

Caroline Heilporn, Laurent Lonys, Cédric Boey, Benoit Haut, Antoine Nonclercq
Université Libre de Bruxelles
Doctorante au Service Transferts, Interfaces et Procédés (TIPs)
cheilpor@ulb.ac.be

Développement d'une méthode rationnelle de séchage de poissons par l'utilisation de l'énergie solaire au Mali

Les pays d'Afrique sont les plus touchés par les problèmes d'insécurité alimentaire. Les activités de production et de transformation des produits agricoles des populations rurales sont entravées par des barrières importantes dans la commercialisation des produits aux niveaux des marchés locaux, régionaux et internationaux. Des inefficacités dans la production de produits de qualité, dans les méthodes de récolte et de conservation, dans l'emballage et les méthodes de commercialisation limitent gravement l'accès des producteurs(trices) et transformateurs(trices) de la zone aux marchés. Ainsi se stabilisent la pauvreté et le manque de croissance des revenus pour la majorité des populations de la zone.

Au Mali, la filière pêche est particulièrement concernée par ces problèmes de conservation car les zones de pêche sont souvent situées à l'écart des grands centres commerciaux. Les poissons pêchés en très grandes quantités ne peuvent pas tous être vendus frais et une grande proportion est commercialisée sous forme transformée. Les produits séchés, plus spécifiques que les produits frais, sont vendus à des prix plus élevés. Le développement d'approches de séchage efficaces et hygiéniques est donc devenu une véritable requête de la population.

Le Delta Central du Niger est la plus grande zone de production de poisson au Mali avec 100 000 tonnes de poisson par an (4% du PIB malien). Cette grande présence de poisson est favorisée par l'inondation de la zone, provoquée par les fortes crues pendant la période d'hivernage et par l'affluent du Niger, le Bani. Les irrégularités hydro-climatiques et la variété des biotopes existants dans le Delta Central sont fort propices au bon développement de la vie aquatique car ils engendrent une forte diversité des conditions environnementales du milieu. La production de poissons est d'autant plus forte que la crue est importante dans le temps et l'espace. Les poissons séchés en très grandes quantités ne peuvent pas tous être vendus frais. Une grande proportion de ce poisson est vendue sous forme transformée, par fumage, braisage ou séchage, du fait de la faiblesse des réseaux de communication et du manque de moyens de conservation appropriés pour le poisson frais. Les produits séchés étant plus spécifiques que les produits frais, ils peuvent être vendus à des prix plus élevés. Le développement d'approches de séchage plus efficace et plus hygiénique est donc devenu une véritable requête de la population.

Les pratiques de mise en conserve des denrées alimentaires, comme c'est le cas dans les pays industrialisés, n'est pas une méthode appropriée de conservation des produits dans les pays d'Afrique sub-saharienne car cela nécessite une forte consommation d'énergie et des technologies avancées. Le séchage est largement utilisé en Afrique car la température nécessaire au séchage est relativement basse. Le soleil est la principale source d'énergie utilisée. Parmi les avantages de la technique du séchage, on retrouve notamment une augmentation de la durée de conservation du produit, une réduction en poids du produit, ce qui facilite son transport et son emballage, un maintien des propriétés nutritives et autres valeurs ajoutées du produit.

Actuellement, le séchage solaire du poisson est réalisé sur de simples paillasses à l'air libre. Les problèmes majeurs liés à ce type de séchage sont dus au climat tropical du Mali. En effet, la forte présence de mouches et de poussières, libres d'entrer en contact direct avec le poisson, provoque le développement de bactéries dans le poisson. L'hygiène n'est pas non plus garantie car les vents fréquents contribuent au développement d'une couche de poussière à la surface du poisson. L'idée est donc de développer des méthodes de séchage plus élaborées afin d'obtenir une meilleure qualité de poisson. Ce facteur qualité induit d'une part, une amélioration de l'hygiène et, d'autre part, la limitation autant que possible du nombre de bactéries.

L'amélioration de l'hygiène est favorisée par la présence d'une bâche en plastique au-dessus du poisson, et aussi par la présence d'une moustiquaire à une des extrémités du séchoir. L'autre extrémité du séchoir est constituée d'une plaque en bois dans laquelle on fixe le ventilateur. Elle est donc hermétique au passage d'insectes et de poussières. La diminution des bactéries dans le poisson est, pour sa part, favorisée par une élévation de la température de séchage, par rapport à la température de séchage sur paillasses.

Dans le cadre d'un projet d'amélioration des méthodes de transformation et de commercialisation du poisson financé par l'Institut Royal Néerlandais des Tropiques (KIT) et réalisé en collaboration avec une ONG malienne, l'ONG AFAR (Agence pour la Formation et l'Autopromotion Rurale), deux nouveaux types de séchoirs solaires ont été développés et installés à Youwarou, au nord de Mopti, pour une période test de deux ans. L'objectif est d'améliorer et d'agrandir l'échelle des techniques de transformation et de conservation des produits de la pêche. Les séchoirs développés sont des séchoirs directs, semblables à des serres, à convection forcée induite par un ventilateur alimenté par un panneau photovoltaïque afin de créer un courant d'air permettant d'évacuer l'humidité de l'air. Ces séchoirs devraient permettre l'obtention d'un produit de meilleure qualité, séché à l'abri des mouches.

La structure de ces séchoirs solaires utilisés est assez simple : une bâche noire est placée à même le sol et est recouverte par une bâche en plastique, surélevée à l'aide d'arcs courbés, placés régulièrement sur toute la longueur des séchoirs. L'intérieur des séchoirs est divisé en deux grandes zones : une zone de chauffe, permettant l'élévation de la température jusqu'à la température désirée de séchage ; une zone de séchage, où la température est considérée comme constante. C'est dans cette zone que le poisson est disposé sur un grand filet, sous-tendu aux arcs courbés. Le fait que le filet de séchage soit sous-tendu aux arcs courbés permet d'éviter la mise en contact directe entre le poisson et la bâche noire de la partie inférieure du séchoir. À l'extrémité de la zone de séchage, une moustiquaire permet de réduire l'infestation par les insectes. À l'autre extrémité, un ventilateur, alimenté par un panneau photovoltaïque, crée un courant d'air qui permet d'évacuer l'humidité de l'air. Ces séchoirs solaires sont disponibles en deux tailles : un modèle mobile, d'environ 11 mètres de long (3 mètres de chauffe), et un autre fixe, avec une structure de base en béton, d'environ 20 mètres de long (6 mètres de chauffe).

Dans l'analyse, on remarquera qu'un autre type de séchoir est envisagé, le séchoir de type hangar. Les techniques de séchage utilisées dans ce cas-ci sont fort similaires aux techniques de séchage préexistantes, c'est-à-dire les techniques de séchage sur paillasses. En effet, ce type de séchoir est constitué de paillasses surélevées d'une hauteur d'un mètre par rapport au sol, le tout étant recouvert d'une moustiquaire. Ce type de séchage permet donc d'obtenir une meilleure qualité sanitaire par rapport à la qualité du poisson séché sur paillasses, tout en

gardant des coûts très faibles par rapport aux séchoirs solaires mobiles et fixe (autour de 900 € pour le séchoir fixe, autour de 600 € pour le séchoir mobile et autour de 25 € pour le séchoir de type hangar).

L'objectif de ce travail était donc de développer une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires et de la tester. Cette méthode, basée sur des conditions environnementales moyennes, doit permettre de déterminer les conditions de séchage les plus appropriées tout en tenant compte des désirs de la population de produire du poisson frais séché et du poisson fermenté séché en un temps d'un à deux jours. Des attentes particulières vis-à-vis du séchage ont été exprimées par la population et largement prises en compte. Ils désiraient notamment que la durée de conservation du produit séché soit supérieure à trois mois, sans détériorations (moisissures, décomposition sous forme de poudre,...).

L'approche théorique a été complétée d'un volet pratique permettant d'évaluer le degré d'applicabilité de la méthode théorique à des situations réelles de séchage. Ce volet pratique a été réalisé au cours d'un stage de 3 mois dans le village de Youwarou au Mali.

Le séchage est une opération unitaire centrale dans les industries qui permet l'extraction du liquide (généralement de l'eau) contenu dans un produit solide, par changement de phase. Dans les pays développés, l'énergie utilisée dans les procédés de séchage est estimée à 8% des dépenses énergétiques des industries. En ce qui concerne les pays en voie de développement, comme le Mali, le séchage est une technique de conservation très répandue pour une grande variété de produits (lait, mangues, poisson,...). Dans ce travail, nous parlons de séchage thermique, pour lequel la quantité d'énergie à fournir est proportionnelle à la chaleur latente de vaporisation du liquide considéré. Dans ce cas, le séchage est utilisé avant tout comme moyen de conservation du produit. Il permet également de réduire les coûts liés au transport et d'éliminer l'eau afin d'empêcher la détérioration du produit.

Deux phénomènes majeurs interviennent lors du séchage d'un produit solide. Le premier est le transfert de la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le solide. Cet apport de chaleur peut se faire de manière directe, par exposition au soleil ou à des radiations, ou de manière indirecte, par exposition à un flux d'air chaud. Le deuxième phénomène est l'évacuation de la vapeur d'eau produite lors du phénomène d'évaporation grâce à la chaleur introduite. Cette élimination de la vapeur produite se fait de manière naturelle ou forcée (grâce à un ventilateur, par exemple). Dans les calculs de dimension des installations, il est donc important de veiller à ce que ces deux phénomènes puissent avoir lieu, sans limitation. Ils déterminent alors la vitesse de séchage du produit considéré.

Lors du séchage de denrées alimentaires telles que le poisson par une méthode thermique, on observe trois phases de séchage. Ces différentes phases varient en fonction des caractéristiques de l'air et du produit.

La première phase est une phase de séchage à vitesse croissante, correspondant à la mise en régime de l'appareil. Cette phase est généralement assez courte. Elle correspond à l'élévation de la température du produit nécessaire au déclenchement de l'évaporation de l'eau qu'il contient. On atteint alors une température constante d'équilibre. À partir de ce moment, la vitesse de séchage augmente car le phénomène d'évaporation est d'autant plus facile que le produit est chaud.

La deuxième phase est la phase de séchage à vitesse constante. Cette phase correspond à l'évaporation de l'eau qui se trouve à la surface du produit. En effet, la surface extérieure du produit est entièrement recouverte d'eau qui est emportée par le courant d'air. Il se forme

alors une couche limite de diffusion dans le gaz autour des particules solides. Dans le gaz situé juste au contact de la surface extérieure du solide, la pression partielle en vapeur d'eau est quasi égale à la pression de saturation dans la même condition de température. La vitesse de séchage est proportionnelle à la différence entre la concentration en vapeur d'eau dans le gaz juste au contact de la surface extérieure du solide, et, la concentration en vapeur d'eau dans le gaz au loin. Le coefficient de proportionnalité dépend de l'écoulement du gaz autour du solide (et donc de sa forme). La nature du solide n'influence quasiment pas la vitesse de séchage au cours de cette période.

La troisième phase est la phase de séchage à vitesse décroissante. Lors de cette troisième phase, l'évaporation de l'eau se produit au niveau des surfaces situées à l'extérieur du solide. Si ces surfaces possèdent une courbure importante (eau piégée dans des pores de petites tailles), la pression partielle en vapeur d'eau dans le gaz au contact de ces surfaces est inférieure à la pression de saturation. Le taux d'évaporation diminue donc au fur et à mesure que l'on prend de l'eau dans des pores plus petits.

Il est important de noter que plus la surface de contact entre l'air et le produit est importante, plus l'évaporation de l'eau contenue dans le produit se fait facilement.

Le séchage de poisson est réalisé dans des séchoirs de type tunnels, par séchage direct. Un ventilateur, alimenté par une source d'énergie, crée un courant d'air dans le séchoir afin d'évacuer la vapeur d'eau produite. Dans le cadre de notre projet au Mali, la source d'énergie est une source d'énergie solaire transformée par un panneau photovoltaïque en électricité alimentant le ventilateur. Le séchage solaire comporte un grand avantage pour les populations maliennes : la source d'énergie est (quasi) illimitée et gratuite.

Les panneaux solaires photovoltaïques comportent des semi-conducteurs capables de transformer de manière directe le rayonnement solaire en électricité. Malgré un coût relativement élevé (environ un tiers du prix total des séchoirs) et un rendement assez faible (environ 10%), le solaire photovoltaïque représente une technologie séduisante avec des perspectives d'avenir sans précédent, particulièrement dans les zones à fort ensoleillement comme le Mali. L'électricité obtenue peut être, soit utilisée directement, comme c'est le cas pour les séchoirs solaires de poisson, soit être stockée dans des batteries. Cette dernière possibilité permet d'ailleurs d'alimenter plusieurs régions isolées du Mali en électricité. C'est notamment le cas du village de Youwarou, où s'est déroulé la partie expérimentale de ce travail.

Il existe plusieurs caractéristiques propres au séchage de poisson. La température de séchage, notamment est fixée à 60°C. Ce choix est le résultat d'un compromis entre une température assez élevée pour permettre une bonne élimination des bactéries et une température assez faible pour éviter que le poisson ne se détériore (par décomposition ou cuisson). Une deuxième caractéristique importante est la diminution en poids du produit qui est caractéristique de la qualité du séchage. En effet, une bonne qualité de séchage sera obtenue si la diminution en poids est évaluée à 60% ou plus. Enfin, la durée de séchage est fixée par les pêcheurs maliens à un ou deux jours, en fonction de la taille du poisson.

Au cours de l'analyse, nous avons distingué trois contraintes qui doivent être remplies afin de pouvoir obtenir une bonne qualité de séchage. Premièrement, la vitesse de l'air à l'intérieur du séchoir doit être régulée afin de permettre l'élévation de la température jusqu'à la température de séchage désirée de 60°C à la fin de la zone de chauffe. Deuxièmement, il faut fournir assez d'énergie afin de pouvoir évaporer l'eau contenue dans le poisson en un certain temps de séchage donné. Enfin, il faut éviter que l'air dans le séchoir n'atteigne la saturation. Il faut

donc évacuer la vapeur d'eau de l'air résultant de la phase d'évaporation. L'une des ces deux dernières contraintes (évaporation ou évacuation) est limitante par rapport à l'autre et permet de déterminer la quantité de poisson théorique maximale pouvant être introduite dans le séchoir.

Ces trois contraintes impliquent trois consignes qui nous permettent de développer une méthode de bonne utilisation des séchoirs. Elles peuvent s'exprimer mathématiquement par l'expression de bilans de matière et d'énergie et l'utilisation de coefficients de transfert.

Après résolution de cet ensemble d'équations de bilans, nous déterminons que la vitesse maximale de l'air, dans un séchoir solaire mobile afin d'atteindre la température de séchage de 60°C au bout des trois mètres de zone de chauffe, ne peut dépasser 0,28m/s. Il faut donc réguler la puissance fournie par le panneau photovoltaïque au ventilateur car sans régulation, la vitesse de l'air dans le séchoir est de 5m/s ! De plus, nous concluons que c'est l'évacuation de la vapeur d'eau résultant de l'évaporation qui est le phénomène limitant le séchage. On détermine alors que la quantité de poisson qui peut être placée par jour dans un séchoir mobile est d'environ 40kg.

Des essais de séchage en situation réelle ont été réalisés dans le village de Youwarou au Mali, entre janvier et avril 2009. La majorité de ces essais ont été réalisés sur des séchoirs solaires mobiles. Un monitoring des essais a été réalisé afin de relever les paramètres clés pour le suivi du séchage, tels que la température de l'air dans le séchoir, les masses initiales et finales de poisson... Ces monitorages nous ont permis de comparer les résultats expérimentaux aux prédictions obtenues par la méthode théorique développée en début de travail.

Lors de l'analyse, nous remarquons que les essais s'écartent quelque peu des résultats obtenus par la méthode théorique. En effet, les conditions d'utilisation choisies pour la résolution théorique sont des conditions environnementales moyennes. Elles ne sont pas strictes et nous avons notamment observé que la quantité de poisson pouvant être introduite dans le séchoir peut aller jusqu'à 50kg, soit 10kg de plus que ce que l'on avait prévu de façon théorique. Nous l'expliquons par le fait que les conditions environnementales moyennes de séchage utilisées dans l'analyse théorique sont parfois moins bonnes que les conditions réelles de séchage. De plus, comme le phénomène d'évaporation n'est pas limitant, nous amenons dans le séchoir plus de chaleur que celle nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le poisson. Nous nous attendons donc à une élévation de la température de séchage le long de la zone de séchage (alors que nous la considérons comme constante dans l'analyse théorique), ce qui permet de sécher un peu plus que prévu en un même temps de séchage.

La durée de séchage varie assez fort en fonction du type de poisson. Nous expliquons cette observation par l'importance apparente de la cinétique d'extraction. En effet, l'extraction de l'eau se fait plus facilement pour les petits poissons que pour les plus gros. En effet, le trajet que la vapeur doit parcourir pour arriver à la surface du poisson est plus grand dans le cas des gros poissons que pour les plus petits.

Enfin, lorsque nous comparons les résultats obtenus sur les séchoirs solaires avec des essais réalisés sur des séchoirs de type hangar, plus proche de la technique traditionnelle de séchage et fonctionnant à la température atmosphérique, nous observons que la capacité de séchage est nettement supérieure dans le cas des séchoirs solaires. En effet, il faut un peu plus de 20 heures pour sécher quelques 15kg de poisson, soit plus de quatre fois le temps, pour une même quantité de poisson, par comparaison avec les séchoirs solaires. Le séchage de type hangar est donc préférable au séchage traditionnel sur paille car le poisson est surélevé par

rapport au sol et protégé par une moustiquaire. Néanmoins, si les frais d'acquisition d'un séchoir solaire ne sont pas un problème majeur, nous conseillons d'investir dans ce type de séchoir donc l'efficacité est désormais prouvée.

L'analyse théorique représente donc assez bien les essais réels de séchage de poisson. Cette analyse nous a permis de développer des conditions d'utilisation du séchoir (vitesse de l'air, masse initiale de poisson) basées sur des conditions moyennes de séchage. C'est un progrès énorme dans l'étude de l'utilisation de ces séchoirs car les populations locales étaient tout à fait incapables de les utiliser auparavant. Dès lors, si l'on veille à atteindre une température de séchage de 60°C à la fin de la zone de chauffe et que la quantité appropriée de poisson est introduite dans les séchoirs, alors, le séchage sera de bonne qualité.

L'ensemble de ce travail, théorique et pratique, a été finalisé par l'élaboration de manuels d'installation et d'utilisation des séchoirs de telle sorte que les séchoirs puissent être utilisés et compris au mieux par la population, indépendamment de toute aide de l'ONG ou d'ailleurs. À cette fin, les manuels ont été rédigés de façon assez simple et schématique afin de répondre à une réelle demande d'une population majoritairement analphabète : ceux-ci ont été testés avec succès auprès des différents responsables des campements pêcheurs.

En conclusion, nous avons développé une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires à poisson en nous basant sur des bilans de matière et d'énergie. Ces bilans ont été combinés à des données imposées, telles que la température et la durée de séchage, et des conditions moyennes de séchage, comme les propriétés de l'air et la température de référence.

D'après notre étude de bilans sur le séchoir, le phénomène d'évacuation de la vapeur d'eau est le facteur limitant le fonctionnement du séchage. Il nous a donc permis de prédéfinir la quantité maximale d'eau qui peut être enlevée en une journée, c'est-à-dire la quantité maximale de poisson frais qui peut être introduite sur les séchoirs, afin que le séchage soit uniforme et de bonne qualité.

Ces conditions théoriques ont été testées au Mali, dans des conditions réelles de séchage. Le monitoring de différents essais de séchage a confirmé la bonne applicabilité de la méthode théorique à des situations réelles de séchage.

Ce travail a donc constitué une véritable avancée dans la filière poisson au Mali. Grâce aux nouveaux séchoirs, le poisson séché est protégé de la poussière et de l'infestation par les insectes et les problèmes d'hygiène sont donc fortement amoindris. L'application des règles de bonnes pratiques définies préalablement assure l'obtention de produit de meilleure qualité : un séchage plus rapide, favorable à l'élimination de bactéries, permettant une meilleure conservation du produit. L'ensemble de la partie pratique a démontré de véritables enjeux liés aux projets de coopération au développement, tant du point de vue de la recherche et du développement durable, que d'un point de vue humain.