

Cours Séchage thermique

Transferts de matière

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment.

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation.

Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface.

Transferts d'eau en séchage

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure I.1).

Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau.

Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides.

Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle.

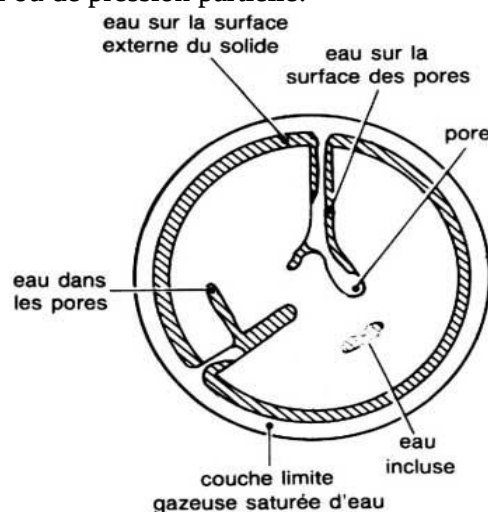


Figure I.1 : représentation schématique d'un solide humide

Description physique du séchage

Les caractéristiques du séchage d'un produit ont une meilleure description lorsqu'elles sont représentées par des courbes. L'une des plus intéressantes et indispensable représentation est le taux d'humidité du produit n_s en fonction du temps t donnée sur la figure I.2, ou encore la vitesse du séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du temps t donnée sur la figure I.3. Ces courbes de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent).

Krisher a proposé un autre mode de représentation; c'est la vitesse de séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du taux d'humidité n_s représentée sur la figure I.4.

Ces trois types de représentation, mettent en évidence l'existence de plusieurs phases, pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) ;
- la phase à vitesse de séchage constante (BC) ;
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

C: est le point critique du séchage.

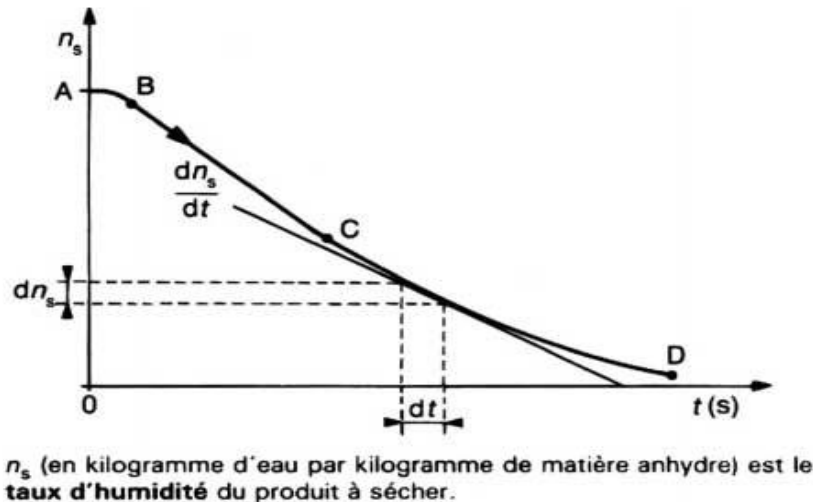


Figure I.2 : Courbe de séchage $n_s = f(t)$

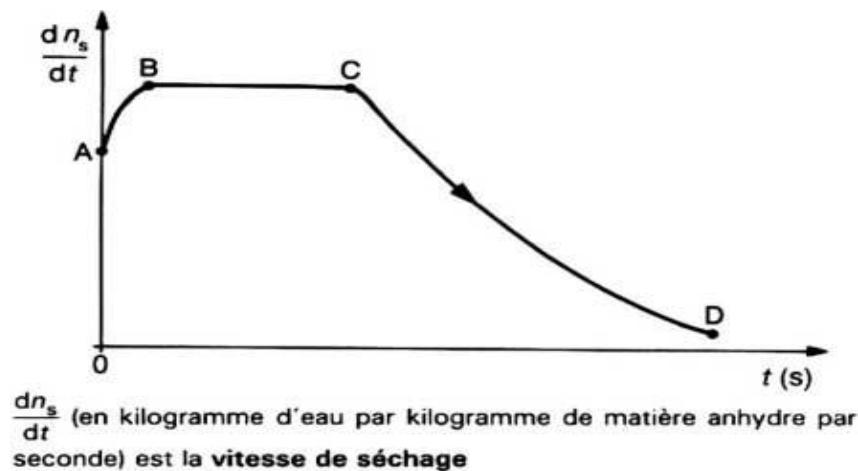


Figure I.3 : Courbe de séchage $\frac{dn_s}{dt} = f(t)$

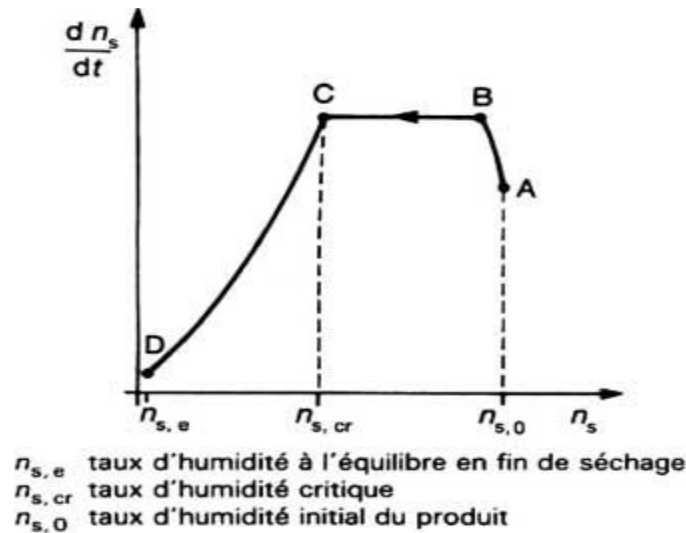


Figure I.4 : Courbe de séchage $dn_s/dt = f(n_s)$

- **Phase transitoire (AB)**

A: est la valeur initiale de l'humidité.

Lorsque le produit, qui a une température et une humidité constante est mis dans le milieu du séchage, le produit ajuste sa température à la température humide du solide, parce que le produit est plus froid que l'air et la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit est faible. Dans ce cas l'air chaud entraîne une élévation de température du produit jusqu'à ce que le transfert de chaleur compense exactement le transfert de matière. Elle n'est pratiquement pas détectée, et n'a pas lieu lors du séchage des produits en particules ou en feuilles.

- **Phase à vitesse de séchage constante (BC)**

Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. Il s'y forme une couche limite, où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte, soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, au sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide.

La température du produit reste constante et égale à la température dite humide du fluide de séchage. La nature du produit n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage qui, pendant cette phase, est égale à:

$$\frac{dw}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G \cdot A (P_s - P_w)$$

M : Masse du produit à sécher (kg)

A : Surface à travers laquelle, s'opère le transfert d'humidité (m^2)

P_s : Pression de vapeur d'eau à la température T et à la surface du produit, pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturée à la température du produit ou température humide (Pa)

P_w : Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa)

K_G : Coefficient global de transfert de matière (s/m)

Cette période s'achève lorsque le produit atteint une teneur en eau appelée, la teneur en eau critique.

- **Phase à vitesse de séchage décroissante (CD)**

C'est la période de ralentissement, à partir de laquelle, la vitesse de séchage met à décroître. La teneur en eau correspondant à la transition entre période **BC** et **CD**, est appelée « teneur en eau critique » ou point critique du séchage.

Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminué, le potentiel d'échange va décroître comme, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage.

Le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement compensé par la chaleur latente, servant à la vaporisation et on assiste donc à une augmentation de la température du produit.

Les séchoirs

Classifications des séchoirs industriels

Les séchoirs industriels sont classés selon :

a) Propriété physique de la matière

Les propriétés physiques de la matière à sécher sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir.

b) Méthode d'approvisionnement en énergie

Lorsque l'énergie est fournie au produit (transfert de chaleur par convection) par l'air chauffé, le séchoir est classé de type convectif. Si la chaleur est transférée au produit avec un contact direct, le séchoir est classé de type conductif.

c) la gamme de température

Les systèmes de séchage peuvent être classifiés selon la gamme de température de fonctionnement, soit à hautes températures ou à basses températures. Les types de séchoir à hautes températures, sont employés lorsque le produit nécessite un gaz très chaud, et reste en continuité jusqu'à ce que le produit soit séché (le bois par exemple). Pour les types de séchoir à basses températures, ces dernières soient inférieures à 100°C.

d) mode de répartition des nourritures

- Séchage en couche mince:

Les fruits et légumes sont posés sur des claies, et séchés en couche mince lorsque l'air chaud traverse les produits de bas vers le haut.

- Séchage en couche épaisse:

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages, les céréales, le café etc. l'air chaud est soufflé dans un amas des produits, reposant sur une grille perforée.

les différents types des séchoirs solaires

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.

- Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement le produit, le séchoir indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.
- Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection ventilée (forcée) si elle est assurée par une action mécanique.

Les séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposés même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (figure I.5.a).

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).

a-Les séchoirs solaires directs

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée) (figure I.5.b), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur (figure I.5.c), du fait de la rusticité des modèles.

Ce type de séchage présente deux avantages :

- les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,
- ils sont soumis à un effet de serre, au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement, les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels.

Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture, et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilités. Les matériaux et techniques employés doivent être compatibles avec l'air chaud humide et les 15 produits à sécher. S'il s'agit d'améliorer des procédés traditionnels, ceux-ci fourniront une base de solutions classiques et adaptées.

Ces appareils conviennent bien à une production artisanale, dispersée et diversifiée. Leur productivité est assez faible, de l'ordre de 5 à 10 kg de produits frais par mètre carré de claies. Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures, et trois à quatre jours.

Les bottes de séchage sont de petites unités, transportables, destinées le plus souvent à la cellule familiale, pour la conservation de ses produits. Des surchauffes peuvent y apparaître du fait de leur faible volume et du faible débit d'air qui les traverse en convection naturelle.

Les séchoirs "serres", sont une version à grande échelle des bottes de séchage ; leur utilisation est à envisager lorsqu'il faut sécher une grande quantité de produits frais. Pour être efficaces, les surfaces de séchage doivent être limitées à quelques mètres carrés.

— Avantages :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des poussières, des insectes, des animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.

- Pas besoin de main-d'oeuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

Inconvénients :

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure .

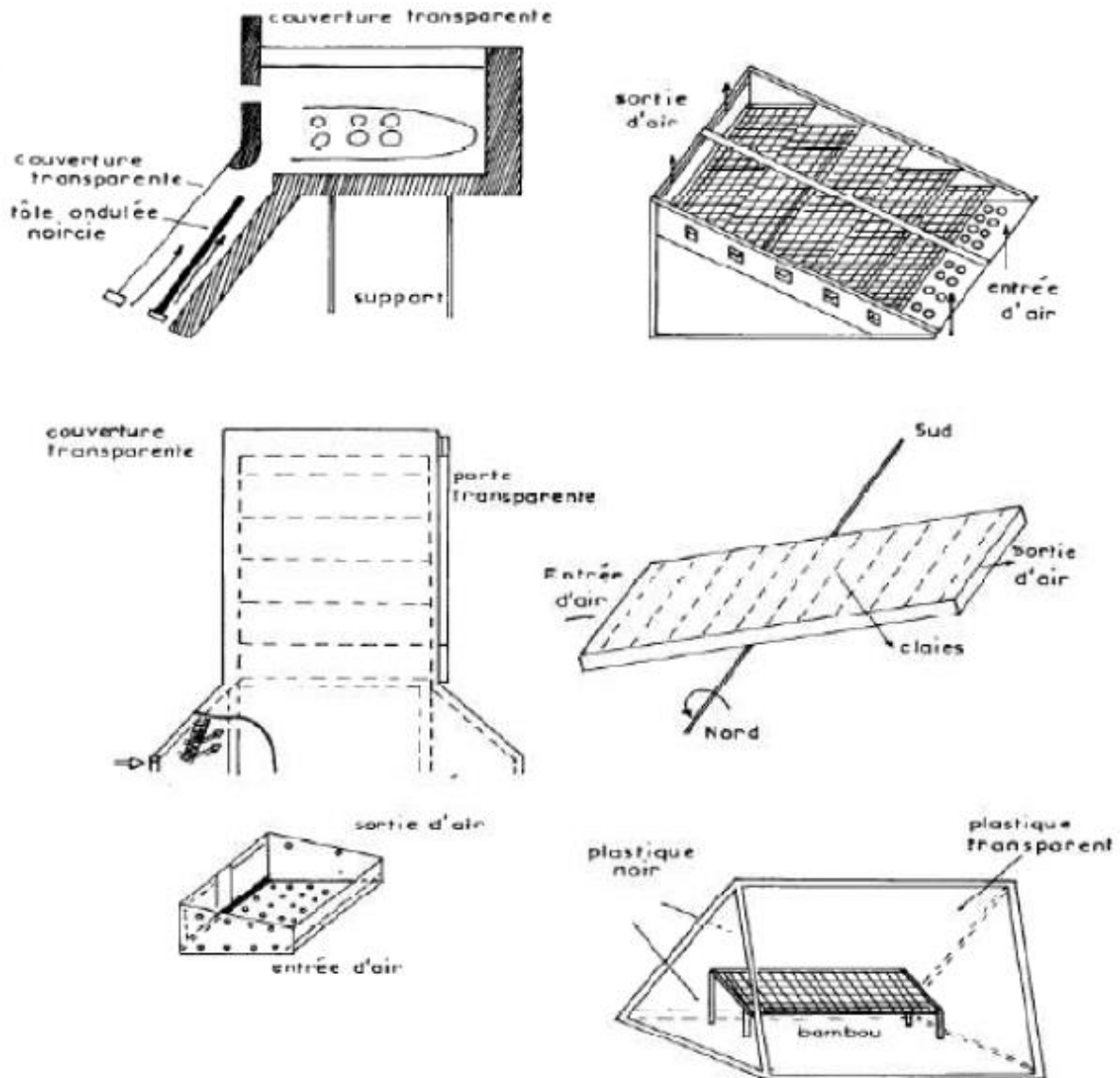


Figure: Exemples des séchoirs solaires directs simples

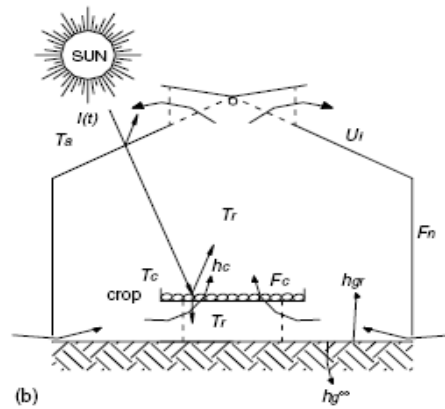


Figure I.5.b : schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle

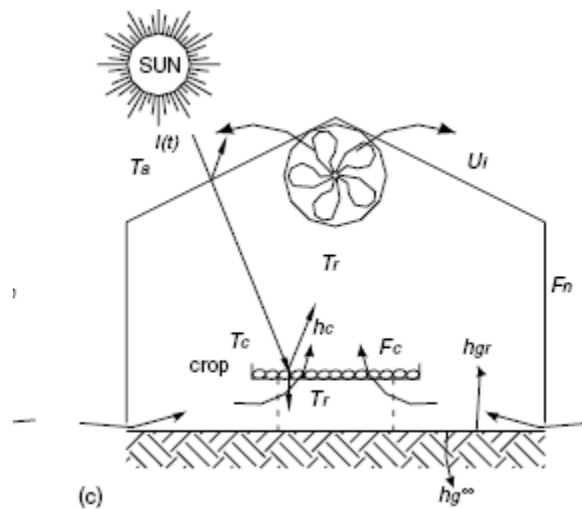


Figure I.5.c : schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée

b- Les séchoirs solaires indirects

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher (figure I.6).

L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé.

⚡ **Avantage :**

- Le produit est protégé contre radiation du soleil directe .Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).

⚡ **Inconvénients :**

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- plus compliqué à réaliser.

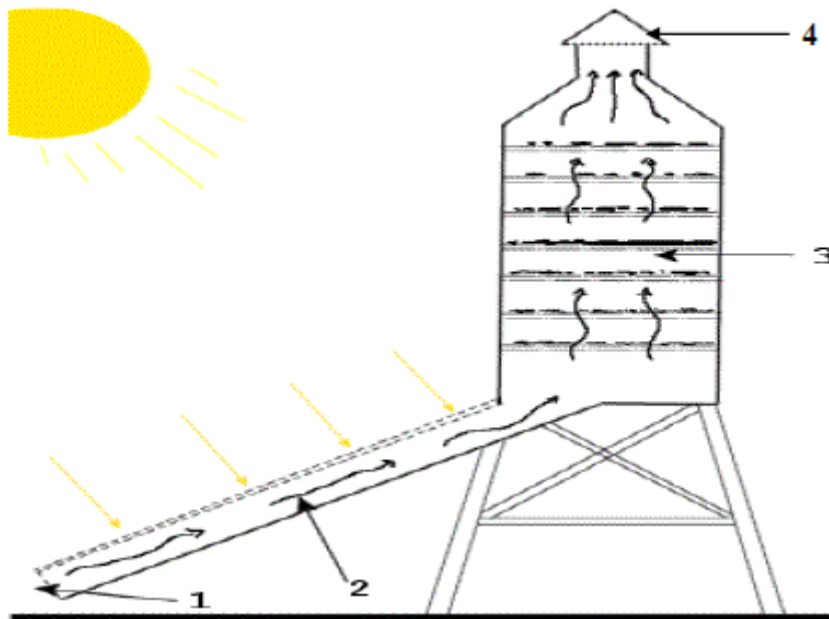


Figure (I.6): Séchoir solaire indirect

1. Entrée d'air.
2. Partie exposée aux rayons du soleil, sous une vitre.
3. Claie.
4. Cheminée.

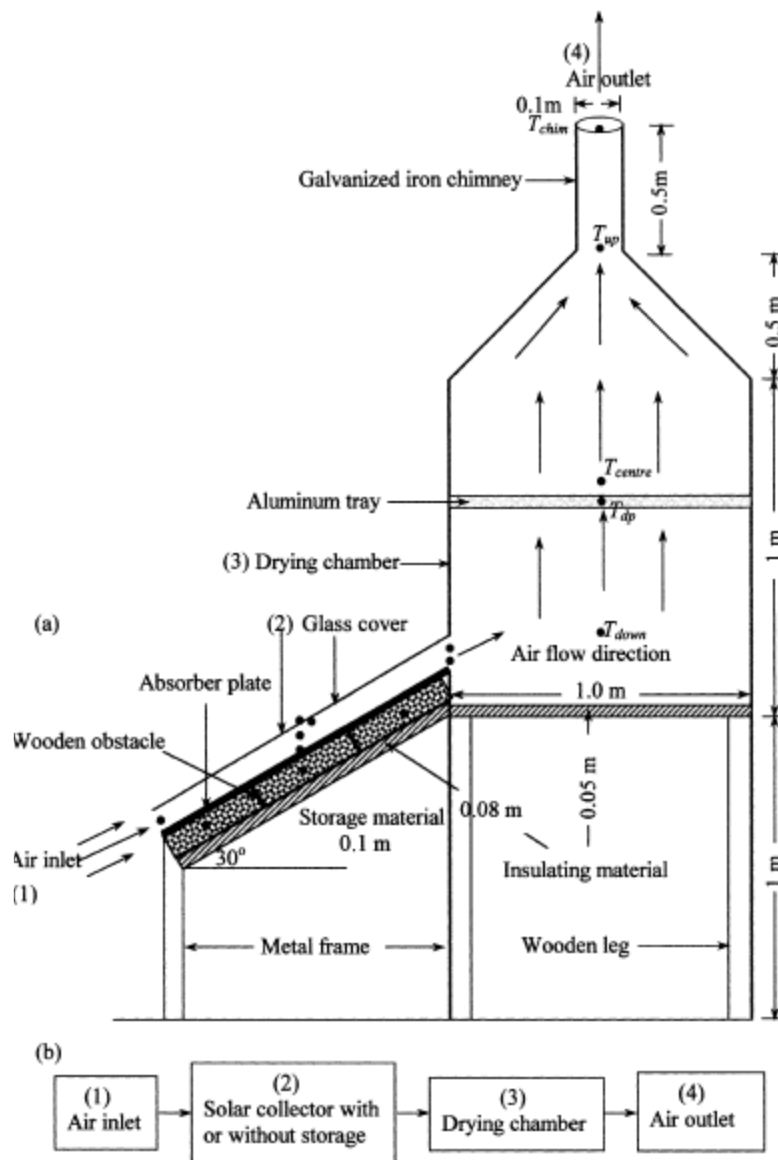


Figure I.6 : schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle

c-Les séchoirs mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs.

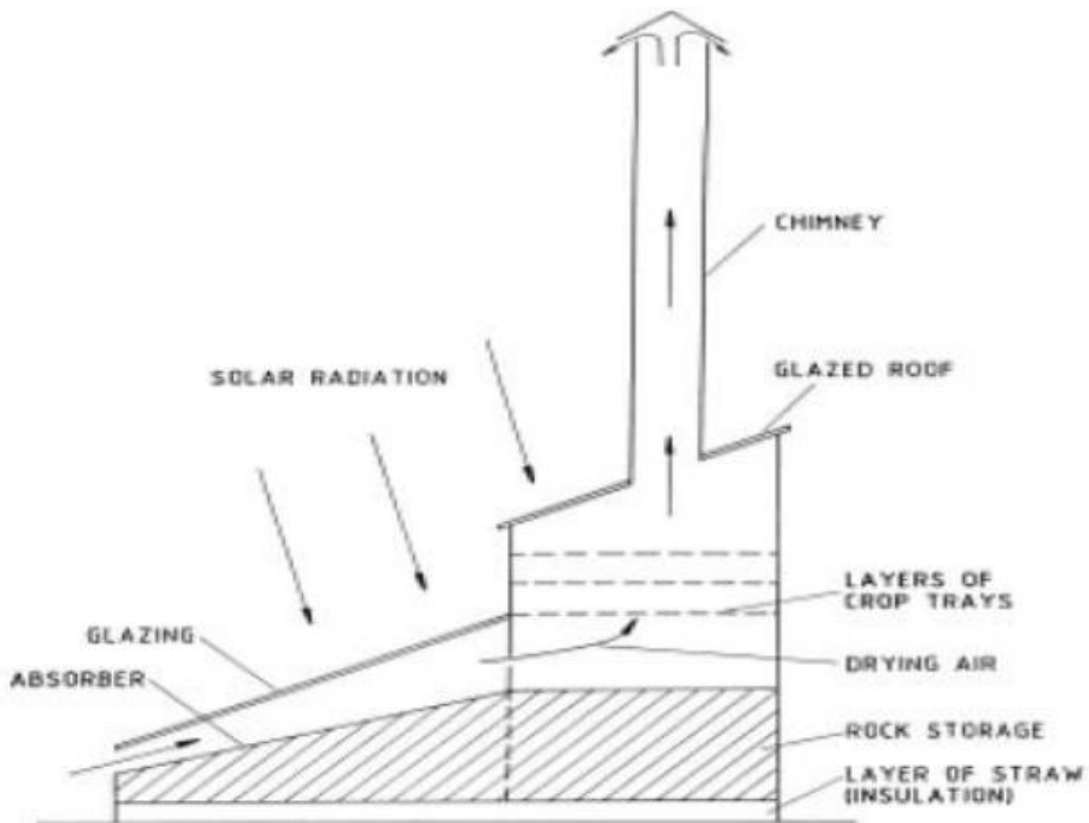


Figure (I.7): Séchoir solaire mixte

d- Les séchoirs hybrides :

Ces séchoirs utilisent une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation.

L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

-Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.

-Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

⚡ Avantages

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Forte augmentation de la production par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

⚡ Inconvénients

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

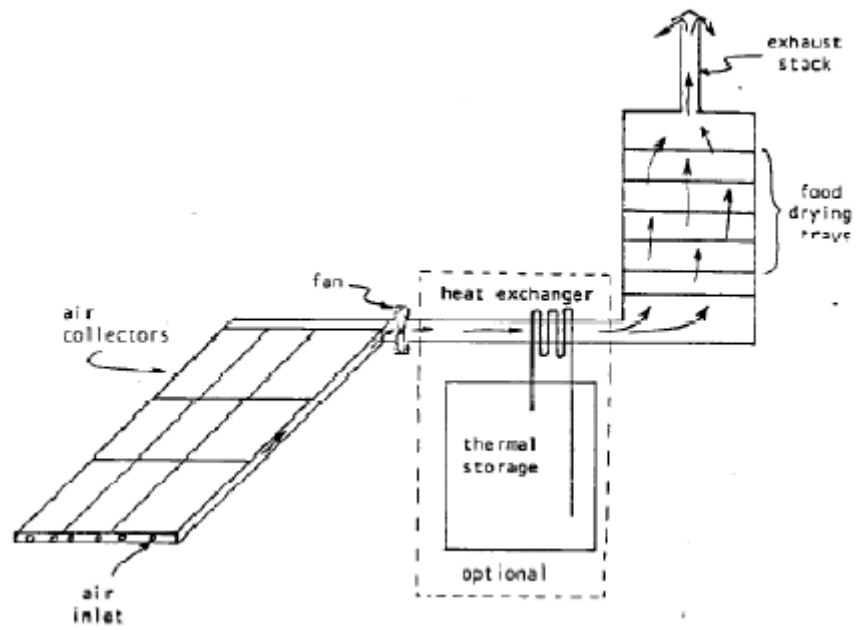


Figure (I.8): Séchoir solaire hybride