



## The 1<sup>st</sup> International Conference on Local Resource Exploitation

[www.lorexp.org](http://www.lorexp.org) / [info@lorexp.org](mailto:info@lorexp.org)  
REF: LOREXP\_2021\_PC0008 Pages: 83–88



### Comment réussir le séchage de produits naturels : application à la *Spiruline* How to success drying of natural products : application to the microalgae *Spirulina*

**Hélène Desmorieux**

Maitre de conférences

Université Claude Bernard Lyon 1, France

Laboratoire d'Automatique

de Génie des Procédés

et de génie Pharmaceutique



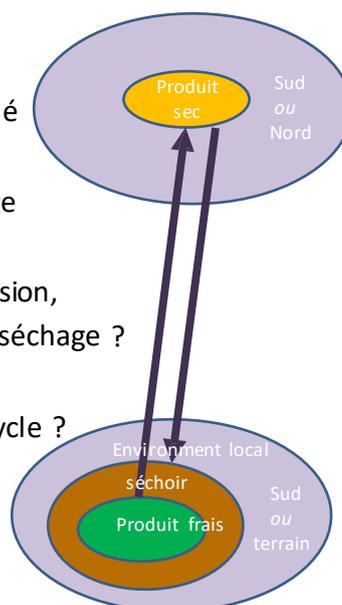
**LAGEPP**

Unité Mixte de Recherche – CNRS 5007

**LAGEPP**

### Le produit – l'air – le séchoir – et ...le reste

- Pourquoi le séchage ?
- Part 1 : La *Spiruline*, propriétés et procédé
- Part 2 : le système environnant le séchage
- Part 3 : Quels paramètres : quelle dimension, découpe, température, temps de séchage ?
- Part 4 : Quels séchoirs pour < 2Tonnes/cycle ?
- Conclusion



**LAGEPP**

## Sécher

Sécher un produit peut amener à se poser beaucoup de questions, différentes selon si on est chercheur ou sécheur pratiquant. Dans cette conférence, nous proposons de transmettre quelques résultats de recherches sur le séchage pour donner des pistes de réflexion à considérer lors de la mise en route d'une opération de séchage de produits agroalimentaires. Le séchage est une étape importante qui a des conséquences sur la qualité et l'aspect du produit, sur la consommation d'énergie, et qui demande donc une approche pluridisciplinaire.

Nos travaux sur le séchage de milieux poreux s'appuient sur de nombreux produits variés tels que les mangues, oignons, bananes, la *Spiruline* et autres microalgues, les tomates, le gombo, les herbes aromatiques et médicinales (myrte, sauge, ..), les graines de figues de barbarie, la patate douce etc.. On se référera ici aux résultats sur la *Spiruline* qui est une micro algue que l'on a étudié sous divers aspects.

Rappelons que le séchage est un procédé qui cherche à éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un produit. Pour cela, on crée une force motrice, appliquée à l'eau, entre le produit et son environnement. Cette force motrice va amener l'eau de l'intérieur du produit vers la surface, l'eau sous forme de vapeur va être évacuée dans l'air environnant, soit par le mouvement de l'air soit par des conditions de température et pression adaptées. Ceci tout en conservant des conditions en surface du produit pour continuer attirer l'eau à sortir du produit, etc.

## La *Spiruline* comme exemple

La *Spiruline* utilisée, d'espèce *Arthrospira Plantensis*, est une microalgue invisible à l'œil nu, sous forme de filament de 5 -7 µm de large. Cette microalgue qui existe sur terre depuis 3 milliards d'années, a participé à la transformation du CO<sub>2</sub> en oxygène grâce à la photosynthèse et au minéraux de l'eau.

On a trouvé de ses traces dans l'histoire de l'humanité comme nourriture, chez les aztèques, au 14 et 16<sup>ème</sup> siècle, puis au Tchad, puis de nouveau au Mexique au 20<sup>ème</sup> siècle dans une usine où elle avait envahi un décanteur de 3 km de diamètre devenu vert, alors qu'il permettait l'évaporation du Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou le pH très élevé convenait à la *Spiruline*. On peut lire (sur internet) qu'il est prévu en 2025 un marché de *Spiruline* de 700 millions de dollars. La demande est toujours supérieure à l'offre du fait de sa composition (elle contient des acides gras poly insaturés, l'acide gamma linoléique, différents minéraux et vitamines, des exopolysaccharides et de nombreux pigments dont la phycocyanine). Elle a des applications thérapeutiques, énergétiques, et elle est cultivable à l'extérieur ou en réacteur. Elle est utilisée contre la malnutrition, comme biocarburant de 3<sup>ème</sup> génération, comme consommateur de CO<sub>2</sub>, et est étudiée pour les missions spatiales (sur mars) comme productrice d'oxygène et aliment.

Au LAGEPP, nous avons utilisé un réacteur de 40 litres avec 20 néons de divers spectres.

## Nécessité d'une vision large de la problématique

Produire la *Spiruline* demande peu de procédés : il faut la cultiver, puis la rincer et la filtrer, on peut ensuite la sécher.

Elle peut être séchée sous forme de pâte avec la possibilité de varier sa forme, sa teneur en eau initiale et les procédés qui lui donnent des aspects secs différents : elle peut être séchée par air chaud ce qui est le plus utilisé (par convection ou pulvérisation - spray drying), mais aussi par exposition au soleil, par lyophilisation (congélation du produit puis mise sous vide), par rayonnement, par microondes, par absorption de l'eau par un milieu poreux. On peut donc sécher un même produit de différentes manières. Il n'y a donc pas Un procédé pour UN produit. Un procédé est adapté à un produit si le procédé est adapté à la situation global, c a d à l'environnement. Il faut donc d'abord étudier la problématique locale, c'est-à-dire, analyser quels sont les éléments influant du système environnant le séchoir et le produit. Il faut donc voir plus large que le produit. Ceci peut être fait par exemple grâce a des questions (quelles sont les énergies disponibles localement ? quelle est la capacité de maintenance d'un séchoir dans le lieu de séchage ? qui va s'occuper du séchage ? quel est le débouché et l'utilisation ultérieure du produit ? Etc..) ou par les outils de l'analyse fonctionnelle qui permet de concevoir un séchoir avec toutes les spécifications tenant compte de l'environnement, ou encore s'aider d'une identification des réseaux d'acteurs autour du produit et du séchoir.

Ces points cités permettent d'éviter d'oublier une prise en compte des contextes de travail : en effet, les problématiques qui concernent les théoriciens du séchage et celles des acteurs du terrain ne sont pas les mêmes. Comment le prendre en compte ? : simplement en ce centrant sur la problématique des acteurs du terrain. Les ressources des deux lieux ne sont pas les mêmes, les méthodes de travail dans les universités (au Nord ou au Sud) ne sont pas les mêmes que sur le terrain. Aussi le savoir théorique n'est pas le même que le savoir-faire des pratiquants, les deux étant complémentaires.

Il faut identifier les acteurs, puis les réseaux entre acteurs. Par exemple pour la *Spiruline* au Tchad, on a identifié 4 réseaux = le réseau qui fonctionne actuellement ou les femmes récoltent de la spiruline du lac Tchad et la consomment ou l'échange par tonnes avec des dattes de Lybie. Le réseau de la *Spiruline* pour le marché local, le réseau de la *Spiruline* pour l'exportation et enfin le réseau de la *Spiruline* pour la pharmacie. Le 1ere réseau fonctionne depuis longtemps. Les trois autres réseaux identifiés conduiront à 3 séchoirs différents.

L'approche global est nécessaire. L'approche séchage du produit aussi indispensable consiste a étudier le séchage du produit en variant les conditions opératoires et les paramètres du produit

## **Etude du séchage par les courbes de séchage**

Pour étudier le séchage du produit avec son environnement proche, il est incontournable d'établir des courbes de séchage du produit dans les conditions de température, humidité relative, vitesse de l'air, apport d'énergie, sens de circulation air – produit, forme, taille, lot, maturité, etc., qui soient similaires à la problématique du terrain, afin de représenter la réalité pour faire un dimensionnement à plus grande échelle.

Les courbes de séchage peuvent être issues de la littérature ou établies soi-même. Il s'agit de mesurer la masse du produit dans des conditions constantes de l'air. Les courbes de séchage ont souvent des allures typiques. En début de séchage on peut avoir une décroissance linéaire de la masse (appelé 1<sup>ère</sup> phase), le flux d'eau qui sort du produit est constant, ce qui correspond à l'évaporation d'eau libre qui arrive du cœur

du produit en surface sans frein, et qui dépend des conditions externes de l'air. Ensuite, ce flux d'eau diminue (2<sup>nd</sup> phase de séchage) car l'eau arrive plus difficilement en surface.

Ces courbes sont plutôt exprimées en teneur en eau. Rappelons qu'il faut mesurer la teneur en eau initiale par une expérience à part avec une température de séchage élevée proche de 100°C. Car la teneur en eau initiale (masse d'eau / masse de matière sèche) ne doit pas être déduite des courbes de séchage car le produit en fin de séchage appelé produit sec contient encore un peu d'eau. Le considérer comme la référence du produit sec est une erreur.

Nous avons étudié l'influence des paramètres externes et internes à travers les courbes de séchage. L'influence des paramètres externes montre que le flux évaporatoire augmente avec la température, avec la vitesse de l'air, avec la surface d'échange air – produit (à rendre la plus grande possible en évitant de serrer les morceaux de produits) et le flux évaporatoire diminue lorsque l'humidité relative de l'air augmente, ce paramètre étant le paramètre clé du transfert de l'eau du produit à l'air.

Les paramètres internes et intrinsèques étudiés et influant sont principalement le sens de découpe, les éléments constitutifs du produit (graines, peau, etc.), un prétraitement modifiant le produit, la maturité.

## **Quelques paramètres intrinsèques au produit**

Nous avons étudié l'influence de la forme et de la disposition du produit, elles sont représentées par l'aire spécifique et une dimension caractéristique du produit.

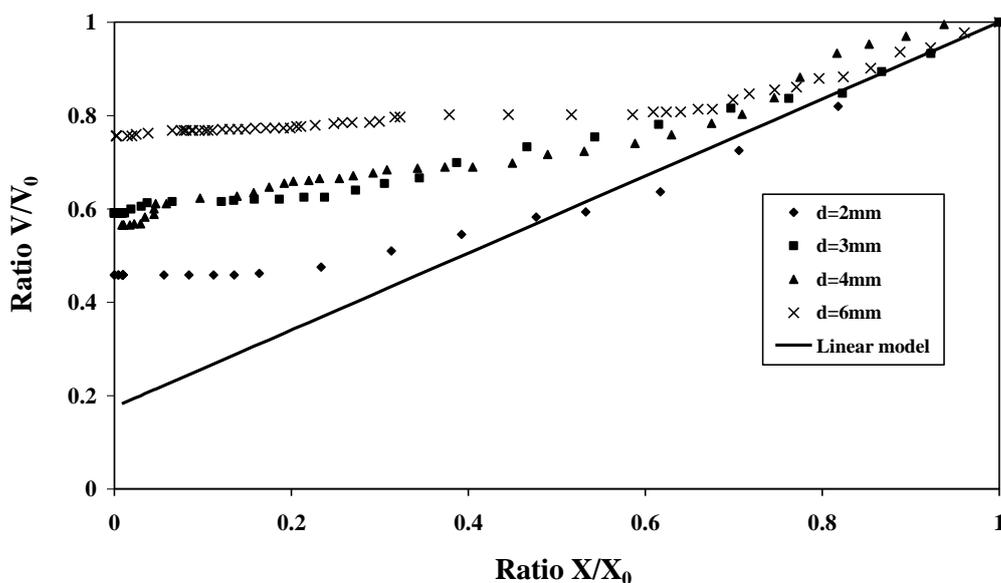
L'aire spécifique du produit est la surface d'échange d'un morceau de produit divisée par le volume apparent du produit (en m<sup>2</sup> de surface exposée par m<sup>3</sup> de matière ou par kg de produit sec). Pour certains produits dont la spiruline, à même aire spécifique, une partie des courbes de séchage est confondue. Ce paramètre est donc une référence en séchage.

L'autre dimension à considérer pour étudier le séchage prend en compte le sens de l'évacuation de l'eau : pour cela, on propose de considérer la plus grande sphère contenue dans le volume d'un morceau, ce qui représente la plus grande distance à parcourir par l'eau dans le produit jusqu'à la surface. Par exemple, pour des tranches de mangues de diverses épaisseurs, c'est l'épaisseur à considérer et non pas le diamètre de la tranche.

Un phénomène à prendre en compte du fait de la réactivité des produits à l'environnement et à la perte en eau est le croutage en surface : pendant la 2<sup>nd</sup> phase de séchage, le flux d'eau arrivant en surface diminue alors que la surface continue de sécher, des ponts se forment, la surface se durcit et ce croutage va limiter le flux évaporatoire et la contraction volumique du produit et ainsi faire apparaître la porosité (Figure 1 et Figure 2). Ce croutage peut être recherché ou pas. Il dépend de la forme, de la taille du produit et des conditions externes de séchage. Il sera d'autant plus important que le gradient interne de teneur en eau est important, ce qui correspond à une aire spécifique faible.



**Figure 1 :** Photographie microscopie électronique à balayage (MEB) de cylindres de *Spiruline* de diamètre initial 3 mm.



**Figure 2 :** Volume relatif de la *Spiruline* en cylindres, séchées a 45°C a l’air chaud, en fonction de sa teneur en eau (début du séchage à droite du graphe, à  $X/X_0=1$ ). L’espace vertical entre les points expérimentaux et la droite traduit le volume de pores formés, plus important pour les cylindres de *Spiruline* de grand diamètre.

### Concevoir un séchoir

Concevoir ou choisir un séchoir.

On a inventorié les séchoirs existants au Burkina, au Togo et au Bénin, avec 140 cas, pour identifier quel séchoir étaient utilisés et lesquels semblaient plus adaptés et pourquoi.

Nous avons observé que 70% des séchoirs utilisés sont l'exposition au soleil direct avec divers supports. Si de nombreux séchoirs solaires existent dans la littérature, surtout des séchoirs-cheminée, très peu d'entre eux sont utilisés sur le terrain. Ce qui est regrettable vu la quantité d'études correspondantes. Il semble que ces séchoirs « cheminée » utilisés dans les universités au Nord ou au Sud (mais peu sur le terrain) ont une très bonne efficacité énergétique, mais sont difficiles à maintenir en état, ils nécessitent une rotation des claies pendant le séchage, ils ont une capacité faible devant le cout d'investissement du séchoir, et sont parfois construits avec des matériaux non disponibles sur place pour la maintenance. Ces séchoirs doivent être adaptés au contexte local avant d'être utilisés.

Pour caractériser les séchoirs, les classer avec des indicateurs, nous avons pris les critères de la littérature. A une quarantaine de critères, nous avons dû ajouter une liste de critères socio-technico-économiques : la surface disponible au sol, la formation du sécheur, la disponibilité sur place des matériaux du séchoir, le cout du séchoir par m<sup>2</sup> de surface de support, les possibilités d'un support financier, l'évaluation de l'efficacité du séchoir par une analyse économique et thermique, le type d'utilisateurs (familles, groupe ou entreprise), la composition du produit ( produit sucré ou non sucré), le débouché du produit, le réseau social autour du séchoir, etc..

Les séchoirs les plus rentables et satisfaisants les comparaisons énergétiques et techniques sont les séchoirs type chambre solaire de grande capacité, les séchoirs au gaz et le séchage à exposition directe au soleil. Viennent ensuite les séchoirs solaires simples constitués par une enceinte transparente ou en tôle noire.

## Conclusion

Le séchage est une opération du génie des procédés, à la fois simple car un apport d'énergie permet le transfert d'eau du produit vers l'air, mais aussi compliqué car il fait intervenir tous les aspects des disciplines de l'ingénieur et du social.

- Sécher ... simple et compliqué
- ↗ **Systemes et acteurs**
- ↗ **Utilisation du produit sec - critères**
- ↗ **Dimension - Surface spécifique**
- ↗ **Température de surface du produit**
- ↗ **Support au sol?**
- ↗ **Reconcevoir à partir de l'existant**

...

? Des questions pour des conseils – guide sur internet ?

**LAGEP**