

Optimisation Du Séchage Du Voatsiperifery Ou Poivre Sauvage De Madagascar : Comparaison Entre Séchage Solaire Indirect Et Séchage Traditionnelle

¹Harimandamanampisoa RANAIVOSON, ²Mamitiana RAMAMONJISOA, ³Jean Luc RASOANAIVO,
⁴Achille Olivier RAVONINJATOVO, ⁵Lala ANDRIANAIVO

¹EDSTII, E-mail : mandamanamps@gmail.com ²CNRI, E-mail : mtr.mamitiana@gmail.com ³EDSTII, E-mail : jeanlucnj@gmail.com ⁴EDSTII, E-mail : achillegc@yahoo.fr ⁵EDSTII, E-mail : andrianaivo.andri@gmail.com
Auteur correspondant : Harimandamanampisoa RANAIVOSON. E-mail : mandamanamps@gmail.com



Résumé : Le voatsiperifery, poivre sauvage endémique de Madagascar, est une épice à forte valeur aromatique et commerciale, exportée à un prix supérieur à 20 euros par kilogramme. Toutefois, les méthodes traditionnelles de séchage, inadaptées et prolongées sur une durée de 3 à 5 jours, entraînent des pertes post-récolte estimées entre 30 et 50 %, dues notamment à la dégradation des composés phénoliques et à une contamination microbienne accrue.

La présente étude a pour objectif de comparer les performances du séchage solaire indirect et du séchage traditionnel appliqués au voatsiperifery, dans une optique d'optimisation du procédé de conservation. Quatre modalités de séchage ont été évaluées sur 4 kg de voatsiperifery frais (humidité relative initiale $\approx 80\%$) : séchage en séchoir solaire indirect de type CNRI, séchage au soleil direct et séchage à l'ombre. Les essais expérimentaux ont été conduits en conditions climatiques naturelles. Les paramètres analysés portent sur la cinétique de séchage, la teneur en eau finale, les conditions thermiques ainsi que la qualité du produit séché.

Les résultats mettent en évidence que le séchage solaire indirect offre un meilleur contrôle des conditions opératoires, permet une réduction significative du temps de séchage et conduit à une amélioration notable de la qualité du produit final par rapport au séchage traditionnel. Cette technique apparaît ainsi comme une solution durable, efficiente et particulièrement adaptée aux zones rurales de Madagascar pour la valorisation du voatsiperifery.

Mots-clés : Voatsiperifery, poivre sauvage, séchage solaire indirect, séchage traditionnel, qualité post-récolte.

Abstract: Voatsiperifery, a wild pepper endemic to Madagascar, is a spice with high aromatic and commercial value, exported at a price exceeding €20 per kilogram. However, inappropriate and prolonged traditional drying methods, lasting 3 to 5 days, result in post-harvest losses estimated at 30–50%, mainly due to the degradation of phenolic compounds and increased microbial contamination.

The present study aims to compare the performance of indirect solar drying and traditional drying methods applied to voatsiperifery, with the objective of optimizing the preservation process. Four drying modalities were evaluated using 4 kg of fresh voatsiperifery (initial relative humidity $\approx 80\%$): indirect solar drying using a CNRI-type solar dryer, direct sun drying, and shade drying. Experimental trials were conducted under natural climatic conditions. The parameters analyzed included drying kinetics, final moisture content, thermal conditions, and the quality of the dried product.

The results demonstrate that indirect solar drying provides better control of operating conditions, significantly reduces drying time, and leads to a marked improvement in the quality of the final product compared to traditional drying. This technique therefore appears to be a sustainable, efficient, and well-suited solution for rural areas of Madagascar to enhance the value of voatsiperifery.

Keywords: Voatsiperifery, wild pepper, indirect solar drying, traditional drying, post-harvest quality.

1. Introduction

Le voatsiperifery, également appelé poivre sauvage de Madagascar, est une épice rare reconnue pour ses caractéristiques aromatiques intenses et complexes. Sa demande croissante sur les marchés internationaux confère à cette ressource forestière une importance économique stratégique pour les communautés rurales malgaches. Cependant, la chaîne de transformation du voatsiperifery demeure peu structurée, entraînant des pertes post-récolte significatives.

Le séchage constitue l'étape clé de la conservation et de la stabilisation des épices. Les méthodes traditionnelles de séchage à l'air libre ou par exposition directe au soleil restent largement utilisées dans les pays tropicaux, mais elles présentent plusieurs inconvénients : durée de séchage prolongée, dépendance aux conditions climatiques, contamination microbienne et dégradation des composés bioactifs [1][2]

Le séchage solaire indirect est reconnu comme une alternative plus performante, notamment pour les produits sensibles à la lumière et à la chaleur excessive. Dans ce procédé, l'air est chauffé par un capteur solaire avant d'entrer dans la chambre de séchage, ce qui permet un meilleur contrôle des paramètres thermiques et une amélioration de la qualité finale du produit [3] [4]

L'objectif de cette étude est de comparer expérimentalement le séchage solaire direct et indirect du voatsiperifery, en évaluant leurs performances en termes de cinétique de séchage, de qualité du produit séché et d'efficacité énergétique, afin d'identifier les paramètres idéals pour la modélisation d'un séchoir solaire adaptée à sa valorisation.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Matière première

Les 4 kilogrammes de voatsiperifery utilisé dans cette étude proviennent du marché d'Anjro. Puis ils ont été lavé et trié selon l'utilité de l'expérimentation. 4kg voatsiperifery frais dont (i) 1ere échantillon : 1kg séché dans le séchoir solaire sur la claie supérieure, (ii) 2eme échantillon : 1kg séché dans le séchoir solaire sur la claie inférieure, (iii) 3eme échantillon : 1kg séché à l'air libre directement au soleil, (iv) 4eme échantillon : 1kg séché à l'air libre à l'ombre

2.2. Description des systèmes de séchage

2.2.1. Séchage traditionnel

Le séchage traditionnel consiste à exposer les baies de voatsiperifery à l'air libre, généralement sous l'action directe du soleil mais peut se faire aussi à l'ombre. Cette méthode repose entièrement sur les conditions climatiques et ne permet pas un contrôle précis de la température et de l'humidité de l'air, ce qui peut entraîner une variabilité importante de la qualité finale [1].

Pour cette étude, après triage et nettoyage, l'expérience du séchage du voatsiperifery traditionnel se fera dans les deux cas :

- Directement au soleil
- Et à l'ombre, sur des claies, ce qui confère deux paramètres différents.

2.2.2. Séchoir solaire indirect

Le séchage solaire indirect est réalisé à l'aide d'un séchoir comprenant un capteur solaire et une chambre de séchage séparée. L'air chauffé dans le capteur est ensuite dirigé vers la chambre de séchage, limitant l'exposition directe du produit au rayonnement solaire. Ce type de séchoir est particulièrement adapté aux épices et plantes aromatiques [5][6]

Le séchoir utilisé pour l'expérimentation est celui au Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, utilisant l'énergie solaire comme source principale d'énergie. Il fait partie du groupe des séchoirs solaires à lumière indirecte et à ventilation forcée.

Ce choix réside par le fait que :

- Le séchage à l'abri du soleil donne des meilleurs résultats sur la qualité des produits agroalimentaires par rapport à celui réalisé à la lumière directe. La couleur du produit obtenu reste plus brillante et plus proche de celle du produit frais et le contenu vitaminique reste quasi conservé.
- La ventilation forcée permet d'expulser une importante quantité d'humidité par rapport aux séchoirs solaires à convection naturelle de faible débit d'air asséchant. L'unité de séchage est un ensemble comprenant les éléments essentiels suivants
- Un champ d'insolateurs ou capteurs solaires assurant la transformation des rayons solaires en chaleur ;
- Une armoire de séchage dans laquelle sont disposés sur des claies les produits à sécher ;
- Un système de ventilation assurant la parfaite circulation de l'air asséchant ou le fluide caloporteur depuis le capteur vers l'armoire de séchage pour être refoulé à l'état d'air vicié vers l'extérieur ;
- Un chauffage auxiliaire qui réchauffe l'air à la sortie des insolateurs lorsque leur température est inférieure à celle désirée.

Le prototype du CNRIT est constitué par :

- Quatre (4) modules de capteurs,
- Une (1) armoire de séchage,
- Deux (2) résistances électriques,
- Un (1) ventilateur centrifuge.

2.3. Paramètres étudiés

Les paramètres prise en compte pour l'expérimentation sont :

- Évolution d'humidité relative
- Cinétique de séchage
- Température de séchage

2.4. Evaluation de la qualité du produit séché

2.4.1. Teneur en eaux (taux d'humidité) [7]

Le taux d'humidité est un paramètre crucial pour évaluer la qualité et la conservation du Voatsiperifery (comme pour tous les poivres), car il affecte directement ses propriétés organoleptiques (arômes, goût) et sa durabilité. Une teneur en eau trop élevée peut entraîner une dégradation prématurée des huiles essentielles et une perte de saveur, tandis qu'un taux d'humidité trop faible peut rendre les grains fragiles et altérer leur texture.

La teneur en humidité des grains de Voatsiperifery varie selon plusieurs facteurs, notamment les conditions de récolte et de séchage, ainsi que le mode de conservation. Cependant, en général, la teneur en humidité des poivres secs, y compris le Voatsiperifery, se situe autour de 12 à 14 % d'humidité.

Ce taux est optimal pour maintenir une bonne qualité des grains tout en permettant leur conservation à long terme sans risque de moisissures ou de dégradation des arômes. Un taux d'humidité plus élevé peut conduire à :

- Risque de moisissure : L'humidité excessive peut favoriser la prolifération de moisissures et de champignons sur les grains, ce qui nuit à la qualité et à la sécurité du produit.
- Perte d'arômes : L'humidité trop élevée favorise la dégradation des composés volatils (comme les terpènes et la pipérine), ce qui peut altérer le goût et l'arôme du poivre.

En revanche, un taux d'humidité trop bas (moins de 10 %) peut rendre les grains cassants et moins capables de libérer leurs arômes de manière optimale lors de la mouture.

Le séchage du Voatsiperifery joue un rôle essentiel dans l'obtention de cette teneur en humidité optimale. Traditionnellement, le Voatsiperifery est séché au soleil dans des conditions spécifiques, ce qui permet de réduire lentement l'humidité tout en préservant les huiles essentielles. Une fois que le taux d'humidité des grains atteint le niveau idéal, ils sont stockés dans des conditions sèches, à l'abri de la lumière et de l'humidité, pour éviter toute dégradation.

Des tests en laboratoire, tels que la méthode de dessiccation à l'étuve ou l'utilisation d'un humidimètre (appareil de mesure d'humidité), permettent de mesurer précisément le taux d'humidité des grains de poivre.

Maintenir un taux d'humidité optimal est essentiel pour :

- La conservation des arômes : Un taux d'humidité bien contrôlé permet de conserver les caractéristiques organoleptiques uniques du Voatsiperifery, notamment ses arômes complexes de fruits, de bois et d'épices.
- La prévention de la dégradation : La gestion de l'humidité prévient la détérioration des grains, de l'apparition de moisissures et de l'altération des saveurs.
- La mouture et l'utilisation : Un taux d'humidité adéquat permet de moudre les grains plus facilement, tout en libérant un maximum d'arômes lorsque le poivre est fraîchement moulu.

En résumé, pour préserver toute la richesse du Voatsiperifery, il est essentiel que le taux d'humidité des grains soit maintenu entre 12 et 14 %, garantissant ainsi une qualité optimale.

Le calcul du taux d'humidité du Voatsiperifery (comme pour toute épice sèche) se fait classiquement par méthode gravimétrique. C'est la méthode de référence en analyse physico-chimique.

2.4.2. Charge microbienne [8]

La charge microbienne correspond au nombre de micro-organismes vivants présents dans un aliment, exprimé en UFC/g (Unités Formant Colonie par gramme).

Pour le voatsiperifery, elle dépend fortement :

- Des conditions de récolte en milieu forestier,
- Du séchage,
- Du stockage,
- Et de la manipulation post-récolte.

Les micro-organismes généralement recherchés dans le voatsiperifery sont

i. Flore totale

La Flore Aérobie Mésophile totale (FAMT) est l'indicateur général de l'hygiène et de la qualité du procédé.

ii. Micro-organismes indicateurs

Les Levures et moisissures qui sont très importantes pour les épices séchées (risque de mycotoxines).

Les Coliformes totaux / E. coli qui sont les indicateurs de contamination fécale ou de mauvaises pratiques d'hygiène.

iii. Germes pathogènes (recherche d'absence)

- Salmonella spp (absence dans 25 g)
- Staphylococcus aureus
- Bacillus cereus (possible dans les épices)
- Clostridium spp (rare mais possible)

Les facteurs influençant la charge microbienne du voatsiperifery sont

- Séchage lent ou à température trop basse
- Taux d'humidité final > 12–14 %
- Contact avec le sol pendant le séchage
- Stockage dans des sacs perméables à l'humidité
- Absence de traitement de décontamination (vapeur, irradiation)

3. Résultats et Discussion

3.1. Résultats des séchages

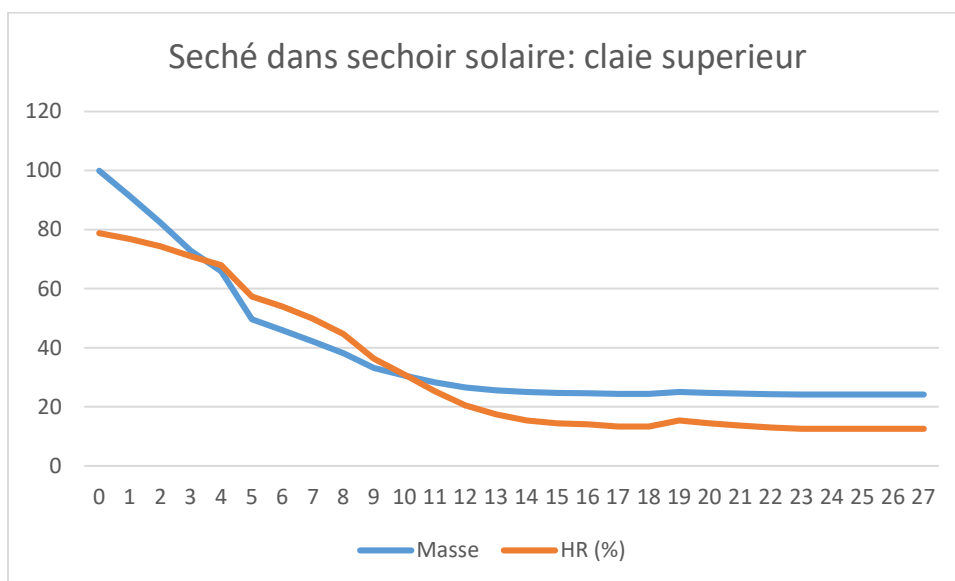
Cette étude compare quatre méthodes de séchage du poivre sauvage de Madagascar : séchage solaire en claie supérieure, séchage solaire en claie inférieure, séchage à l'air libre au soleil et séchage à l'air libre à l'ombre. Les cinétiques de perte de masse, l'évolution de l'humidité relative et les teneurs finales en eau ont été analysées afin d'identifier la méthode la plus efficace et la plus adaptée à la préservation de la qualité du produit.

Dans l'expérimentation, on a étudié 4kg voatsiperifery frais dont (i) 1ere échantillon : 1kg séché dans le séchoir solaire sur la claie supérieure, (ii) 2eme échantillon : 1kg séché dans le séchoir solaire sur la claie inférieure, (ii) 3eme échantillon : 1kg séché à l'air libre directement au soleil, (iv) 4eme échantillon : 1kg séché à l'air libre à l'ombre

i. 1ere échantillon : 1kg séché dans le séchoir solaire sur la claie supérieure

Tableau 1: Variation de la masse et d'humidité du 1ere échantillon

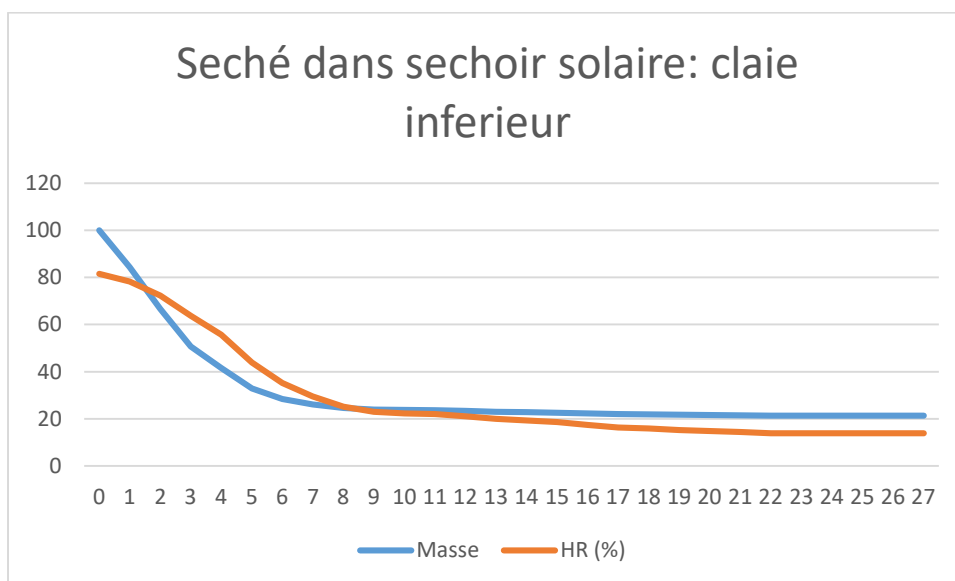
Durée (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Masse	100	91,4	82,4	72,8	65,9	49,6	45,9	42,2	38,2	33,2	30,6	28,3	26,6	25,6	25
HR (%)	78,85 525	76,86 57002	74,33 88956	70,95 50137	67,91 38847	57,36 94556	53,93 30065	49,89 39573	44,64 72513	36,31 0994	30,89 95098	25,28 35689	20,50 84586	17,40 33203	15, 421
Durée (h)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Masse	24,7	24,6	24,4	24,4	25	24,7	24,5	24,3	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2		
HR (%)	14,39 37247	14,04 57317	13,34 11885	13,34 11885	15,42 1	14,39 37247	13,69 4898	12,98 45679	12,62 5	12,62 5	12,62 5	12,62 5	12,62 5		



ii. 2eme échantillon : 1kg séché dans le séchoir solaire sur la claie inferieur

Tableau 2: Variation de la masse et d'humidité du 2ème échantillon

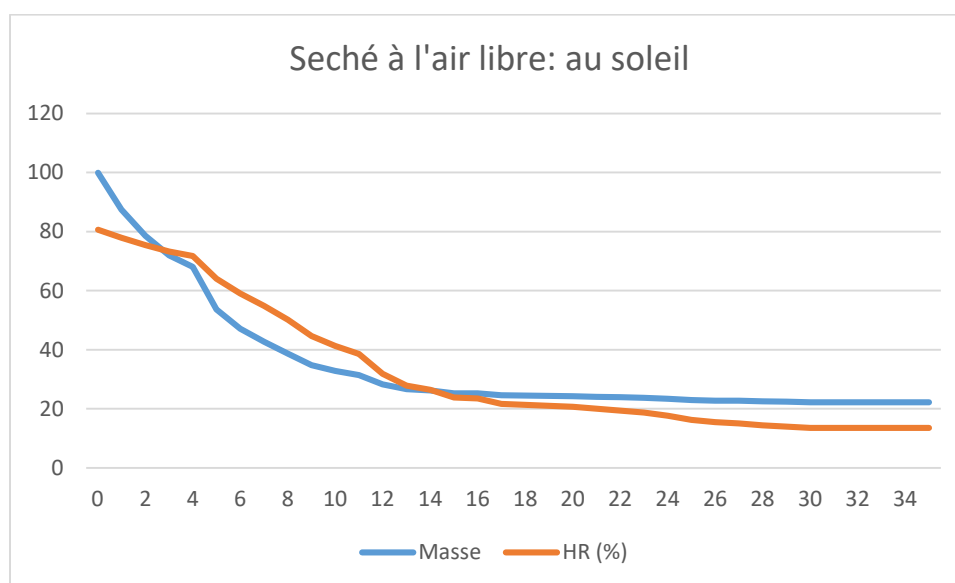
Durée (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Masse	100	84,4	66,5	50,7	41,6	32,8	28,4	26,1	24,6	23,9	23,7	23,6	23,3	23	22,8
HR (%)	81,58 851	78,18 54384	72,31 35489	63,68 54241	55,74 16106	43,86 74085	35,17 08099	29,45 78927	25,15 65447	22,96 4477	22,31 43882	21,98 52119	20,98 07296	19,95 00435	19,24 78509
Durée (h)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Masse	22,6	22,3	22	21,9	21,7	21,6	21,5	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4		
HR (%)	18,53 32301	17,43 72646	16,31 14091	15,92 92694	15,15 4424	14,76 16204	14,36 51628	13,96 5	13,96 5	13,96 5	13,96 5	13,96 5	13,96 5		



iii. 3eme échantillon : 1kg séché à l'air libre directement au soleil

Tableau 3: Variation de la masse et d'humidité du 3ème échantillon

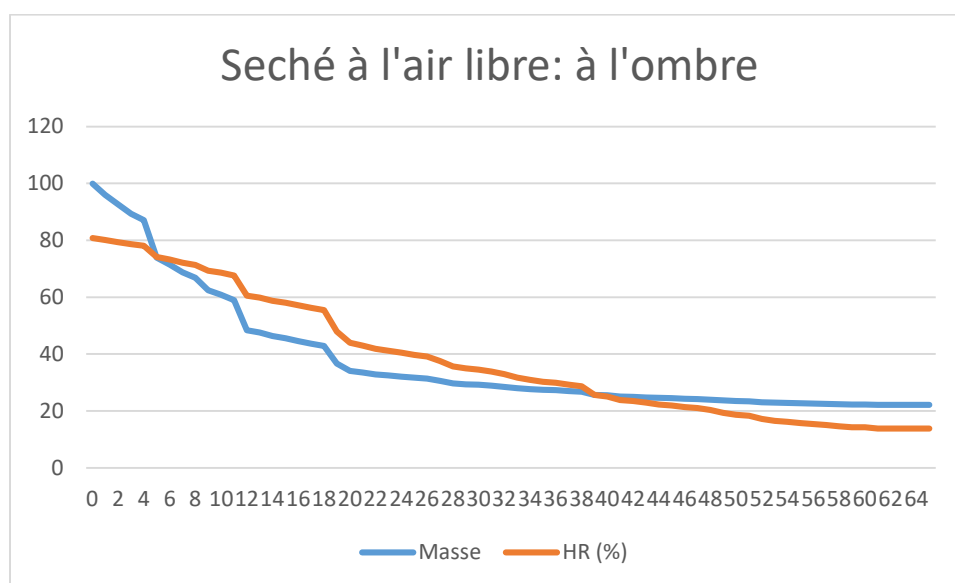
Durée (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Masse	100	87,5	78,6	72	68,1	53,6	47,1	42,7	38,7	34,8	32,8	31,4	28,3	26,7	26,2	25,3	25,2	24,6	24,5
HR (%)	80,729455	77,97652	75,4827672	73,2353542	71,7025771	64,0474907	59,0858917	54,869918	50,2053101	44,6248707	41,2483384	38,6288376	31,9062014	27,8256742	26,4483015	23,8318379	23,5295833	21,6644512	21,3447143
Durée (h)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35		
Masse	24,4	24,3	24,1	23,9	23,7	23,4	23	22,8	22,7	22,5	22,4	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3		
HR (%)	21,0223566	20,6973457	20,0392324	19,3701046	18,6896835	17,6472436	16,2150217	15,4800658	15,1077313	14,3531333	13,9707813	13,513,585	13,513,585	13,513,585	13,513,585	13,513,585	13,513,585		



iv. 4eme échantillon : 1kg séché à l'air libre à l'ombre

Tableau 4: Variation de la masse et d'humidité du 4ème échantillon

Durée (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Masse	100	96	92,6	89,4	87,1	73,9	71,5	68,7	66,8	62,4	60,9	59	48,4	47,6	46,3	45,6
HR (%)	80,883 58	80,087 0625	79,355 9179	78,616 9799	78,052 3307	74,132 0433	73,263 7483	72,174 0611	71,382 6048	69,364 7115	68,610 1478	67,599 2881	60,503 2645	59,839 4538	58,711 8359	58,078 0263
Durée (h)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Masse	44,6	43,7	42,9	36,7	34,1	33,5	32,9	32,5	32,1	31,7	31,4	30,6	29,7	29,4	29,2	28,9
HR (%)	57,138 0717	56,255 3318	55,439 5804	47,911 6621	43,940 1173	42,936 0597	41,895 3799	41,180 2462	40,447 2897	39,695 836	39,119 6815	37,528 0392	35,634 9495	34,978 1633	34,532 8082	33,853 218
Durée (h)	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Masse	28,5	28	27,7	27,4	27,3	27	26,8	25,7	25,5	25,1	25	24,8	24,6	24,5	24,3	24,2
HR (%)	32,924 8421	31,727 0714	30,987 6534	30,232 0438	29,976 4835	29,198 4444	28,670 0746	25,617 0428	25,033 6471	23,838 9641	23,534 32	22,917 6613	22,290 9756	21,973 7959	21,331 6049	21,006 5289
Durée (h)	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Masse	24	23,7	23,5	23,4	23,1	22,9	22,8	22,7	22,6	22,5	22,4	22,3	22,3	22,2	22,2	22,2
HR (%)	20,348 25	19,34	18,653 5319	18,305 8974	17,244 9351	16,522 1834	16,156 0526	15,786 696	15,414 0708	15,038 1333	14,658 8393	14,276 1435	14,276 1435	13,89	13,89	13,89
Durée (h)	64	65														
Masse	22,2	22,2														
HR (%)	13,89	13,89														



Interprétation de l'évolution de la masse et de l'humidité :

Les résultats montrent une diminution progressive de la masse pour l'ensemble des échantillons, traduisant l'élimination de l'eau libre et liée. Le séchage en séchoir solaire, en particulier sur la claie inférieure, présente la cinétique la plus rapide, avec une stabilisation de la masse autour de 21,4 % après environ 27 heures. La claie supérieure atteint l'équilibre légèrement plus tard avec une masse finale proche de 24,2 %.

Le séchage à l'air libre au soleil est plus lent, nécessitant environ 35 heures pour atteindre une masse stable ($\approx 22,3$ %). En revanche, le séchage à l'ombre est nettement le plus long, avec plus de 60 heures nécessaires pour atteindre un état quasi-stationnaire.

Le séchoir solaire permet une réduction rapide de l'humidité grâce à l'élévation de la température et à une meilleure circulation de l'air. La claie inférieure apparaît plus performante que la claie supérieure, probablement en raison d'une température plus homogène et d'un flux d'air plus stable.

Le séchage direct au soleil, bien que plus lent que le séchage solaire, reste relativement efficace mais expose davantage le produit aux risques de dégradation (photo-oxydation, contamination). Le séchage à l'ombre, bien que plus protecteur vis-à-vis des composés sensibles, se caractérise par une lenteur excessive pouvant favoriser les altérations microbiologiques.

3.2. Résultats des analyses

3.2.1. Teneur en eau

Tableau 5: Résultats des analyses faites au FOFIFA

Types de séchage	Numéro des échantillons	Humidité Relative (HR)	Masse de matières sèches (g)
Séchage dans séchoir solaire – claie supérieur	1	12,1288	21,0043
	1'	11,7518	
Séchage dans séchoir solaire – claie inférieur	2	12,0079	18,4007
	2'	11,9903	

Séché à l'air libre au soleil	3	12,0465	19,3062
	3*	11,2398	
Séché à l'air libre à l'ombre	4	13,8944	19,1153
	4*	13,4642	

Interprétation :

Les analyses réalisées au FOFIFA indiquent que les échantillons séchés en séchoir solaire et à l'air libre au soleil présentent des teneurs finales en eau comprises entre 11 et 12 %, compatibles avec les exigences de conservation des épices. En revanche, le séchage à l'ombre affiche une teneur légèrement plus élevée ($\approx 13-14$ %), pouvant réduire la durée de conservation.

3.2.2. Charge microbienne :

Tableau 6: Résultats des analyses faites au CNRE

Dénombrement	Voatsiperifery				Unité	Méthodes	Critères
	Séchoir solaire – claie sup	Séchoir solaire – claie inf	Séchage à l'air libre au soleil	Séchage à l'air libre à l'ombre			
Flore aérobie mésophile totale	> 3 000 000	770 000	85 000	330 000	UFC/g	ISO 4833-1	-
Levures	< 1	< 1	< 1	< 1	UFC/g	ISO 21527-1	-
Moisissures	80	90	70	240	UFC/g	ISO 21527-1	100 000

Interprétation :

i. **Flore aérobie mésophile totale (FAMT)**

La flore aérobie mésophile reflète l'hygiène globale du procédé. Le séchoir solaire, surtout claie supérieure, présente une contamination importante, probablement liée à

- Une température ou ventilation insuffisante,
- Une manipulation ou un environnement contaminant,
- Une accumulation d'humidité.

Le séchage à l'air libre au soleil donne les meilleurs résultats microbiologiques.

Pour mieux respecter l'indicateurs clé pour l'export, il est donc important d'apporter des améliorations sur les paramètres du séchoirs solaires.

ii. **Levures**

L'analyse montre une excellente qualité de séchage et de produit :

- Absence quasi totale de levures sur les 4 types de séchage
- Très bon signe pour la stabilité du produit c'est-à-dire un faible risque de fermentation

iii. **Moisissure**

Tous les échantillons sont largement conformes :

- Faible risque de développement fongique
- Bon point pour la sécurité sanitaire et la conservation

3.3. Discussion comparative

3.3.1. Conditions de séchage

Le séchage solaire indirect a permis d'obtenir une température de l'air plus stable et plus homogène que le séchage traditionnel, limitant les fluctuations liées au rayonnement solaire.

3.3.2. Cinétique de séchage

Le temps de séchage du voatsiperifery a été significativement réduit dans le séchoir indirect. La vitesse de séchage est restée plus régulière, favorisant une meilleure diffusion de l'eau depuis l'intérieur du produit. L'échantillon qui se trouvait sur la claie inférieure sèche plus vite que les 3 autres échantillons.

3.3.3. Qualité du produit séché

Les poivres sauvages séchées dans l'ombre présentent une meilleure conservation de la couleur et une charge microbienne plus faible. Le séchage direct, bien que plus simple, entraîne une exposition prolongée pouvant altérer certains composés sensibles.

Le séchoir solaire optimise la rétention phénolique (rendement pipérine et huiles essentielles), tout en accélérant le séchage, idéal pour la valorisation agroalimentaire malgache. Le séchage au soleil, traditionnel, entraîne les plus fortes dégradations par UV/chaaleur excessive, tandis qu'à l'ombre convient pour minimiser l'oxydation sans équipement. Ces différences influencent arômes et antioxydants finaux

Les résultats obtenus sont en accord avec les travaux antérieurs sur le séchage des épices, confirmant l'intérêt du séchage solaire indirect pour les produits à forte valeur ajoutée comme le voatsiperifery.

3.3.4. Optimisation du procédé

L'amélioration du séchage du voatsiperifery est primordiale pour une bonne valorisation du produit fini.

L'optimisation du séchage du voatsiperifery repose sur

- Le contrôle de la température
- Le contrôle du débit d'air
- Le contrôle de la durée de séchage

Le séchage solaire indirect apparaît comme un compromis optimal entre efficacité énergétique et qualité du produit final.

4. Conclusion

Le séchage en séchoir solaire, notamment sur la claie inférieure, apparaît comme la méthode la plus performante pour le Voatsiperifery, offrant un bon compromis entre rapidité de séchage, maîtrise de l'humidité finale et sécurité sanitaire. Cette technique constitue une alternative adaptée aux conditions rurales malgaches pour la valorisation durable de cette épice à haute valeur ajoutée.

Cette étude montre que le séchage solaire indirect est plus performant que le séchage solaire direct pour le voatsiperifery. Il permet un meilleur contrôle des conditions de séchage, une réduction du temps de traitement et une amélioration significative de la qualité du produit séché. Ces résultats encouragent le développement de solutions de séchage solaire adaptées à la valorisation durable du poivre sauvage de Madagascar.

Références

- [1] El-Sebaï, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134>
- [2] Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press.
- [3] Sharma, A., Chen, C. R., & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 176–201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>
- [4] Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar drying technology – Concept, design, testing, modeling, and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 176–201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>
- [5] Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16–54. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9044-6>
- [6] Kassem, A. S., Al-Sulaiman, F. A., & Ibrahim, A. A. (2024). Comparative performance analysis of direct and indirect solar dryers for agricultural products. *Sustainability*, 16(2), 775. <https://doi.org/10.3390/su16020775>
- [7] METTLE TOLEDO Brochure d'application du taux d'humidité
- [8] Formule pour le calcul général de la charge microbienne