

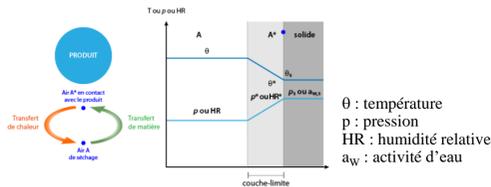
### Introduction

Le séchage, méthode ancestrale utilisée depuis des centaines d'années, permet de convertir les denrées périssables en produits stabilisés par abaissement de l'activité de l'eau. Le procédé repose sur l'élimination par évaporation de l'eau.

Après séchage, les produits sont généralement stockés à température ambiante. Ils peuvent en outre être réhydratés en vue d'une utilisation dans un procédé industriel ou dans une préparation culinaire [1].

### Procédés de séchage

L'opération unitaire de séchage s'appuie sur des transferts simultanés de chaleur et de matière. Il existe de nombreux procédés de séchage dont :



	Séchage naturel au soleil	Séchage convectif par air chaud	Lyophilisation	Séchage par jets d'air impactants
<b>Principe</b>	L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau provient de l'énergie solaire. Le balayage de la vapeur générée et le renouvellement de l'air proviennent du vent	L'air chauffé mis en contact avec le produit humide apporte énergie thermique et balayage de la vapeur d'eau générée	Procédé destiné au séchage par sublimation de la glace suivie d'une désorption des produits pré-lablement congelés	Séchage convectif à grande vitesse d'air (jusqu'à 40 m/s). Les jets impactant le produit y génèrent une forte convection de chaleur et de balayage de la vapeur
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Méthode la plus commune</li> <li>Simple et économique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple et très industrialisé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Préservation de la structure initiale</li> <li>Réhydratation rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduit la température et le temps de séchage</li> <li>Améliore la qualité des produits</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produits dégradés et possible contamination</li> <li>Faible cinétique de réhydratation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Énergivore</li> <li>Produit fini déformé</li> <li>Perte de la qualité nutritionnelle</li> <li>Possible contamination microbienne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Très énergivore</li> <li>Temps de séchage important (1 à 3 jours)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Énergivore</li> <li>Possible déformation du produit</li> </ul>

### Principe de fonctionnement du prototype de séchage à jets d'air impactants et intermittents

Le sécheur, conçu par la société CIMS (Sablé-sur-Sarthe, France), a la particularité de combiner un séchage convectif par jets d'air impactants et intermittents.

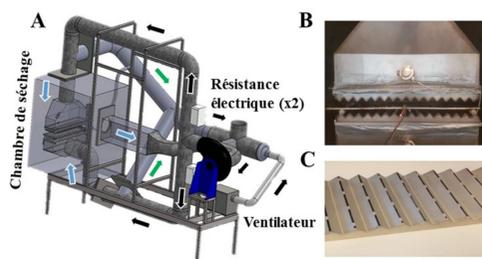
#### La technologie de séchage par jets d'air impactants [3, 4]

- Intensifie le procédé de séchage convectif par air chaud
- l'air provoque une vitesse locale plus élevée aux abords du produit et une couche limite plus mince entre l'air et la surface du produit
- Permet d'améliorer les transferts de masses et de chaleur

#### Le séchage intermittent [3, 4]

- Peut avantageusement s'appliquer aux produits thermosensibles (ex. produits alimentaires)
- Alternance de périodes de séchage et de périodes passives sans séchage

#### Configuration des jets impactant



Dimensions tuyères	800 mm x 220 mm
Configuration	Buses triangulaires à fentes rectangulaires
Distance entre les buses	50 mm
Largeur des fentes	3 mm
Taux d'ouverture	4%

Schéma du sécheur convectif par jets d'air impactants (A) et zoom sur la chambre de séchage (B) et des tuyères formant les jets d'air impactants (C)

### Modélisation des cinétiques de séchage

La diffusivité effective,  $D_{eff}$ , caractérise la diffusion de l'eau : le temps de séchage  $t$  diminue lorsque  $D_{eff}$  augmente

Ce coefficient est déterminé par la solution analytique de Crank (1975) pour une plaque de longueur infinie et d'épaisseur  $L$  :

$$\omega(t) = \frac{x_{bs} - x_e}{x_{bs0} - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(-\frac{(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right)$$

Avec :  
 $x_e$  (kg kg<sup>-1</sup>) : teneur en eau à l'équilibre  
 $x_{bs}$  (kg kg<sup>-1</sup>) : humidité en base sèche  
 $x_{bs0}$  (kg kg<sup>-1</sup>) : humidité initiale en base sèche

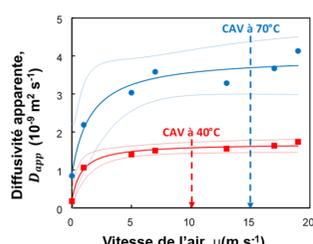
Malgré le niveau de vitesse d'air adopté, la diffusion de l'eau au sein du produit ne contrôle pas nécessairement le séchage, d'où l'utilisation du terme « diffusion apparente,  $D_{app}$  »

### Travaux antérieurs

L'IRD UMR CNRS 6027 a réalisé des travaux sur le séchage par jets d'air impactants d'un bioproduit (digestat, résidu solide de la méthanisation) [4]

**Objectif** : détermination du comportement du digestat au cours du séchage et identification de la diffusivité apparente

- Vitesse critique de l'air (CAV) [5] : vitesse de l'air à partir de laquelle l'augmentation d'air n'a plus d'effet sur l'amélioration du séchage
- Estimation de la vitesse critique de l'air à partir de laquelle la résistance externe au transfert peut être négligée : 10 m s<sup>-1</sup> à 40 °C et 15 m s<sup>-1</sup> à 70 °C



Évolution de la diffusivité apparente  $D_{app}$  en fonction de la vitesse de l'air pour 40 °C et 70 °C. Les lignes claires représentent l'intervalle de confiance à 95 % autour du modèle

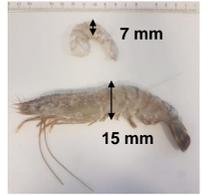
### Travaux en cours

L'IRD UMR CNRS 6027 et le LaSIE UMR CNRS 7356 effectuent deux travaux de recherche sur le séchage par jets d'air impactants :

#### 1. Séchage des crevettes *Penaeus monodon* et *Penaeus vannamei* – Doctorat de Tamara Mourda

Ces travaux sont axés sur l'étude comparative de procédés innovants de séchage de crevettes (jets d'air impactant et intermittents, lyophilisation et *swell-drying*)

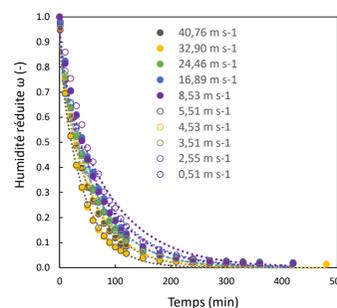
- Intensification du séchage de la crevette par jets d'air impactants et texturation DIC
- Étude comparative des effets des différents procédés de séchage sur la qualité du produit fini



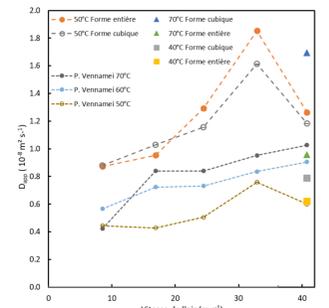
*Penaeus vannamei* congelée et décortiquée (haut) et *Penaeus monodon* congelée entière (bas)

#### Conditions opératoires

- Température 50, 60, 70 et 90 °C
- Vitesse de l'air de 0,51 m s<sup>-1</sup> à 40,76 m s<sup>-1</sup>
- Deux variétés de crevette (*P. monodon* et *P. vannamei*)
- Deux épaisseurs (15 et 7 mm)



Comparaison des valeurs expérimentales (symboles) et modélisées (lignes) de l'humidité réduite (–) en fonction du temps (min) pour *P. vannamei* lors d'un séchage à 50 °C avec une vitesse d'air allant de 0,5 m/s à 41 m/s



Niveaux de diffusivité de l'eau au sein du produit en fonction de la vitesse et de la température de l'air et de l'épaisseur

#### Estimation de $D_{app}$

❖ *P. monodon* (15 mm):

- Forme cubique :  $0,88 < D_{app} (10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}) < 1,29$
- Forme entière :  $0,86 < D_{app} (10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}) < 1,26$

❖ *P. vannamei* (7 mm):

- $0,42 < D_{app} (10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}) < 1,03$

Est constatée une augmentation de la diffusivité apparente avec la vitesse des jets d'air. Un comportement spécifique à haute vitesse et à haute température nécessitera une explication ultérieure.

#### 2. Séchage de l'algue brune *Sargassum muticum* – Doctorat de Jeanne Le Loeuff

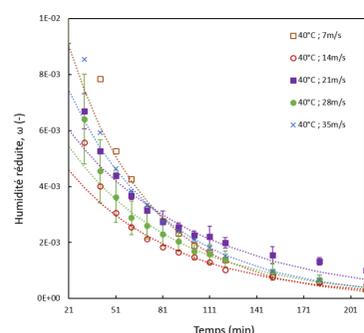
Ces travaux concernent l'étude comparative de la lyophilisation et du séchage convectif de macroalgues en vue de leur bioraffinage



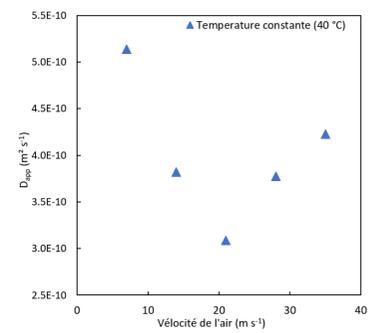
L'algue brune *Sargassum muticum*

#### Conditions opératoires

- Température de 40 °C à une vitesse d'air de 7 m s<sup>-1</sup> à 35 m s<sup>-1</sup>



Humidité réduite en fonction du temps pour chaque paramètre étudié, comparaison entre les valeurs expérimentales (symboles) et modélisées (lignes continues)



Évolution de  $D_{app}$  en fonction de la vitesse de l'air à température constante (40 °C)

- Estimation de  $D_{app}$  pour chaque paramètre étudié :  $3,09 \cdot 10^{-10} < D_{app} (\text{m}^2 \text{ s}^{-1}) < 5,14 \cdot 10^{-10}$
- Atteinte d'un  $D_{app}$  minimum pour une vitesse de l'air de 21 m s<sup>-1</sup> : l'augmentation de la vitesse de l'air n'induit pas forcément une amélioration du séchage des algues
- L'hypothèse est la formation, à haute vitesse de l'air, d'une croûte à la surface des algues qui aurait un effet barrière pour l'évaporation de l'eau et qui ralentirait ainsi le procédé de séchage

### Conclusion

Les exigences modernes en matière de préservation de la qualité des produits et d'économie d'énergie favorisent l'émergence de nouvelles techniques de sécheurs industriels. Les travaux de thèse en cours aboutiront à la définition d'un jeu de paramètres pour une conduite optimale des sécheurs par jets d'air impactants et intermittents pour les crevettes et les macroalgues

### Références

- C. Bonazzi, J.-J. Bimbenet, Séchage des produits alimentaires - Principes, Techniques de l'ingénieur F3000, 2003
- R.G. Moreira, Impingement drying of foods using hot air and superheated steam, J. Food Eng. 49, 291-295, 2001
- V. Boy, J.-L. Lanoisellé, Impacting-jet in food preservation processes, International Conference on Drying and Sustainable Development, Agadir, Morocco, 28-29 February 2020
- V. Boy, X. Liu, M.-A. Chamaa, Y. Lemée, C. Sabourin, T. Lendormi, J.-L. Lanoisellé, Air impingement drying of digestate. Experimental and modelling study, Chem. Eng. Res. Des. 146, 436-448, 2019
- T.H. Nguyen, Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux, Thèse de doctorat, UBS, 2015

### Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Groupe CIMS, Sablé-sur-Sarthe, pour la conception du pilote de séchage à jets d'air impactants. Nous remercions également la société libanaise de Production de Poisson frais (M.J.M SARL 2651300) et Pontivy Communauté pour le financement des deux projets de thèse



#### Contact

jeanne.le-loeuff@univ-ubs.fr  
tamara.mourda@univ-ubs.fr