



Déshydratation solaire : principe et fonctionnement

Fiche réalisée suite à la rencontre du 20 mars 2024 en compagnie d'Alejandro Deverre

Principes généraux

La déshydratation, en l'occurrence des produits végétaux issus des fermes (fruits, légumes, plantes aromatiques ...), consiste à réduire le taux d'humidité afin d'améliorer la conservation. Le développement des pathogènes dans les aliments dépend en effet de l'humidité de ceux-ci, ainsi que de « l'activité de l'eau ». C'est la facilité qu'auront les micro-organismes à utiliser l'eau. La déshydratation permet de réduire cette activité en dessous du seuil de développement de la plupart des pathogènes, sans pour autant nécessiter des températures élevées (une déshydratation autour de 35°C fonctionne très bien).

Le procédé se distingue de la cuisson, qui fait intervenir une modification chimique de l'aliment sous l'effet de la chaleur (*ex : réaction de Maillard*). La cuisson est également une méthode de traitement hygiénique (traitement par la chaleur, selon un couple durée/température > 63°C). Le mécanisme de déshydratation n'est donc pas comparable à la cuisson, ni en ce qui concerne la composition (*modification chimique pour la cuisson, et principalement physique pour la déshydratation*), ni la conservation (*élimination des pathogènes pour la cuisson, réduction du taux d'humidité pour la déshydratation*).

L'analyse nutritionnelle des fruits séchés obtenus par déshydratation présente de très bons résultats sur le maintien des teneurs en nutriments, ici comparativement au séchage par rayonnement direct (au soleil).

	Rayonnement DIRECT	Température CONTRÔLÉE 35°C
Vitamine A	70 – 85%	80 – 95%
Vitamine C	50 – 70%	70 – 90%
FIBRES ALIMENTAIRES	70 – 90%	80 – 95%

Taux de conservation des vitamines A et C et des fibres alimentaires d'une mangue séchée par deux processus. Source : Alejandro Deverre

Le rayonnement direct influence la qualité des aliments, principalement en provoquant la dégradation de leur matière : les rayons altèrent les molécules dont la taille dépasse leur longueur d'onde. Ce sont donc principalement les UV, de faible longueur d'onde, qui dégradent les molécules des fruits¹.

La vitamine C est par ailleurs très sensible aux conditions thermiques, plus qu'au rayonnement direct. Sa dégradation dans un produit s'avère plutôt proportionnelle à la température de traitement. Une déshydratation contrôlée à température moyenne/basse permettra donc une meilleure conservation de la vitamine C.

¹ En physique, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du rayonnement est élevée, ce qui permet de casser des structures moléculaires complexes.

La déshydratation peut prendre diverses formes :

- Radiation directe (séchage « au soleil »),
- Radiation indirecte (à travers un matériau transparent, un système de miroirs ...),
- Air chauffé (via tout type de procédés),
- Congélation/sublimation² (lyophilisation).



Exemples de déshydrateurs solaires à rayonnement. Exemple d'hybridation photovoltaïque pour alimenter une ventilation assurant la circulation de l'air. Source Alejandro Deverre.

Le procédé qui nous intéresse ici est la déshydratation par air chauffé au rayonnement solaire, via un échangeur thermique (panneau solaire thermique). Il s'agit vraisemblablement du procédé présentant le plus d'avantages, à l'échelle de petites fermes diversifiées souhaitant développer une gamme de produits déshydratés :

- Respect du produit et des propriétés nutritives ;
- Coût de fabrication limité et technologie libre facile d'accès ;
- Simplicité de mise en œuvre et coût de fonctionnement faible voir nul.

Une grande variété de systèmes de chauffage existe néanmoins et il est tout à fait possible de concevoir des systèmes hybrides. Ce sera notamment le cas pour des déshydratations en jours courts, ou dans les régions ne bénéficiant pas d'un ensoleillement suffisamment important et/ou suffisamment régulier.



Exemples de déshydrateurs à air chauffé par un collecteur solaire, dans plusieurs configurations. La sortie du collecteur pouvant être positionnée en bas de la chambre de déshydratation ou en haut. Voir conception. Source : Alejandro Deverre.

² Évaporation sous vide de l'eau contenue dans le produit surgelé. La sublimation consiste à réchauffer l'eau surgelée en maintenant une très basse pression ambiante, conduisant à son évaporation sans passer par l'état liquide.

Conservation des produits déshydratés

Si la déshydratation est une méthode de conservation en soit, il reste important de stocker dans de bonnes conditions, afin d'assurer la conservation. Ayant été vidés de leur eau, les produits déshydratés deviennent hydrophiles, c'est-à-dire qu'ils attirent l'humidité. Il est donc important de les entreposer dans un lieu sec et ventilé et/ou protégé de l'humidité (sous vide ou contenant hermétique).

Comme précisé précédemment, il convient également d'éviter l'exposition au rayonnement solaire, qui pourrait dégrader les qualités organoleptiques des fruits et légumes déshydratés (couleur, aspect et texture notamment).

Le procédé de déshydratation

La déshydratation est un processus lent, en particulier lorsqu'on souhaite le réaliser à basse température (autour de 35 à 40°C). Une température inférieure à 40°C permet de conserver au maximum les propriétés enzymatiques, tout en inhibant leur activité (réduction de l'activité de l'eau) et en limitant la dégradation des vitamines (dégradation par la chaleur et l'activité enzymatique notamment). Pour autant, cela ne veut pas dire que le produit à sécher atteindra cette température à cœur : il ne s'agit pas d'un traitement thermique mais bien d'un **forçage thermique** pour l'extraction de l'eau.

POUR ALLER PLUS LOIN : HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR

Plus la température de l'air augmente, plus sa capacité à contenir de l'eau augmente (l'humidité relative diminue). Lorsque l'humidité relative de l'air est inférieure à celle du produit à sécher, un transfert d'eau s'effectue mécaniquement depuis le fruit vers l'air qui l'entoure.

L'air chaud se charge de l'eau qui est donc évacuée sous forme de vapeur, alors qu'elle n'aurait pas pu être évacuée à température ambiante.

Ainsi, le séchage à 35°C sera plus long qu'un séchage supérieur à 50°C : la quantité d'eau que peut extraire l'air augmente avec la température (car son humidité relative diminue).

*Il est donc **important de ne pas interrompre le procédé** (durant la nuit par exemple), ou laisser les fruits à l'air libre en fin de déshydratation. Lorsque la température va chuter, l'humidité relative de l'air ambiant augmentera brusquement, dépassant le taux d'humidité du fruit séché. Le mécanisme de transfert s'inversera alors. Si l'humidité de l'air atteint 100% lorsque celui-ci refroidit (réduction de sa capacité de stockage), on dit qu'il est saturé : c'est le point de rosée. L'eau excédentaire ne peut plus être retenue sous forme de vapeur et condense sur les surfaces.*

Il n'est donc pas impossible de déshydrater des produits à plus de 40°C (jusqu'à 80°C environ). Les températures idéales dépendent de multiples facteurs, comme la taille des sections à déshydrater, le produit concerné, le temps imparti ou encore la température extérieure³ ...

La taille des tranches/fruits à déshydrater sera en effet un facteur important : un produit trop gros sera plus difficilement déshydraté. La migration de l'eau depuis l'intérieur vers l'extérieur sera plus longue et la surface d'échange avec l'air plus faible pour la même masse d'eau à évaporer. Par ailleurs, si le forçage thermique est important et les sections trop grosses, une membrane sèche peut se former à la surface du fruit, inhibant partiellement ou totalement la migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur. Ce sera particulièrement le cas des produits à forte teneur en sucre : le sucre peut cuire/caraméliser et ainsi former une couche imperméable à la surface du fruit.

³ Pour une déshydratation solaire en été, la température extérieure peut être élevée en plein soleil, parfois supérieure à 40°C. Dans ce cas, l'air en entrée du déshydrateur sera déjà à une température élevée et la durée/température de séchage en seront impactées. Par ailleurs, pour que le forçage convectif fonctionne bien au sein de la cellule de déshydratation, il est nécessaire qu'une différence de température s'installe entre l'entrée et la sortie : si l'air entre à 40°C dans l'échangeur thermique, il s'échappera à une température bien supérieure en sortie de déshydrateur (cheminée ou autre).

Par ailleurs, la peau des fruits est généralement un frein à la déshydratation : il s'agit précisément d'une membrane qui limite la dessiccation des fruits, et réduit donc grandement les échanges d'eau avec l'air ambiant.

Conception d'un déshydrateur

La construction d'un déshydrateur solaire à air n'est pas complexe, mais il convient de le concevoir et le dimensionner correctement. Ceux-ci sont composés de deux parties principales :

- Le **collecteur solaire ou échangeur à rayonnement**, qui permet à l'air de chauffer par la seule action du rayonnement solaire. L'air chaud, dont la densité diminue, peut monter via le collecteur pour entrer dans le second élément ;
- La **chambre de déshydratation** ou **chambre de dissécatation**, où sont disposées les claies et où circule l'air chauffé par le collecteur.

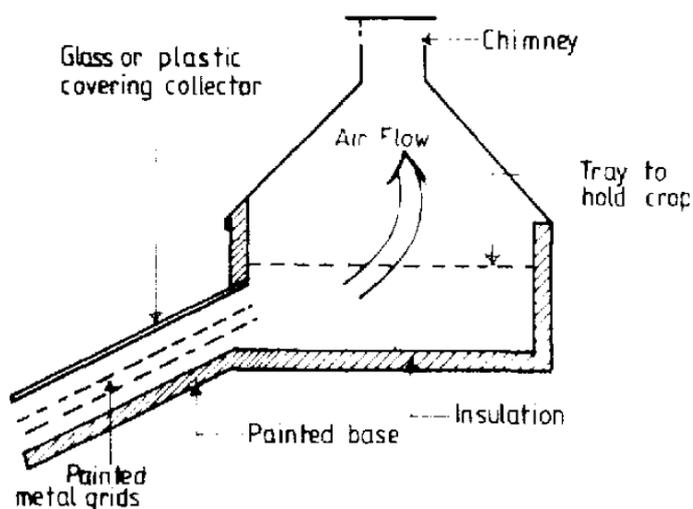


Schéma du principe de conception d'un déshydrateur à air chauffé par un collecteur solaire (échangeur thermique à rayonnement direct). Source



Déshydrateurs à air chauffé par un collecteur solaire (échangeur thermique à rayonnement direct). Autoconstruction Alejandro Deverre.

1 DIMENSIONNER LA CHAMBRE DE DESSICATION

C'est la dimension qui conditionnera le reste de l'installation : elle doit être pensée en fonction du volume de fruits/plantes à traiter en une seule opération. Selon l'épaisseur, la taille des produits, leur masse, etc. il faudra sans doute réaliser des essais. Les produits sont coupés et étalés sur des claies, qui sont empilées dans la chambre de séchage.

On considère généralement que les claies peuvent être rapprochées jusqu'à 5 cm les unes des autres. En dessous de 5 cm, on prend le risque de limiter la circulation de l'air entre les étages. Les dimensions des claies sont relativement libres, pouvant atteindre jusqu'à 1 m

sans problème, à condition d'être assez solides. Il s'agira simplement de s'assurer que l'air circule bien partout dans le volume concerné (voir circulation de l'air, tirage thermique).

2 DIMENSIONNER LE COLLECTEUR

Le collecteur consiste simplement en un caisson vitré de 5 à 20 cm d'épaisseur, selon le volume d'air à chauffer. Aspiré en bas, l'air froid circule dans la longueur et chauffe par l'action du soleil. De conception très simple, celui-ci doit toutefois être dimensionné convenablement par rapport au besoin, c'est-à-dire selon la puissance souhaitée de l'installation. Cette puissance dépend elle-même de la capacité d'accueil de la chambre de dessiccation. On considère généralement qu'un collecteur de 2 m² permet de déshydrater environ 10 kg de fruits frais, avec le climat de la France Métropolitaine.

POUR ALLER PLUS LOIN : PUISSANCE DU COLLECTEUR

Pour calculer la puissance équivalente de l'installation, il faut se référer à la puissance fournie par le rayonnement solaire chez vous. Considérons un rayonnement solaire de l'ordre de 800 W/m² en France métropolitaine, si les rayons sont perpendiculaires au collecteur (environ 45°). L'efficacité du collecteur n'atteindra jamais 100% de transfert thermique à l'air, mais pourra s'approcher de 70% dans de nombreux cas. On obtient alors une puissance équivalente de l'ordre de 560 W/m² de surface d'échange.

Pour rappel, on appelle puissance du collecteur la **quantité d'énergie fournie chaque seconde**. Une installation de 560 W qui fonctionne durant une heure à régime constant aura fourni 560 Wh, soit 0,56 kWh.

On ne raisonnera pas en fonction de l'énergie nécessaire, mais bien de la puissance, plus simple à aborder. Pour calculer les besoins en énergie, il faudrait en effet avoir recours à des formules plus complexes, ne permettant pas forcément de dimensionner l'installation.

L'énergie nécessaire pour augmenter de 1°C la température d'un élément dépend de la masse, de sa capacité calorifique ... ($E = m \cdot Cp \cdot dT$)

Une fois que l'on connaît la surface du collecteur, il s'agit de trouver le bon rapport longueur/largeur. En effet, ces dimensions dépendent des températures souhaitées dans la chambre de dessiccation et du débit d'air nécessaire. Plus la largeur du collecteur augmente, plus le débit d'air est important (section d'entrée plus grande, donc renouvellement plus rapide de l'air dans la chambre de dessiccation). Plus sa longueur augmente, plus la température sera élevée en sortie de collecteur (durée de chauffe plus longue). Les dimensions « par défaut » n'existent pas et les essais sont la meilleure façon d'obtenir un procédé qui corresponde aux besoins, en fonction des situations individuelles (climat, ensoleillement, volumes et types de produits à sécher, etc.). Pour autant, les photos « exemples » présentées précédemment, permettent d'avoir une idée des rapports L/l classiquement utilisées, variant entre 1 et 4 environ.

Dans les régions les moins ensoleillées, ou pour les saisons où le soleil est intermittent, il peut être intéressant de surdimensionner légèrement le collecteur. Cela permet de capter plus de rayonnement lorsqu'il est présent et de le coupler à un matériau calorifique afin de gagner en inertie thermique. Cela aura pour effet de lisser la puissance fournie à l'air et donc mieux stabiliser la température au sein de la chambre de dessiccation.

3 CHOISIR LES MATÉRIAUX

Les éléments sont conçus sur le papier, il reste à les construire. Le choix des matériaux est important : ils doivent être adaptés à l'usage prévu (légers si le séchoir doit être déplacé par exemple), mais surtout adaptés au contact alimentaire !

L'usage du bois n'est pas interdit, mais tout élément susceptible d'être en contact avec l'aliment devra être lessivable, par soucis d'hygiène : en l'occurrence l'intérieur du séchoir. Les claies seront réalisées dans un matériau adapté au contact alimentaire.

Éviter la peinture présentant des risques d'émissions de substances toxiques (et donc non autorisée pour un usage alimentaire). En particulier, considérant les températures pouvant être atteintes dans le séchoir, les peintures peuvent s'altérer chimiquement et relâcher des composés toxiques, par contact ou dans l'air. **Ce sera notamment le cas dans le collecteur.**

Pour le collecteur justement, il sera plus efficace si le fond est sombre que s'il est clair, d'où l'importance du choix d'une peinture adaptée si l'on souhaite le peindre en noir.

4 LIER LES ÉLÉMENTS

S'il ne s'agit que d'assembler les deux éléments précédents, la liaison du collecteur au séchoir a une influence sur l'usage du dispositif. Si celui-ci doit être déplacé par exemple, il s'agira d'avoir une liaison démontable, donc la plus simple possible (voir photo).

Par ailleurs, la jonction devra être conçue de façon à empêcher l'entrée des insectes, en utilisant des moustiquaires alimentaires par exemple. Ce sera d'ailleurs le cas de toutes les ouvertures : entrée du collecteur, sortie du séchoir, éventuelles aérations latérales de régulation du débit ...

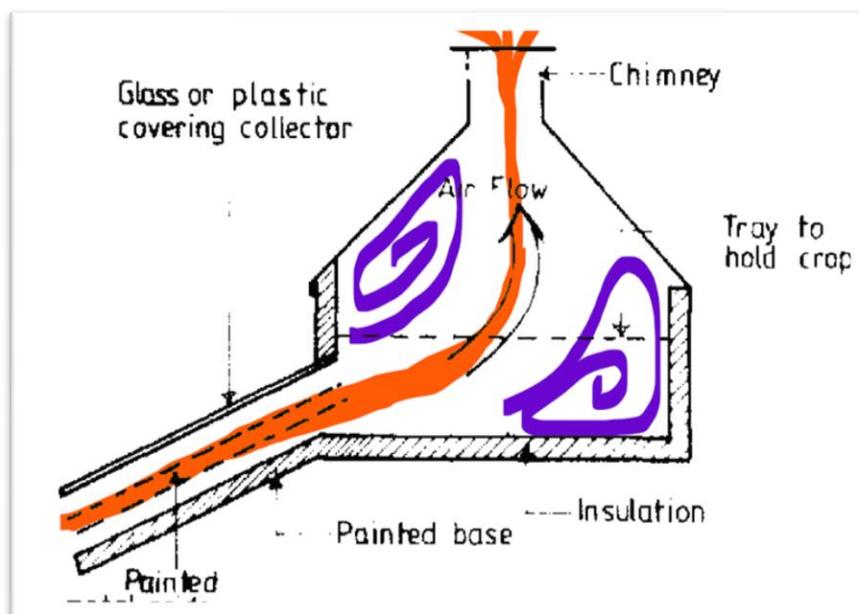
5 S'ASSURER DU TIRAGE THERMIQUE

Il est essentiel de s'assurer de la bonne circulation de l'air : attention à ce que certaines zones ne soient pas « hors du champ convectif ». Le tirage thermique doit donc être suffisant pour que l'air circule bien et partout et que l'humidité soit évacuée. Il ne devra toutefois pas être trop important, pour éviter l'irrégularité du séchage.

Si le tirage est trop important, ajouter des entrées d'air dans la chambre de séchage permettra de le réduire.

S'il est insuffisant, il est possible d'ajouter une cheminée à la sortie pour augmenter le tirage.

Ce sera en particulier le cas pour les séchoirs dont le collecteur insuffle l'air chaud en haut de la chambre de dessiccation. Ce sera le seul moyen d'assurer une bonne circulation de l'air chaud au sein de la chambre (voir schémas en fin de document).



Si le tirage est trop important, ou la chambre de séchage trop profonde, certaines zones pourraient ne pas être balayées par le forçage convectif. Dans ce cas, certaines parties des claies sécheront rapidement, quand les autres ne sécheront pas ou mal.

6 CONTRÔLER LA TEMPÉRATURE

La température de l'air obtenue est un point important (voir introduction : un séchage autour de 40°C est suffisant et conserve une très bonne qualité de produit).

Deux points de mesure de température semblent utiles.

D'abord, au point haut du séchoir, c'est-à-dire à la sortie, pour être sûr que l'air soit assez chaud pour assurer un séchage efficace des claies les plus hautes. Il est également possible d'y mesurer l'humidité relative :

- Si elle est très faible, soit le produit est déjà sec, soit le tirage est important : attention à assurer une bonne circulation dans la chambre de séchage. Si besoin,

réduire le tirage en réduisant la cheminée, ou en ajoutant des entrées d'air dans la chambre de dessiccation.

- Si elle est élevée, le tirage n'est peut être pas suffisant pour évacuer l'humidité. On pourra ajouter une cheminée, à condition que le flux d'air entrant (largeur et l'épaisseur du collecteur) n'ai pas atteint sa limite.

Ensuite, la sortie du collecteur : on y mesure la température d'entrée dans le séchoir. Il s'agit donc de vérifier qu'elle ne soit pas trop élevée, au risque de brûler/cuire les produits.

- Pour augmenter la température d'entrée, rallonger le collecteur.
- Pour la réduire, ajouter des entrées d'air frais dans le collecteur.

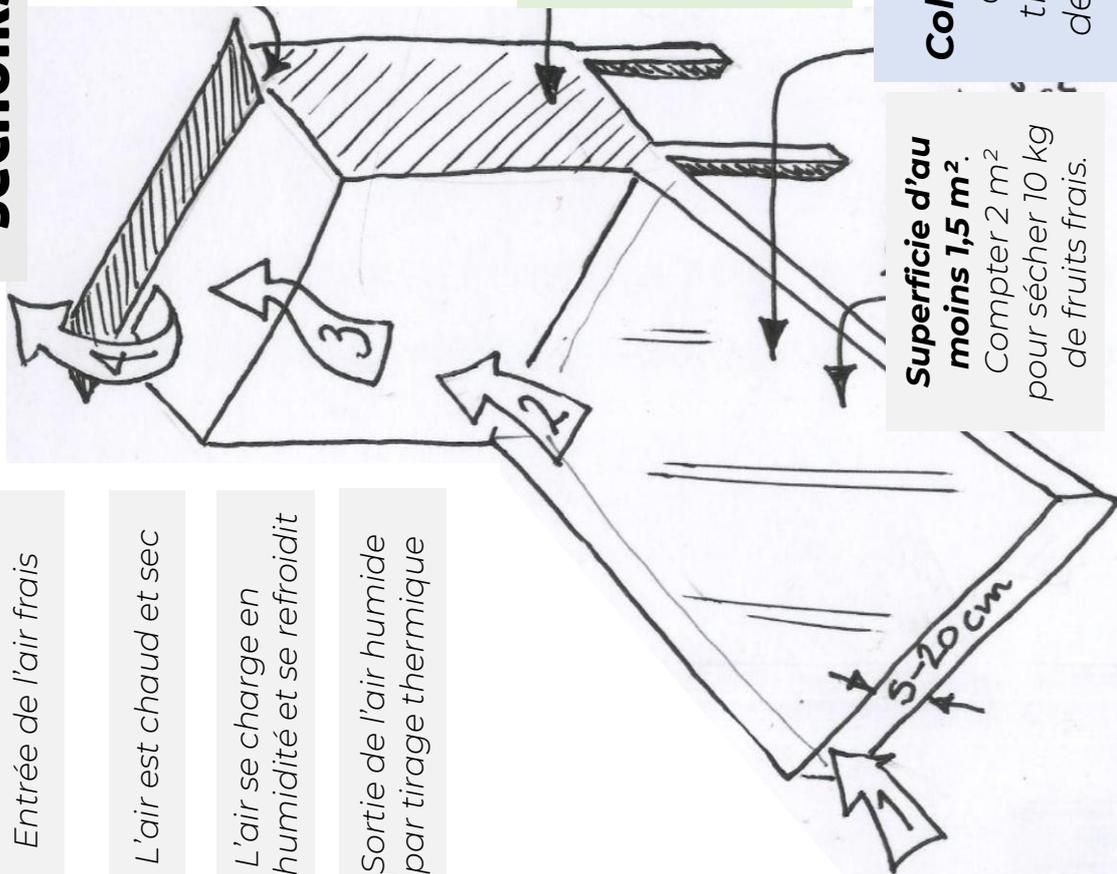
7 FAIRE DES ESSAIS

Une fois le déshydrateur dimensionné et construit, le seul moyen de trouver les bons réglages sera de faire des essais. Selon l'ensoleillement, la conception du séchoir, la saison, le type de produits ... le processus variera. À chaque situation et à chaque produit son propre procédé !



MODÈLES CLASSIQUES DE SÉCHOIRS PAR CONVECTION

- 1 Entrée de l'air frais
- 2 L'air est chaud et sec
- 3 L'air se charge en humidité et se refroidit
- 4 Sortie de l'air humide par tirage thermique



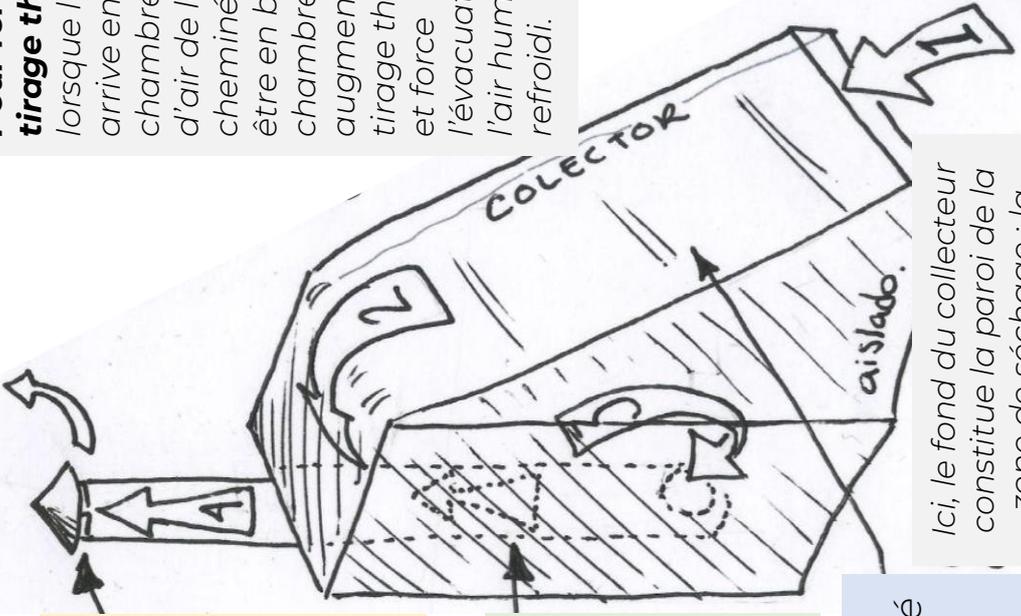
Superficie d'eau moins 1,5 m².
Compter 2 m² pour sécher 10 kg de fruits frais.

Sortie d'air pas trop ouverte, pour limiter le vent, la pluie, les animaux ...

Chambre de dessiccation, bien isolée et protégée des insectes

Collecteur composé d'un matériau transparent au-dessus, et sombre en dessous

Pour forcer le tirage thermique lorsque l'air chaud arrive en haut de chambre, la prise d'air de la cheminée devra être en bas de chambre. Cela augmente le tirage thermique et force l'évacuation de l'air humide et refroidi.



Ici, le fond du collecteur constitue la paroi de la zone de séchage : la chaleur perdue par le collecteur est restituée