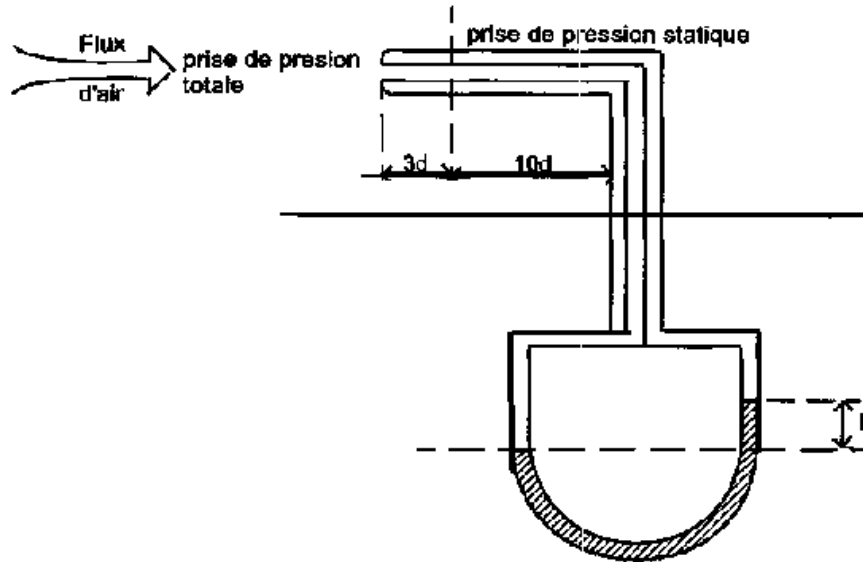
(en m/s)

avec:

- h : différence de hauteur manométrique (en m);

- ρ_1 : masse volumique du liquide manométrique (eau, alcool, mercure) (en kg/m^3);

- ρ_0 : masse volumique de l'air, $\rho_0 \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$.



Le tube de Pitot

- Diamètre de la sonde: d
- Diamètre de la prise de pression totale: $0,3d$
- Diamètre de la prise de pression statique: $0,1d$

LA MESURE DE L'HUMIDITÉ DES PRODUITS

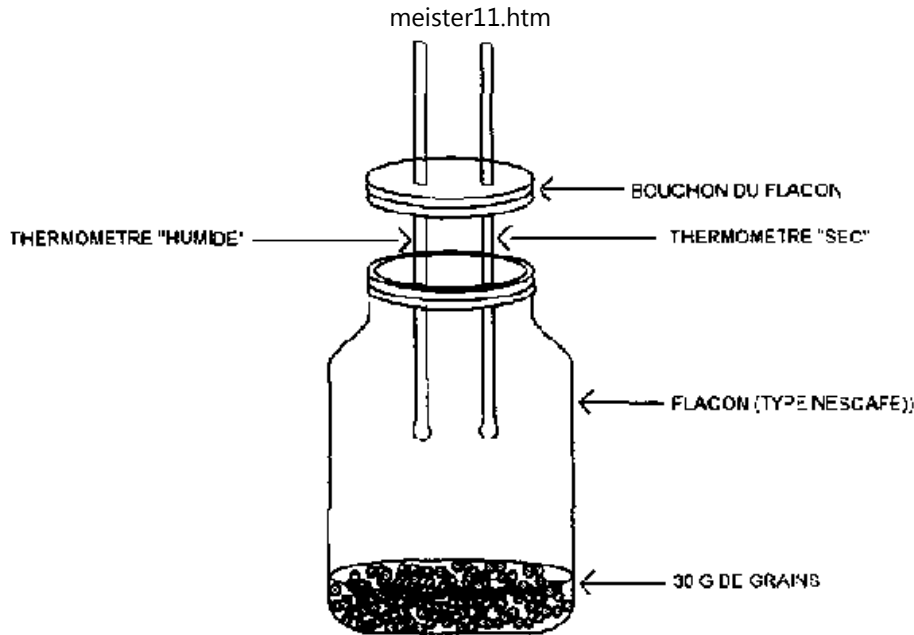
La méthode la plus fiable mais très difficilement applicable sur le terrain est la méthode thermogravimétrique. Un petit échantillon du matériau est pesé, coupé en lambeaux si nécessaire, et séché complètement dans un four environ 200°C pendant 1 ou 2 heures. L'échantillon est séché et nouveau et la perte de poids donne le degré d'humidité. Instruments nécessaires: balance et four.

Une autre méthode, de terrain, qui n'est applicable qu'aux matériaux hygroscopiques, fait appel au degré d'humidité d'équilibre. Un récipient rempli du matériau réduit en petits morceaux est scellé hermétiquement.

Après 10 à 30 minutes, ou plus, l'air au-dessus du produit établit une certaine humidité relative qui est lue par un hygromètre. La courbe de sorption ou de désorption du produit permet alors de déterminer son degré d'humidité. Pour plus de facilité, l'échelle de l'hygromètre peut être calibrée pour lire directement le degré d'humidité du produit.

Ces appareils existent dans le commerce, mais ils peuvent être facilement autoconstruits, l'hygromètre pouvant être en papier ou en deux thermomètres (modèle de l'IRRI pour le riz).

On peut, selon le principe décrit ci-après, utiliser des hygromètres à cheveux munis d'une sonde que l'on place dans le flacon au-dessus du produit ou à l'intérieur de celui-ci pour les céréales.



Appareil de terrain pour la mesure de l'humidité des produits

LA MESURE DE LA TENEUR EN EAU DU PRODUIT L'AIDE D'UNE TUVE (méthode FAO, 1981)

Cette méthode est valable quelle que soit la teneur en eau du produit. Il est important de bien découper ou broyer le produit afin que la dessiccation puisse se faire convenablement. Une fois le produit découpé ou broyé, il

faut rapidement poursuivre le protocole afin d'avoir une bonne estimation de la teneur en eau (éviter les pertes d'eau par évaporation).

Matériel nécessaire

- 1 tube « sèche »;
- 1 balance de précision (ordre du décigramme);
- 3 coupelles de verre ou d'aluminium (8 cm);
- matériel pour découper et éventuellement broyer le produit (couteaux, broyeur électrique, pilon, etc.);
- 1 marqueur indélébile.

Protocole

- Numéroter les 3 coupelles au marqueur.
- Peser les coupelles, noter leurs poids respectifs (vide), les garder au sec.
- Préparation des échantillons:
 - prélever entre 50 et 100 g d'échantillon;

- **découper le plus finement possible et broyer éventuellement;**
- **déposer immédiatement environ 10 g d'échantillon par coupelle, relever les poids avec précision (= poids avant étuvage);**
- **mettre l'étuve 105**
- **110°C pendant 24 h.**
- **Après 24 h. relever les poids respectifs des 3 coupelles (= poids après étuvage).**

Expression des résultats

$$\text{Teneur en eau \%} = \frac{\text{Poids des coupelles avant étuvage} - \text{Poids des coupelles après étuvage}}{\text{Poids des coupelles avant étuvage} - \text{Poids coupelles à vide}} \times 100$$

LA MESURE DE LA TENEUR EN SUCRE D'UN FRUIT

Cette méthode utilise un réfractomètre. Son fonctionnement est basé sur le principe selon lequel l'indice de réfraction d'une solution sucrée est proportionnel à sa concentration en sucre. Cet appareil permet de mesurer

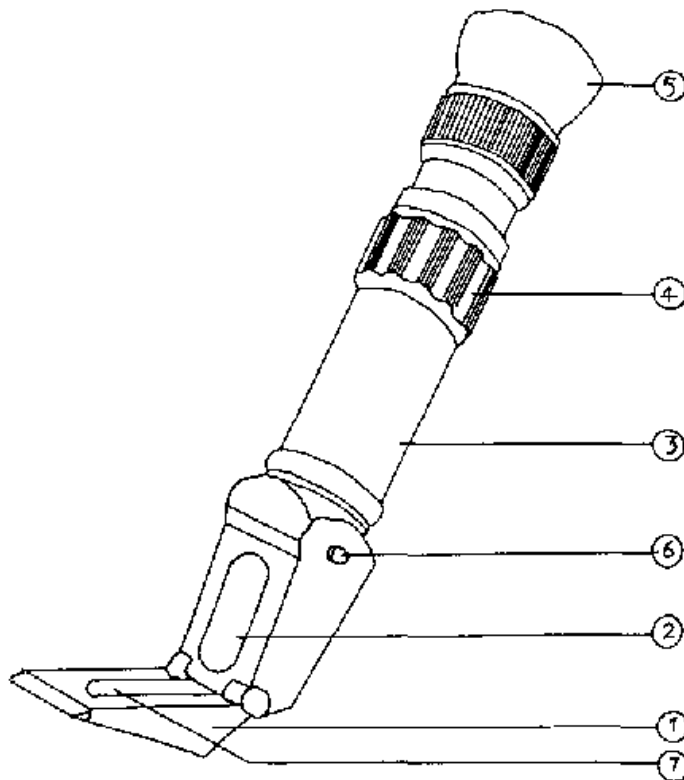
instantanément la teneur en sucre d'une solution sucrée (cf: figure page ci-contre).

L'intérêt est de pouvoir contrôler rapidement la qualité de la matière première et du produit en fin de filtration. Dans le cas des fruits, la teneur en sucre fournit de plus une estimation de la teneur en matière sèche du produit.

Obtention de la solution sucrée

- **Cas de fruits juteux:**

- **presser la pulpe;**
- **recueillir quelques gouttes sur le prisme de l'appareil;**
- **facteur de dilution: $F_D = 1$.**



R◆fractom◆tre

(1) Volet d'◆clairage

(2) Prisme de mesure

(3) Tube

(4) Bouton molet (0-50 % et 50-80 %)

(5) Oculaire réglable

(6) Vis de réglage

(7) Prisme d'clairage

• Cas de fruits non juteux:

Matériel

- éprouvette graduée de 50 ml;
- balance de précision (g ou dgr);
- matériel de découpe (couteau et/ou broyeur: mixeur, pilon...);
- eau pure.

Protocole

- remplir l'◊prouvette gradu◊e d'eau pure, noter le volume avec pr◊cision (= volume d'eau initial);
- pr◊lever 30 ◊ 50 g de pulpe de fruit, noter le poids avec pr◊cision, d◊couper la pulpe dans un r◊cipient, broyer et ajouter de l'eau jusqu'◊ obtenir une solution liquide avec des morceaux homog◊nes en suspension, laisser tremper jusqu'◊ stabilisation du degr◊ brix (quelques minutes ◊ quelques heures);
- relever le volume d'eau restant dans l'◊prouvette (= volume d'eau final);
- calculer le Facteur de dilution (volume d'eau en ml, poids en g):

$$F_D = 1 + \frac{\text{Volume d'eau initial} - \text{Volume d'eau final (n)}}{\text{Poids de pulpe (a)}}$$

D◊termination de la teneur en sucre

Mat◊riel

1 r◊fractom◊tre.

Solution sucra◊e ◊ tester

Protocole

- soulever le volet d'◊clairage du r◊fractom◊tre;
- nettoyer avec soin le prisme ◊ l'aide d'un chiffon de coton doux;
- agiter la solution sucr◊e si elle a ◊t◊ obtenue par dilution de la pulpe;
- prendre quelques gouttes de la solution sucr◊e ◊ tester et les d◊poser sur le prisme de l'appareil;
- refermer le volet d'◊clairage et laisser la solution sucr◊e se r◊pandre sur toute la surface du prisme;
- orienter le prisme d'◊clairage face ◊ une source lumineuse;
- r◊gler l'oculaire afin d'obtenir une graduation nette;
- relever la teneur en sucre de la solution.

R◊sultats

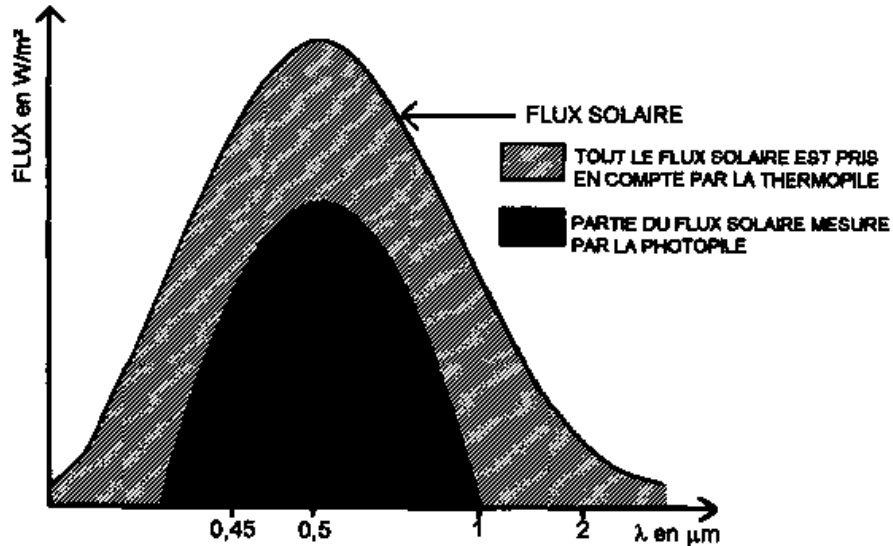
**Teneur en sucre (g/100 g de produit) = Teneur en sucre lue (%) x F D
(sans dimension).**

LA MESURE DE L'ÉCLAIREMENT ET DE L'IRRADIATION SOLAIRE

Les modèles portatifs d'appareils de mesures de rayonnement solaire ne mesurent que le rayonnement global, ne dissociant pas le rayonnement direct du rayonnement diffus. Les choix tant des systèmes que faible inertie, ce n'est pas un gros handicap.

Les appareils les plus répandus sont les pyromètres qui mesurent l'éclairement (W/m^2) et l'irradiation (Wh/m^2). Ils sont généralement précis mais coûteux. C): figure page ci-contre.

Il existe maintenant des modèles de photopiles et de thermopiles. Les premiers sont moins chers mais moins fiables, car la cellule photovoltaïque a une réponse spectrale sélective. Les fabricants d'appareils de mesure de photopile ont introduit un coefficient correctif moyen prenant en compte la sélectivité de leur matériel. Mais selon le lieu de la mesure (zones sahariennes ou sahéliennes, tropicales ou tempérées), des erreurs de 5 à 10 % peuvent être commises sans qu'il soit possible d'améliorer la mesure.



Pyranomètre

CHAPITRE XI: Exemples de calculs

Exemple n°1: Sèchage tout solaire (9 heures de rayonnement suffisant par jour)

Données

On veut sécher 9 kg de bananes, soit 5 kg de produit frais après tri et

parage. L'ensoleillement est jugé satisfaisant pendant 9 heures par jour. L'air ambiant a une température de 30°C et une humidité relative de 60 %.

On considère, d'après lecture du diagramme de sorption-désorption de la banane (non fourni ici), que l'activité de l'eau dans le produit sec (final) doit être égale 0,7.

On se place dans le cas d'un séchage direct, pour lequel la superficie de captage correspond à la superficie du produit en exposition, soit 0,8 m². On suppose d'autre part que le rendement de conversion thermique est de 0,4 (le rendement thermique pour ce type de séchage est toujours faible).

Questions

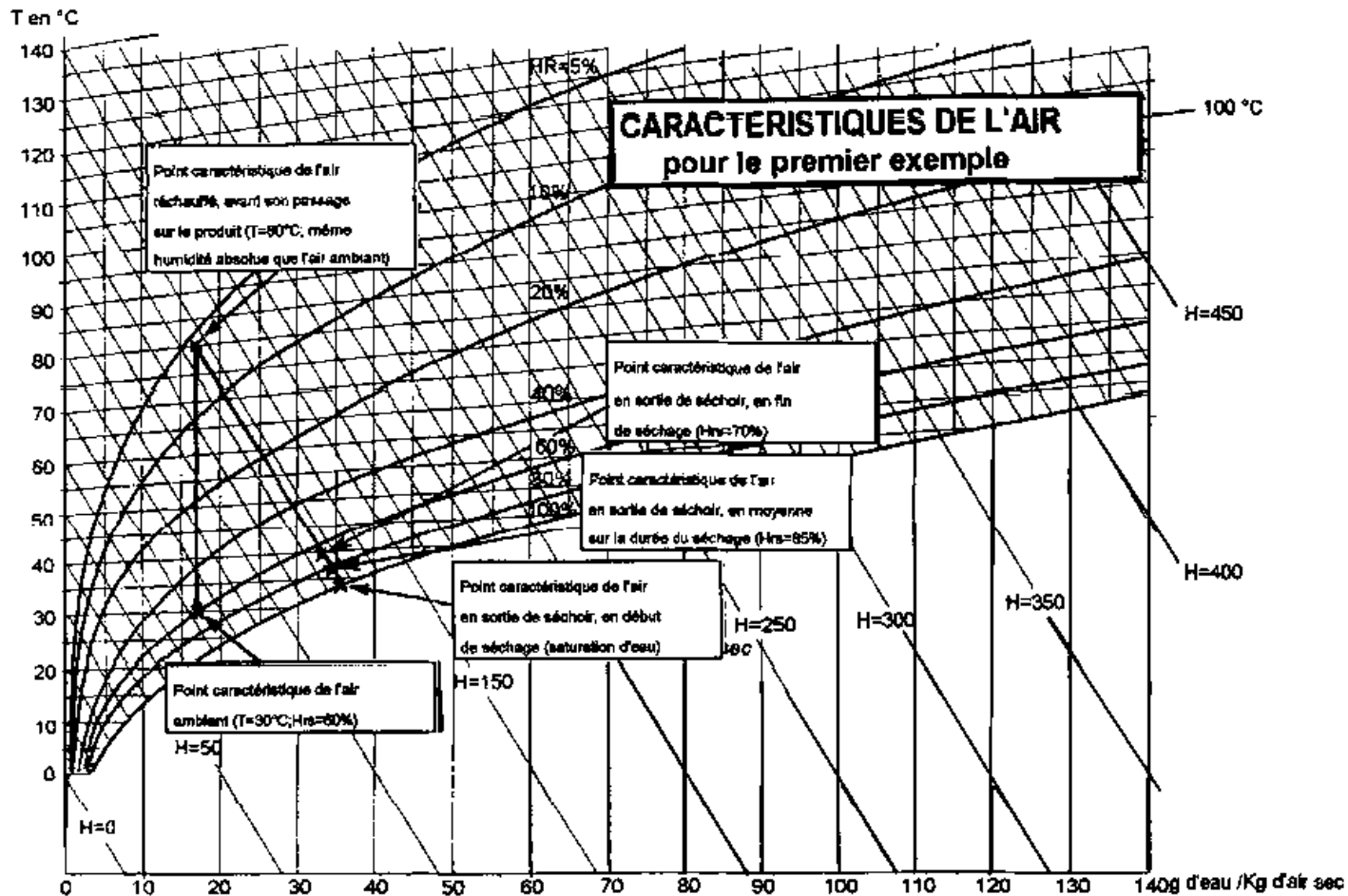
On cherche à savoir:

- 1. Quelle doit être la température de séchage?**
- 2. Quelle doit être la vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau?**
- 3. Le débit d'air pourra-t-il être assuré par la convection naturelle de l'air?**
- 4. L'ensoleillement est-il suffisant pour autoriser l'utilisation d'un tel séchoir pour une telle application?**

Solutions

1. Température de séchage

En consultant la « fiche-produit » de la banane en page 45, on trouve une température maximale admissible de 70°C. On retiendra donc une température de 80°C (70+10) pendant les deux premières phases du séchage. On devra seulement veiller à ce que la température du produit reste inférieure à 70°C, en particulier en phase III du séchage où les risques d'atteindre une telle température sont plus élevés.



Caractéristiques de l'air

2. Vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau

La quantité d'eau extraite par heure en moyenne sur la durée du séchage s'obtient donc:

$$Q_{s_e} = m_i \cdot \frac{(mc_f - mc_i)}{(100 - mc_i)} \cdot t_s$$

avec:

- m_i : masse de produit frais, soit 5 kg de bananes après tri et parage;
- mc_i : teneur en eau du produit frais, donnée par la « fiche produit » de la page 45, soit 72 %;
- mc_f : teneur en eau recommandée du produit séché, donnée par la « fiche produit » de la banane, soit 15 %;
- t_s : durée du séchage, soit ici 18 heures (deux fois 9 heures).

$$D'où: Q_{s_e} = 5 \text{ kg} \cdot (72\% - 15\%) / (100\% - 15\%) / 18,$$

soit: $Q_{s_e} = 0,19 \text{ kg d'eau/h}$.

3. Débit d'air nécessaire

On doit dans un premier temps évaluer les humidités absolues de l'air à l'entrée du séchoir, et en moyenne sur la durée du séchage en sortie de séchoir.

L'humidité absolue de l'air ambiant (x_a) se déduit sur le diagramme l'air humide en fonction de T_a température de l'air ambiant (30°C) et H_r_a , humidité relative de l'air ambiant (60 %). On trouve: $x_a = 16,5 \text{ g/kg a.s.}$ (grammes d'eau par kilogramme d'air sec).

Pour trouver x_m , l'humidité absolue de l'air en sortie de séchoir et en moyenne sur la durée du séchage, il faut connaître H_r_s , humidité relative de l'air en équilibre avec le produit sec (c'est-à-dire à la fin du séchage). En fin de séchage, l'air est en équilibre avec le produit, dont l'eau a alors une activité de 0,7. L'humidité relative d'équilibre en fin de séchage est égale à cette activité, donc: $H_r_s = 70 \%$.

On considère une humidité relative de l'air en sortie de séchoir et en

moyenne sur la durée du séchage en faisant la moyenne des humidités relatives de l'air en sortie de séchoir en début et en fin de séchage, soit:

$$Hr_m = (100 + Hr_s)/2.$$

On a donc: $Hr_m = 1/2. (100 + 70)$, d'où $Hr_m = 85 \%$.

Pour une température de séchage de 80°C , on lit sur le diagramme de l'air humide l'humidité absolue de l'air correspondant à une humidité relative moyenne de 85% , soit: $x_m = 35 \text{ g/kg a.s.}$

On peut alors appliquer la formule qui donne le débit d'air:

$D_s = 1000 Q_{se} / (1,2. (x_m - x_a) \cdot \eta_s)$, avec η_s rendement de séchage (80%).

D'où: $D_s = 1000. 0,19 / (1,2. (33 - 16,5) \cdot 0,8)$,

soit: $D_s = 12 \text{ m}^3/\text{h}$. Un tel débit peut être assuré par les mouvements de convection naturelle de l'air.

4. Calcul de la puissance nécessaire au séchage

L'enthalpie de l'air ambiant h_a se lit sur la diagonale qui passe par le point ($T_a = 30^\circ\text{C}$, $HR_a = 60 \%$). Donc: $h_a = 71 \text{ kJ/kg a.s.}$

L'enthalpie de l'air chaud h_s se lit sur la diagonale qui passe par le point 80°C (température de séchage) et d'humidité absolue $x_a = 16,5 \text{ g/kg}$ (avant d'arriver sur le produit, l'humidité absolue de l'air chaud est toujours celle de l'air ambiant): $h_s = 125 \text{ kJ/kg a.s.}$

La puissance nécessaire est: $P_n = 1,2 \cdot (h_s - h_a) \cdot D_s / 3600,$

d'où: $P_n = 1,2 \cdot (125 - 71) \cdot 12 / 3600.$ Soit: $P_n = 0,2 \text{ kW.}$

Le rendement de conversion thermique tant de $0,4$, la puissance solaire nécessaire est: $P_s = P_n / \text{therm} = 0,2 / 0,4$ soit: $P_s = 0,5 \text{ kW.}$

La surface réceptrice tant de $A = 0,8 \text{ m}^2$, la puissance nécessaire par mètre carré est: $G_n = P_s / A = 0,5 / 0,8$ soit: $G_n = 0,6 \text{ kW/m}^2$

Un rayonnement de cette puissance est le plus souvent accessible. Cette puissance devra surtout être disponible en début de séchage pour évacuer rapidement l'eau libre.

Remarques sur cet exemple de calcul

1. Le « deuxième niveau d'approximation » pour l'évaluation de la quantité d'eau du produit qu'enlève, en moyenne, un kilogramme

d'air, qui consiste à l'exprimer comme la moitié du pouvoir évaporatoire (cf, p. 125), ne peut pas être utilisée ici: l'hypothèse selon laquelle il n'y a pratiquement plus d'eau évacuée par mètre cube d'air en fin de séchage n'est pas valable. Dans le cas présent, l'air enlève presque autant d'eau en fin de séchage qu'en début.

2. Compte tenu de la remarque précédente, il y a peu de risques que la température du produit dépasse 70°C, même en maintenant la température d'arrivée de l'air à 80°C en fin de séchage: la vitesse d'enlèvement de l'eau sera encore suffisante pour assurer un bon refroidissement du produit par la vaporisation.

3. La différence d'enthalpie $h_s - h_a$ peut être fournie, en première approximation, sans la lecture du diagramme de l'air humide. Il suffit de considérer que l'énergie fournie à l'air correspond, pour l'essentiel, à l'apport de chaleur nécessaire pour faire passer l'air de la température extérieure à la température de séchage. Cette chaleur s'écrit:

$$E_{\text{air}} = 1030 \cdot (T_2 - T_1), \text{ avec:}$$

- 1030: chaleur massique de l'eau, en J/kg, relativement constante sur la gamme de températures envisagées;

- T_2 : température de séchage (ici 80°C);
- T_1 : température de l'air ambiant (ici 30°C).

Soit $E_{\text{air}} = 51,5 \text{ kJ/kg. a.s.}$, contre 54 kJ/kg. a.s. obtenu par lecture des enthalpies (125 - 71). La différence s'explique essentiellement par l'énergie nécessaire pour porter l'eau contenue dans l'air de 30 à 80°C (non comptabilisée dans cette approximation).

Exemple n° 2: Données

On envisage de sécher 25 kg de tomates, soit 20 kg après parage, en 8 heures. La surface de captage solaire est encore la surface d'exposition directe au soleil, de 4 m^2 . Le rendement de conversion thermique est de 0,5 et le rendement de séchage est de 80 %. L'air ambiant a une température de 30°C et une humidité relative de 50 %. La courbe de sorption-désorption de la tomate indique par ailleurs le taux d'humidité relative de l'air en sortie du séchoir qui indique un séchage suffisant: 50 %.

Questions

On cherche à savoir:

1. Quelle doit être la température de séchage'?
2. Quelle doit être la vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau?
3. Quel doit être le débit d'air?
4. L'ensoleillement est-il suffisant pour autoriser l'utilisation d'un tel séchoir pour une telle application?
5. Si non, quelles mesures peut-on envisager'?

Solutions

1. Température de séchage

La température maximale admissible par la tomate, indiquée sur la « fiche produit » de la page 53, est de 50°C. On retiendra donc une température de séchage de 60°C, du moins pour les deux premières phases du séchage.

2. Vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau,

La quantité d'eau extraite par heure en moyenne sur la durée du séchage s'écrit:

$$Q_{s_e} = m_i \cdot (mc_f - mc_i) / (100 - mc_i) / t_s, \text{ avec:}$$

- m_i : masse de produit frais, soit 20 kg de banane après tri et parage;
- mc_i : teneur en eau du produit frais, donnée par la « fiche produit » de la page 53, soit 95%;
- mc_f : teneur en eau recommandée du produit séché, donnée par la « fiche produit » de la tomate, soit 7 %;
- t_s : durée du séchage, soit ici 8 heures.

$$D'où: Q_{s_e} = 20 \text{ kg} \cdot (95 \% - 7 \%)/(100 \% - 7 \%)/8,$$

$$\text{soit: } Q_{s_e} = 2,37 \text{ kg d'eau/h.}$$

3. Débit d'air nécessaire

On déduit la teneur en eau de l'air ambiant x_a de sa température T_a (30°C) et de son humidité relative Hr_a (50 %) sur le diagramme de l'air humide: $x_a = 14 \text{ g/kg a.s.}$

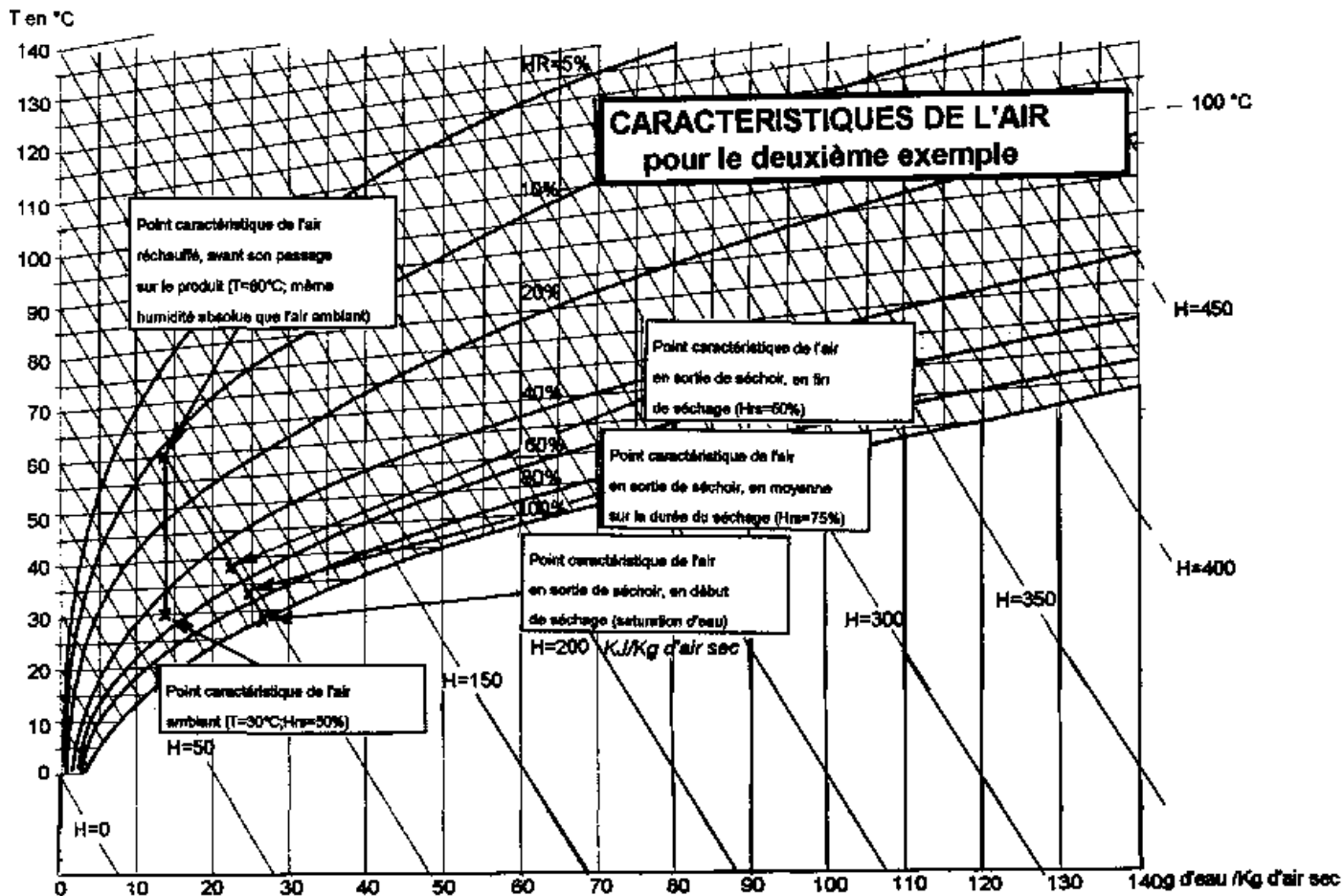


Diagramme enthalpique de l'air humide

L'humidité relative de l'air en sortie du séchoir est de $H_{r_s} = 50\%$ en fin de séchage. L'humidité relative en sortie du séchage et en moyenne sur la durée du séchage est donc de $H_{r_m} = 1/2 \cdot (100 + 50)$, soit $H_{r_m} = 75\%$.

On lit sur le diagramme, pour une température de séchage de 60°C et une humidité relative en sortie de séchoir de 75% , la teneur en eau en sortie du séchoir, en moyenne sur la durée du séchage: $x_m = 24,5 \text{ g/kg a.s.}$

On peut alors appliquer la formule qui donne le débit d'air:

$D_s = 1000 Q_{s_e} / (1,2 \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s)$, avec η_s : rendement de séchage (80%).

D'où: $D_s = 1000 \cdot 2,37 / (1,2 \cdot (24,5 - 14) \cdot 0,8)$, soit: $D_s = 235 \text{ m}^3/\text{h}$.

4. Calcul de la puissance nécessaire au séchage

L'enthalpie de l'air ambiant h_a se lit sur la diagonale qui passe par le point ($T_a = 30^\circ\text{C}$, $HR_a = 50\%$). Donc: $h_a = 65 \text{ kJ/kg a.s.}$

L'enthalpie de l'air chaud h_s se lit sur la diagonale qui passe par le point

60°C (température de séchage) et d'humidité absolue $x_a = 14 \text{ g/kg}$ (avant d'arriver sur le produit, l'humidité absolue de l'air chaud est toujours celle de l'air ambiant): $h_s = 96 \text{ kJ/kg a.s.}$

La puissance nécessaire est: $P_n = 1,2. (h_s - h_a).D_s/3600.$

D'où: $P_n = 1,2. (96 - 65). 235/3600$, soit: $P_n = 2,43 \text{ kW.}$

Le rendement de conversion thermique étant de 0,5, la puissance solaire nécessaire est:

$P_s = P_n/\eta_{\text{therm}} = 2,43 / 0,5$ soit: $P_s = 4,9 \text{ kW.}$

La surface réceptrice étant de $A = 4 \text{ m}^2$, la puissance nécessaire par mètre carré est:

$G_n = P_s/A = 4,9/4$ soit: $G_n = 1,2 \text{ kW/m}^2.$

Cette puissance solaire ne peut être atteinte que dans le meilleur des cas (pays à fort ensoleillement, et à midi).

Elle ne peut en aucun cas être fournie en moyenne pendant 8 heures, et en particulier aux heures du matin où elle est particulièrement requise pour lancer le séchage rapidement.

5. Solutions envisageables

Deux solutions se présentent:

- allonger la durée du séchage en la portant à deux journées (16 heures par exemple), ce qui permet de diviser par deux la puissance solaire nécessaire, et devient tout à fait possible;
- utiliser un système de préchauffage avec un capteur solaire, dont le dimensionnement est précisé ci-dessous.

Supposons que le rendement de ce capteur est de 0,5 et que l'ensoleillement solaire est de 0,7 kW/m².

La surface totale de captage devra être donnée par:

$$A = \frac{P_n}{\eta_c \cdot G_n}$$

avec:

- A: surface de captage solaire (en m²);
- P_n: puissance nécessaire au séchage, ici 2,43 kW;

- G_n : puissance de rayonnement disponible, ici $0,7 \text{ kW/m}^2$;
- η_c : rendement du capteur solaire, ici $0,5$.

On obtient donc $A = 2,43 / (0,5 \cdot 0,7) = 6,9 \text{ m}^2$.

Le débit d'air à atteindre par mètre carré de capteur est égal :

$$D^* = D_s / A = 235 / 6,9 = 34 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \text{m}^2$$

Un ventilateur ou une cheminée solaire sera donc probablement nécessaire. On peut par ailleurs vérifier que la température de l'air en sortie du capteur sera proche de la température de séchage retenue. Elle s'écrit en effet:

$$T_2 = T_1 + A \cdot \eta_c \cdot G_n \cdot 3600 / (1,2 \cdot C_p \text{ air} \cdot D_s)$$

avec:

- $C_p \text{ air}$: chaleur massique de l'air (en $\text{J/kg/}^\circ\text{C}$): $1030 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$ pour les températures envisagées;
- T_2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en $^\circ\text{C}$);

- T_1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage, ici 30°C ;
- D_s : débit d'air, ici $235 \text{ m}^3/\text{h}$;
- A : superficie totale de captage des rayons solaires, ici $6,9 \text{ m}^2$;
- η_c : rendement thermique du capteur, ici $0,5$;
- G_n : irradiation solaire moyenne, ici 700 W/m^2 ($0,7 \text{ kW/m}^2$).

On a donc: $T_2 = 30 + 6,9 \cdot 0,5 \cdot 700 \cdot 3600 / (1,2 \cdot 1030 \cdot 235) = 59,9^\circ\text{C}$.

La température de séchage préconisée est de 60°C .

