

RAPPORT TECHNIQUE

ADAPTATION DU BIORÉACTEUR BREVETÉ SHOC^{MD} POUR LA VALORISATION DU FUMIER DE POULE EN ENGRAIS, EN CONTEXTE DE CONVERSION POUR DU LOGEMENT ENRICHI

VOLET 2 – ADAPTATION TECHNOLOGIQUE – INNOVATION

ANNEXE 1 - RAPPORT TECHNIQUE

Auteurs : Denis Potvin, agr.
Dan Zegan, ing., M.Sc.

Responsable scientifique: Denis Potvin, agr., chargé de projets

Rapport présenté au : Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ)
Date : Décembre 2022

No Projet IRDA: 400957/405957
No Projet Innov'Action: IA220584



L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

Notre vision

En 2023, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRES



Adaptation du bioréacteur breveté SHOC^{MD} pour la valorisation du fumier de poule en engrais, en contexte de conversion pour du logement enrichi

Annexe 1 du rapport final

Présenté au :

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Préparé par :

Denis Potvin, agr.,
IRDA

Dan Zegan, ing., M.Sc.
IRDA

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Denis Potvin, agr., IRDA	- Jacques Cloutier, producteur et président Groupe Amico
- Dan Zegan, ing., M. Sc. IRDA	- Ghislain Cloutier, producteur, Groupe Amico
- Équipe technique IRDA	- Équipe technique Ferme Lévis Œufs (Groupe Amico)
Cédric Morin, instrumentation/contrôle	
Ouvriers	

Pour toutes questions relatives à ce rapport, les personnes peuvent s'adresser à :

Denis Potvin, agr.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 414

Courriel : denis.potvin@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Les travaux ont été réalisés grâce à une aide financière provenant des programmes Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Nous tenons à souligner la contribution de l'entreprise agricole Lévis Œufs Inc. notamment la précieuse collaboration de messieurs Ghislain et Jacques Cloutier du groupe Amico, qui a permis de réaliser notamment un suivi régulier du procédé tout au long du projet. Leur participation financière et technique a grandement contribué à l'atteinte des objectifs et au succès du projet.

Finalement, il importe de souligner la contribution de l'IRDA qui a mis à la disposition de l'équipe de réalisation les ressources humaines, matérielles et monétaires adéquates afin d'assurer l'atteinte des objectifs.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	1
1.1. MISE EN CONTEXTE	1
1.2. BUT ET OBJECTIFS	4
2 PROCÉDÉ DE TRAITEMENT DU FPP INCLUANT LA TECHNOLOGIE SHOC^{MD}	5
2.1 LE PROCÉDÉ DE TRAITEMENT DU FPP À LA FERME	5
2.2 L'UNITÉ DE TRAITEMENT BIOLOGIQUE SHOC ^{MD}	6
3 MATÉRIEL ET MÉTHODES	8
3.1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	8
3.1.1 <i>Séchage du FPP sur les courroies</i>	9
3.1.1.1 Procédure expérimentale	9
3.1.1.2 Paramètres suivis	10
3.1.2 <i>Traitement biologique par bioséchage</i>	10
3.1.3 <i>Caractéristiques de l'unité pilote</i>	11
3.1.3.1 Procédure expérimentale	11
3.1.3.2 Paramètres suivis	12
3.1.3.3 Commande, contrôle et acquisition de données	12
3.1.3.4 Traitements comparés	13
3.1.4 <i>Séchage thermique</i>	15
3.1.4.1 Caractéristiques de l'unité de séchage thermique	15
3.1.4.2 Procédure expérimentale	17
3.1.4.3 Paramètres suivis	17
4 ACTIVITÉS DU PROJET	18
5 RÉSULTATS ET ANALYSES	19
5.1 DÉSHYDRATATION DU FPP DANS LE POULAILLER	19
5.1.1 <i>Mise en place de la procédure expérimentale de suivi du séchage du FPP sur les courroies</i>	19
5.1.2 <i>Analyse de caractérisation du séchage du FPP dans le poulailler</i>	19
5.1.2.1 L'humidité du FPP sur la courroie	20
5.1.2.2 Perméabilité à l'air du FPP à la sortie du poulailler	22
5.1.2.3 Bilan de masse à la sortie du poulailler	24
5.2 BIOSÉCHAGE DU FPP	24
5.2.1 <i>Mise en place de l'installation expérimentale de séchage biologique</i>	24
5.2.2 <i>Déroulement des essais et analyse préliminaire</i>	24
5.2.3 <i>Analyse de caractérisation du traitement de bioséchage</i>	26
5.2.3.1 Essais en régimes de ventilation variés (R1S1 à R1S15)	27
5.2.3.2 Essais en régime de ventilation alternée optimisé	32
5.2.4 <i>Caractéristiques du FPP à l'entrée et la sortie du bioséchoir</i>	37
5.2.4.1 Analyses de laboratoire pour la caractérisation du FPP	37
5.2.4.2 Étude de caractérisation en détail des paramètres biochimiques et des ratios du FPP	40
5.3 SÉCHAGE THERMIQUE DU FPP	43
5.3.1 <i>Mise en place de l'installation expérimentale</i>	43

5.3.2	<i>Analyse de caractérisation du traitement de séchage thermique du FPP</i>	43
5.3.2.1	Essais de caractérisation du séchage thermique du FPP	43
5.3.2.2	Traitements de séchage thermique du FPP	45
5.4	BILAN DE MASSE ET D'ÉNERGIE POUR LE TRAITEMENT DU FPP	48
5.4.1	<i>Bilans de masse pour le traitement du FPP (unité pilote de 5 m3)</i>	48
5.4.1.1	Performances énergétiques pour le traitement du FPP	49
6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	52
	RÉFÉRENCES	57
	ANNEXE A	58
A1.	BILANS DE MASSE PRÉLIMINAIRES POUR LE BIOSÉCHAGE DU FPP	58
A2.	VARIATION DES TEMPÉRATURES POUR LE BIOSÉCHAGE DU FPP EN RÉGIME STABILISÉ	60
A3.	VARIATION DES TEMPÉRATURES POUR LE BIOSÉCHAGE DU FPP EN RÉGIME D'HYGIÉNISATION	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma préliminaire du procédé de traitement du FPP à la ferme	5
Figure 2. Schéma de principe du bioséchoir SHOC ^{MD}	
Figure 3. Bioséchoir SHOC ^{MD} IRDA, (St-Patrice de Beaurivage, 2011)	7
Figure 4. Disposition des poulaillers et de la plate-forme à fumier	8
Figure 5. Emplacement des sections de traitement biologique (1) et de séchage thermique (2) à la ferme.....	
Figure 6. Unité pilote SHOC ^{MD} : Conception de l'IRDA et installation de l'unité pilote le banc d'essai installé à la ferme	
Figure 7. Détails de l'unité pilote SHOC ^{MD} 5 m ³	11
Figure 8. Emplacement des sondes de température du matériel.....	
Figure 9. Procédure expérimentale pour la réalisation des essais en régime stabilisé	
Figure 10. Unité de séchage thermique HARVEST SAVER 5A avec module de commande et contrôle Honeywell UDC 2500	
Figure 11. Schéma de principe d'un dispositif de séchage direct à l'air avec recirculation	16
Figure 12. Déshydratation du FPP en fonction du temps de résidence sur la courroie.....	21
Figure 13. Suivi des paramètres de l'air dans le poulailler # 2 pendant les essais.....	21
Figure 14. Valeurs de référence de l'humidité du FPP sur la courroie	22
Figure 15. Performances de la déshydratation par bioséchage du FPP en régime stabilisé.....	30
Figure 16. Performances d'hygiénisation par bioséchage du FPP en régime de ventilation stable	30
Figure 17. Performances de la déshydratation par bioséchage du FPP en régime de ventilation alterné	35
Figure 18. Températures par bioséchage du FPP en régime de ventilation alternée	35
Figure 19. Analyse de laboratoire concernant les pathogènes pour un régime d'hygiénisation (RH7) par bioséchage du FPP	39
Figure 20. Courbes de séchage thermique du FPP	44
Figure 21. Courbes de caractérisation du séchage thermique du FPP	45
Figure 22. Évaluation de la durée de séchage en fonction de l'humidité du FPP	45
Figure 23. Comparaison des performances et des coûts du séchage thermique du FPP	47
Figure 24. Comparaison des performances d'un traitement combiné (bioséchage et séchage thermique d'appoint) et d'un traitement unique de séchage thermique	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Fumiers de volaille séchés et granulés disponibles commercialement au Québec (Duval, 2016)	
Tableau 2. Activités du projet.....	18
Tableau 3. Suivi de l'humidité du FPP sur la courroie dans le poulailler #2.....	20
Tableau 4. Caractéristiques du FPP sur la courroie dans le poulailler #2.....	23
Tableau 5. Bilan de masse du poulailler # 2 (TRC de 0-3 jours).....	24
Tableau 6. Bilan de masse global du traitement de bioséchage (étape 1 : mai 2020 - mars 2021).....	25
Tableau 7. Bilan de masse global du traitement de bioséchage (étape 2: avril- décembre 2022)	26
Tableau 8. Bilan de masse global pour la période d'essais 2020-2022	26
Tableau 9. Régimes de ventilation stable pour le bioséchage du FPP	28
Tableau 10. Analyse des performances en régime de ventilation stable pour le bioséchage du FPP	29
Tableau 11. Régimes de ventilation alternée par bioséchage du FPP.....	33
Tableau 12. Analyse des performances en régime de ventilation alterné par bioséchage du FPP	34
Tableau 13. Analyses de laboratoire du FPP à l'entrée et à la sortie du bioséchoir (I)	37
Tableau 14. Caractéristiques du FPP à l'entrée et à la sortie du bioséchoir	38
Tableau 15. Analyses réalisées sur le fumier frais et le fumier bioséché	40
Tableau 16. Comparaison des contenus (b.h.) et des ratios des formes solubles et totales de C et N entre le fumier frais et le fumier bioséché et d'autres engrais organiques sur le marché	41
Tableau 17. Comparaison des contenus et des ratios des formes solubles et totales de P, K, Ca, Mg, Cu et Zn entre le fumier frais et le fumier bioséché et d'autres engrais organiques sur le marché	41
Tableau 18. Séchage thermique du FPP avec le déshydrateur Harvest Saver	44
Tableau 19. Performances du séchage thermique du FPP avec le déshydrateur Harvest Saver	46
Tableau 20. Performances du séchage thermique du FPP avec le déshydrateur Harvest Saver	47
Tableau 21. Bilan massique du bioséchage du FPP avec l'unité pilote de 5 m ³	49
Tableau 22. Bilan massique du FPP bioséché avec le séchoir thermique d'appoint (I)	49
Tableau 23. Bilan massique pour le traitement du FPP par bioséchage et séchage thermique d'appoint (I)	49
Tableau 24. Performances énergétiques pour l'unité pilote de 5 m ³	50

LISTE DES FIGURES - ANNEXES

A - Figure 1. Bilan de masse préliminaire pour l'étape 1 d'essais	58
A - Figure 2. Bilan de masse préliminaire pour l'étape 2 d'essais	59
A - Figure 3. Variation des températures en régime stabilisé R1S1, le 20 juin 2020	60
A - Figure 4. Variation des températures en régime stabilisé R1S2, du 4 au 6 juillet 2020	60
A - Figure 5. Variation des températures en régime stabilisé R1S3, du 24 au 26 juillet 2020	60
A - Figure 6. Variation des températures en régime stabilisé R1S4, du 11 au 13 août 2020	61
A - Figure 7. Variation des températures en régime stabilisé R1S5, du 24 au 26 août 2020	61
A - Figure 8. Variation des températures en régime stabilisé R1S6, du 27 au 29 sept. 2020	61
A - Figure 9. Variation des températures en régime stabilisé R1S7, du 12 au 14 oct. 2020	62
A - Figure 10. Variation des températures en régime stabilisé R1S8, du 28 au 30 oct. 2020	62
A - Figure 11. Variation des températures en régime stabilisé R1S9, du 9 au 11 nov. 2020	62
A - Figure 12. Variation des températures en régime stabilisé R1S10, le 26 nov. 2020	63
A - Figure 13. Variation des températures en régime stabilisé R1S11, du 20 au 22 déc. 2020	63
A - Figure 14. Variation des températures en régime stabilisé R1S12, du 9 au 11 janv. 2021	63
A - Figure 15. Variation des températures en régime stabilisé R1S13, le 26 janv. 2021.....	64
A - Figure 16. Variation des températures en régime stabilisé R1S14, le 28 février 2021.....	64
A - Figure 17. Variation des températures en régime stabilisé R1S15, le 10 avril 2021	64
A - Figure 18. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH1, du 11 au 20 avril 2021	65
A - Figure 19. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH2, du 21 au 25 avril 2021	65
A - Figure 20. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH3, du 26 au 30 avril 2021	65
A - Figure 21. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH4, du 1 ^{er} au 5 mai 2021	66
A - Figure 22. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH5, du 6 au 12 mai 2021	66
A - Figure 23. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH6, du 19 au 29 mai 2021	66
A - Figure 24. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH7, du 17 au 27 juin 2021	67
A - Figure 25. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH8, du 29 juin - 11 juillet 2021	67
A - Figure 26. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH9, du 13-20 juillet 2021.....	67
A - Figure 27. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH10, du 21 au 25 juillet 2021	68
A - Figure 28. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH11, du 6 au 13 août 2021.....	68
A - Figure 29. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH12, du 14 au 21 août 2021.....	68
A - Figure 30. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH13, du 26 sept. au 2 oct. 2021	69
A - Figure 31. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH14, du 9 au 21 oct. 2021	69

A - Figure 32. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH15, du 27 oct. au 11 nov. 2021	69
A - Figure 33. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH16, du 13 au 22 nov. 2021	70
A - Figure 34. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH17, du 2 au 22 déc. 2021	70

1 INTRODUCTION

1.1. MISE EN CONTEXTE

Depuis 2001, la gestion du fumier de poules pondeuses (FPP) demeure une priorité pour la Fédération des producteurs d'œufs du Québec [FPOQ, 2019]. Ces derniers se sont engagés à convertir l'ensemble de leurs sites de production conventionnels par des logements alternatifs afin d'accroître le bien-être animal. Cette conversion modifie les caractéristiques du FPP issu des nouvelles installations et impose l'étude de méthodes de gestion du fumier de volailles adaptées à ce nouveau contexte.

L'épandage de fumiers frais de bovins ou de volaille est une option répandue pour le recyclage des éléments nutritifs en agriculture. Le caractère saisonnier de cette activité et le besoin d'exporter ce produit imposent de plus en plus la nécessité de développer des méthodes de gestion qui facilitent l'entreposage, le transport et l'épandage d'un engrais solide et stable [Gagné, 2016].

Le compostage du FPP constitue une alternative de gestion qui permet de stabiliser, de désodoriser et d'assécher partiellement le produit tout en l'hygiénisant afin de le rendre plus attrayant pour des utilisateurs en agriculture et horticulture. La valorisation du FPP sous forme de compost ou d'engrais granulé fait partie du paysage québécois depuis déjà quelques décennies [Gagné, 2016].

Simon Beauvais, copropriétaire de la ferme Les Œufs d'Or à Val-d'Or est, avec son produit ÉCOLO-NATURE, 4-6-4, l'un des pionniers de cette approche démarrée en 1995. L'entreprise a mis en place un système de compostage du FPP d'abord séché à l'air et ensuite composté [Robitaille, 2007]. De sept à huit tonnes de fumier sont ainsi traitées quotidiennement dans un bâtiment de compostage où un équipement de retournement est utilisé fréquemment sur une période d'environ 42 jours.

La Ferme avicole Bourgeois Dumont (Îles-de-la-Madeleine) utilise une technologie inspirée de celle de l'entreprise Les Œufs d'Or. Il s'agit de la première petite ferme au Québec qui traite le FPP pour en faire un produit final composté, granulé et ensaché. Démarré en 2009, le procédé génère un compost qui porte la marque de Fert'Îles 5-3-1 (Pur fumier de poules).

Producteur d'œufs depuis 1966, le Groupe Amico (Lévis) est spécialisé dans la production d'œufs de ferme. L'exploitation est composée de deux entités soit la Ferme Amico qui se consacre en partie à la vente d'œufs frais du jour en kiosque libre-service ainsi qu'à la vente de compost de fumier de volaille et la Ferme Lévis qui produit des œufs en logements enrichis. Depuis 2017, l'entreprise développe une approche de gestion qui vise la production d'un engrais de FPP par compostage. Le Fertilisant AMICO est un engrais naturel composé à 100% de FPP destiné aux producteurs agricoles et adeptes du jardinage. Il est certifié par l'organisme ECOCERT et approuvé pour son emploi en agriculture biologique.

Le séchage du FPP, à la sortie du poulailler dans un séchoir spécialisé utilisant l'air sortant du poulailler, représente une autre solution appliquée pour stabiliser partiellement le fumier.

L'entreprise Agrigesco en Montérégie est avant tout un producteur d'œufs et qui a démarrée, en 1995, l'entreprise Acti-sol dont les produits sont aujourd'hui, reconnus et largement utilisés comme engrais au Québec. Acti-sol

recycle chaque année des milliers de tonnes de FPP et produit des engrais naturels approuvés par ECOCERT, Québec vrai (OCQV) et OMRI pour leur utilisation en agriculture biologique.

Acti-Sol utilise et commercialise également le séchoir de marque SECONOV développé spécifiquement pour le séchage du FPP.

La ferme avicole Paul Richard et Fils (Rivière-Héva) a été parmi les premiers au Canada à utiliser un poulailler aménagé pour offrir un meilleur confort aux poules. Le FPP est évacué vers l'arrière du bâtiment où se trouve un séchoir qui utilise l'air des poulaillers pour sécher le fumier. Le fumier est ramassé à l'aide d'une grappe, séché et mis en granules. La moitié de la production du FPP sert à amender le sol, le reste étant vendu à d'autres producteurs locaux.

Présentement, des équipements provenant d'Europe et des États-Unis sont disponibles pour le séchage du FPP. Les plus importantes compagnies qui offrent ce type d'installations sont : Salmet, Dorset GM, Jansen Poultry Equipment, Farmer Automatic Drying System, Facco Poultry Equipment, Poultry VDL Agrotech. Le séchage du FPP avec de tels équipements comporte une certaine complexité relativement à l'aménagement des infrastructures ainsi que des coûts d'acquisition et d'exploitation suffisamment importants pour freiner leur expansion.

La valorisation du FPP, notamment par la production d'engrais biologiques, est une avenue de gestion qui peut permettre d'améliorer la rentabilité de la gestion du FPP. Le manuel des intrants biologiques [Duval, 2016] a répertorié les fumiers de volaille séchés et disponibles commercialement au Québec (Tableau 1).

Tableau 1. Fumiers de volaille séchés et granulés disponibles commercialement au Québec (Duval, 2016)

Pur fumier de poule (Acti-sol)	Fumier de volaille séché et granulé	général	Canada, par Québec Vrai et par OMRI 5-3-2	ou vrac, 350 \$/t
Fertilo 5-3-3 (Fafard)		Fafard et frères	Approuvé par Québec Vrai 5-3-3	2, 9, 18 kg ou vrac
Eco-Sol 100 % naturel (Enviro-Sol)		Ferti Technologies inc.	Approuvé par Québec Vrai 4-4-3 et 5-4-3	20, 1 000 kg et vrac
Nutri-Wave Organic Granular Fertilizer (Greenhouse Gold)		Envirem organics inc.	Approuvé par Pro-Cert 4-1-2	22 lbs, 50 lbs, 1 t, Camion 25 t sur commande, vrac, 145 \$/t
Fertilisant organique naturel 5-5-3 (Les Oeufs d'Or)		Les Oeufs d'Or	Approuvé par Ecocert Canada et par OMRI 5-5-3	10 kg ou vrac, 280 \$/t
Fumier de poulet 5-5-3		Synagri	Approuvé par OMRI 5-5-3	20 kg et 700 kg

Les procédés actuels de fabrication d'engrais à base de FPP par compostage ou par séchage demeurent onéreux et nécessitent des équipements complexes, beaucoup de main-d'œuvre et de grandes infrastructures. La durée de ces traitements est longue et peut conduire à des pertes d'azote importantes pouvant atteindre plus de 50 %, notamment pour certains traitements par compostage [Duval, 2016], [Messier, 2013].

La recherche d'un procédé optimisé qui soit plus économique, performant et adaptable à des capacités de traitement variables constitue donc une avenue de recherche et de développement pertinente pour les entreprises intéressées à produire des engrais à partir de FPP.

Au Québec et au Canada, l'IRDA est un des pionniers dans le domaine du traitement par déshydratation biologique (bioséchage) de la biomasse en enceinte fermée. Depuis les années 2000, l'IRDA a développé une technologie de fabrication des engrais à partir de lisier, fumier ou boues organiques par bioséchage qui fait l'objet de deux brevets d'invention [IRDA, 2010. Brevet CA], [IRDA, 2010. Brevet US]. La technologie repose sur une première étape de déshydratation biologique aérobie dans une enceinte fermée, suivie par un séchage d'appoint qui utilise l'énergie thermique récupérée de l'étape de bioséchage et d'autres sources disponibles sur place (énergie verte, énergie résiduelle, etc.).

Le bioséchoir développé par l'IRDA porte le nom commercial de SHOC^{MD} (Système d'Hygiénisation par Oxydation Contrôlée) fait l'objet d'un brevet obtenu en 2019 [IRDA, 2019. Brevet CA]. Le régime de fonctionnement du bioséchoir a été conçu pour favoriser une déshydratation rapide et une dégradation biologique moindre du substrat organique, avec des temps de résidence dans le bioréacteur variant de 8 à 12 jours, au cours desquels, les températures dans la masse peuvent atteindre plus de 60°C. Le matériel est ainsi hygiénisé et partiellement désodorisé. L'effet de déshydratation par bioséchage permet de réduire l'humidité initiale d'environ 20 points de pourcentage en une dizaine de jours à la sortie du bioséchoir. La quantité d'eau qui demeure dans le substrat à la sortie du bioséchoir peut être éliminée par une étape subséquente de séchage thermique et ce, lorsqu'une teneur en eau (TEE) finale inférieure à 25% est recherchée. Cet agencement d'étapes de séchage permet de réduire de plus de 50% la consommation énergétique reliée à la déshydratation thermique.

Le Groupe Amico a déployé depuis des années d'importants efforts pour améliorer son procédé de traitement du FPP par compostage, séchage et granulation en vue de la production d'engrais de qualité. En 2019, l'entreprise a manifesté son intérêt pour l'application de la technologie de traitement développée par l'IRDA et elle est devenue partenaire au présent projet expérimental visant l'adaptation du bioréacteur SHOC^{MD} pour le traitement du fumier de poule, dans le cadre du Volet 2, Adaptation technologique, InnovAction.

1.2. BUT ET OBJECTIFS

Le projet s'inscrit parmi les enjeux du Plan stratégique du MAPAQ 2019-2023, soit celui d'un secteur bioalimentaire dynamique à l'écoute des consommateurs et qui soutient les entrepreneurs et les partenaires du secteur. Il a comme but d'accroître la valorisation de FPP pour répondre à une demande croissante notamment en agriculture biologique en fournissant une alternative technologique aux procédés commerciaux actuels.

L'un des buts de ce projet expérimental est la mise en place d'une démarche structurée réalisée à la ferme, en prenant en compte des conditions spécifiques d'un poulailler muni de logements enrichis. Ainsi, les nouvelles connaissances acquises pour déshydrater du FPP et le transformer en engrais biologique permettront de préciser l'intérêt d'une telle approche de bioséchage.

Dans un élevage avicole moderne, il est possible d'adapter la technologie SHOC^{MD} afin de l'intégrer dans un procédé de traitement en trois étapes : a) préséchage du FPP sur les courroies sous les cages de poules, b) séchage biologique du FPP dans le bioréacteur avec la chaleur microbienne et, c) séchage thermique avec séchoir à convection forcée pour compléter le séchage (facultatif).

L'objectif principal du projet est d'accroître le potentiel de valorisation du FPP pour répondre à une demande croissante, notamment en agriculture biologique, en fournissant une alternative technologique aux approches commerciales actuelles de production d'engrais tout en respectant les exigences des marchés et des organismes réglementaires.

Les objectifs spécifiques du projet sont:

- Identifier les paramètres optimaux pour le séchage du FPP sur les courroies du poulailler situées sous les logements enrichis qui permettent d'obtenir un matériel compatible pour le bioséchage;
- Adapter le bioséchoir SHOC^{MD} afin de maximiser l'assèchement du FPP et obtenir une matière organique de base hygiénisée, partiellement stabilisée et désodorisée;
- Identifier les solutions et les paramètres optimaux pour l'application d'une étape de séchage thermique d'appoint afin de compléter la transformation du FPP et l'obtention d'une matière organique de base pour la production de fertilisants de qualité.

À terme, le projet permettra de préciser, par voie expérimentale, le potentiel d'intégrer une technologie de bioséchage (SHOC^{MD}) dans une chaîne de traitement du FPP à la ferme, pour réaliser, le plus efficacement possible, un assèchement du fumier et l'obtention d'une matière organique de base hygiénisée, partiellement stabilisée et désodorisée pour la production de fertilisants. Le procédé pourrait constituer une alternative technologique aux procédés commerciaux actuels de production d'engrais.

2 PROCÉDÉ DE TRAITEMENT DU FPP INCLUANT LA TECHNOLOGIE SHOC^{MD}

2.1 LE PROCÉDÉ DE TRAITEMENT DU FPP À LA FERME

L'application du bioséchage pour le traitement du FPP est relativement récente et les informations disponibles dans la littérature sont limitées à des tests de laboratoire avec des unités pilotes à l'échelle réduite [Choi, H.L., 2001]. Conséquemment, l'adaptation de cette technologie est nécessaire en raison de la nature du fumier maintenant produit par des poules pondeuses abritées en logements alternatifs (cages enrichies). L'absence de litière, la déshydratation sur les courroies sous les cages (humidité à la sortie du poulailler entre 55 et 60%) et le faible rapport C/N des fientes solides (souvent inférieur à 10) sont autant de facteurs à considérer qui peuvent limiter les performances d'un procédé de bioséchage.

Le procédé de traitement du FPP à la ferme selon nos hypothèses élaborées au début du projet (Figure 1) repose sur trois étapes pour transformer le FPP en une matière organique de base pour la fabrication des fertilisants:

- Étape 1. Séchage du FPP sur les courroies dans le poulailler jusqu'à une humidité de 55 - 60%;
- Étape 2. Bioséchage du FPP en enceinte fermée pour atteindre une humidité finale de 30 - 35%;
- Étape 3. Séchage thermique direct par convection avec un équipement spécialisé pour atteindre une humidité finale de 15 - 20%.

D'autres opérations de conditionnement peuvent subséquemment être ajoutées en fonction des caractéristiques recherchées du fertilisant à produire et de la variante de commercialisation envisagée comme le broyage, le tamisage ou la granulation.

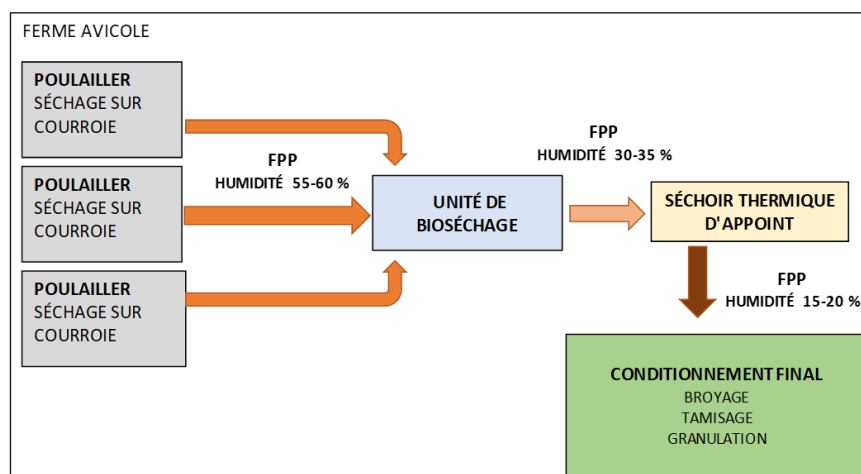


Figure 1. Schéma préliminaire du procédé de traitement du FPP à la ferme

L'application du procédé sur les fermes munies de cages enrichies inclut une première étape de séchage du FPP sur les courroies dans le poulailler. L'humidité du matériel recherchée à l'entrée du bioséchoir est donc gérée par le temps de séjour du FPP sur la courroie, évitant ainsi la nécessité de recourir à l'option de la recirculation d'une partie du matériel bioséché pour abaisser la TEE du matériel entrant et tel que prévu dans le brevet.

L'adaptation du bioséchoir, dans ce contexte, consiste à optimiser le régime de bioséchage du FPP en fonction de ses caractéristiques physiques obtenues à la sortie du poulailler. Pour ce faire les aspects suivants seront pris en compte : régime de ventilation et profil de températures, besoins de chauffage de l'air, ouverture du grillage et caractéristiques du fertilisant à produire.

Dans le contexte du présent projet, l'étape de bioséchage du FPP vise à concilier les objectifs suivants:

- Maximiser la déshydratation du matériel;
- Obtenir des températures thermophiles (55-70° C) dans le bioréacteur afin de respecter les critères d'hygiénisation reconnus (PFRP);
- Préstabiliser la matière organique à un niveau adéquat pour réduire les odeurs, faciliter l'entreposage et la commercialisation du produit.

Si le procédé de bioséchage permet de récupérer la chaleur générée par les microorganismes, il offre également la possibilité d'utiliser l'énergie de l'air provenant du poulailler pour maximiser un séchage thermique du FPP additionnel (facultatif) ou le préchauffage de l'air d'alimentation du bioséchoir.

2.2 L'UNITÉ DE TRAITEMENT BIOLOGIQUE SHOC^{MD}

L'unité de traitement biologique SHOC^{MD} développée par l'IRDA (Figure 2) est une enceinte fermée modulaire dont la capacité varie en fonction du tonnage annuel de la biomasse à traiter (Figure 3).

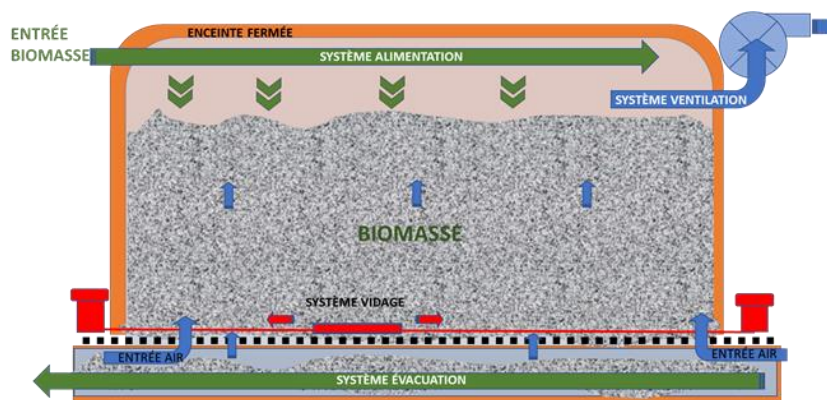


Figure 2. Schéma de principe du bioséchoir SHOC^{MD}

Les matières organiques (conditionnées ou des mélanges confectionnés) à traiter par bioséchage doivent permettre de supporter le développement et la croissance des microorganismes qui transforment, au cours de la phase active thermophile, ces matières fraîches hautement fermentescibles et odorantes en un produit

partiellement stabilisé, désodorisé et déshydraté. Les matières à biosécher sont introduites dans l'unité SHOC^{MD} chaque jour par couches successives. Un système de ventilation assure le passage d'un débit d'air contrôlé qui permet de maintenir des concentrations d'oxygène favorables au développement d'une activité biologique aérobie intense et d'éliminer la quantité d'eau évaporée pendant le traitement. La chaleur dégagée par l'activité microbienne doit permettre d'atteindre rapidement, au sein du substrat, des températures d'hygiénisation (>55 °C) associées à la phase thermophile. Une quantité de matériel partiellement déshydraté, désodorisé et hygiénisé (exempt d'agents pathogènes) est extrait mécaniquement à la base de l'enceinte chaque jour. En mode bioséchage, le temps de séjour du matériel dans le réacteur varie habituellement entre 8 et 12 jours, selon les caractéristiques finales recherchées notamment la stabilité.

Le modèle industriel du bioséchoir SHOC^{MD} est basé sur un concept modulaire qui comprend les composantes suivantes:

- Chambre de traitement isolée thermiquement;
- Système d'alimentation disposé dans la chambre de traitement;
- Système d'extraction motorisé à la base (couteau);
- Système d'évacuation du matériel par convoyeur motorisé;
- Système de ventilation par aspiration de l'air (plenum).

La Figure 3 présente un modèle de base du bioséchoir SHOC^{MD} de l'IRDA d'une capacité de 250 m³ réalisé en 2011 pour le bioséchage de matières résiduelles et fumiers. Cette unité incluait les développements obtenus pendant plus de 15 ans de recherche à l'IRDA en collaboration avec ses partenaires (Industries Fournier et Prométal Plus). Au cours de cette période, des unités pilotes, capables de traiter entre 2 et 25 m³ de matériel par jour, ont été construites.

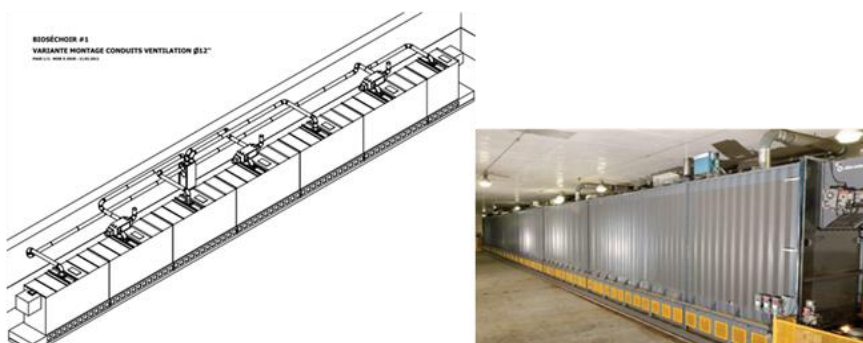


Figure 3. Bioséchoir SHOC^{MD} IRDA, (St-Patrice de Beaurivage, 2011)

Pour le bioséchage du FPP, des adaptations du modèle de base sont à prévoir pour assurer des performances optimales et pour une meilleure intégration du bioséchoir dans la chaîne complète de traitement.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le projet a été réalisé sur une exploitation agricole exploitée par l'entreprise Lévis Œufs située à Lévis. Les récents poulaillers abritant des poules pondeuses sont munis de logements enrichis à la ferme. Tout au cours du projet, une partie du FPP généré a été dévié vers l'unité expérimentale de bioséchage SHOC^{MD} de 5m³ appartenant à l'IRDA.

La chaîne de traitement soumise au dispositif expérimental comprend trois secteurs d'intervention:

- Séchage du FPP sur les courroies dans le poulailler 1 et 2;
- Bioséchage avec l'unité expérimentale SHOC^{MD};
- Séchage thermique post-traitement.

La Figure 4 présente la disposition des poulaillers ainsi que l'entrepôt à fumier (plate-forme à fumier) abritant le bioséchoir et le FPP généré par l'entreprise.

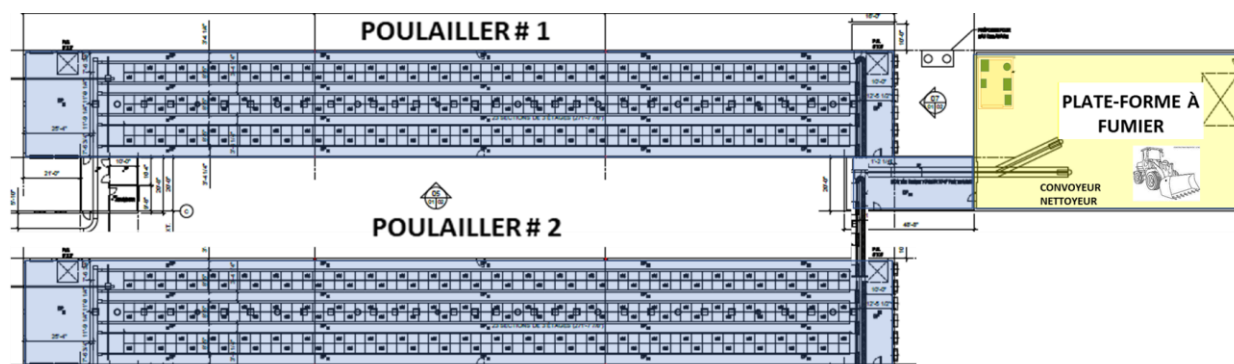


Figure 4. Disposition des poulaillers et de la plate-forme à fumier

Après un temps de séjour variable dans les poulaillers, le FPP récolté par les courroies est acheminé par un convoyeur à raclettes (écureur) vers une plate-forme à fumier couverte (entrepôt). Une partie du fumier (environ 1/3 du volume journalier) alimente le bioséchoir situé dans un local isolé spécialement aménagé dans l'entrepôt (Figure 5). Le fumier bioséché est évacué manuellement à tous les jours à l'aide d'un chariot et entreposé sur la plate-forme couverte (entrepôt).

La Figure 5 présente l'emplacement de la section de traitement biologique (1) abritant le bioséchoir pilote SHOC^{MD} et la section de séchage thermique (2) située dans un local adjacent. Les équipements pour le traitement biologique (unité expérimentale SHOC^{MD}) et le séchage thermique ont été fournis par l'IRDA.

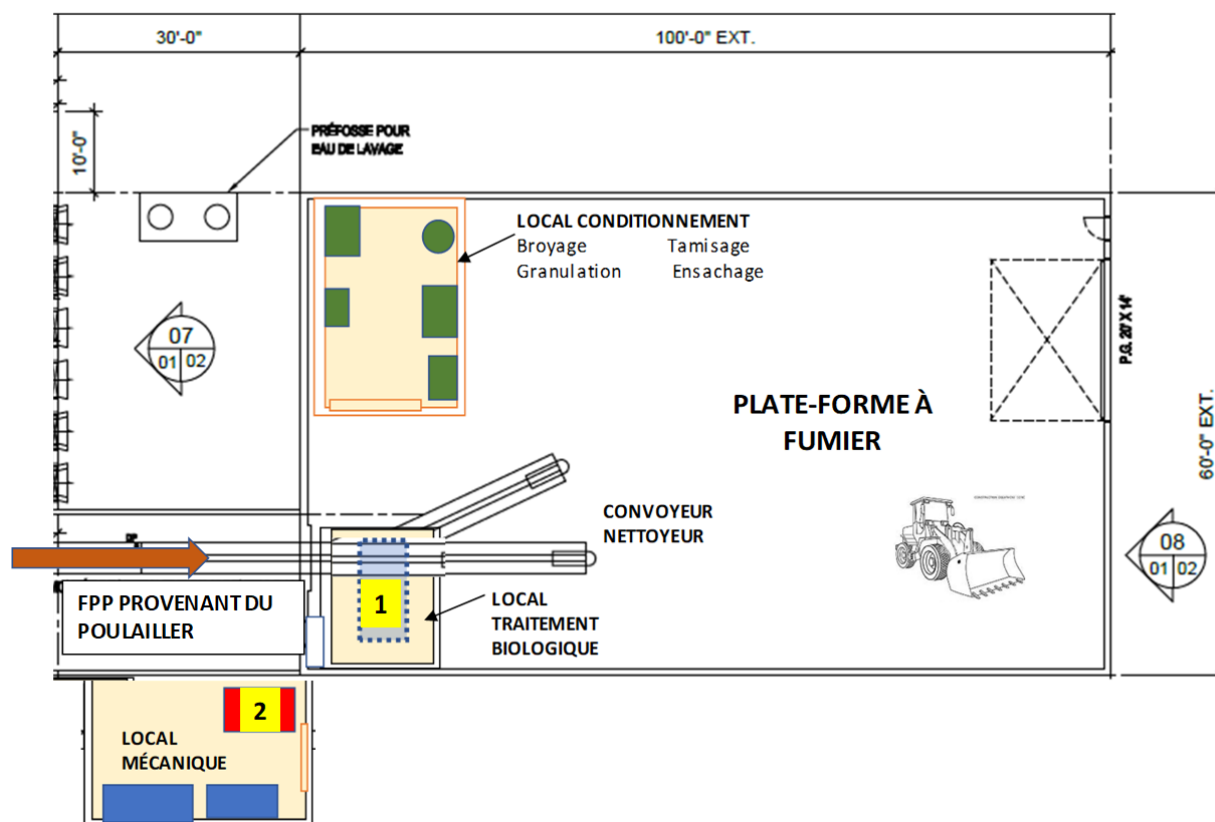


Figure 5. Emplacement des sections de traitement biologique (1) et de séchage thermique (2) à la ferme

3.1.1 Séchage du FPP sur les courroies

L'un des objectifs du projet vise l'identification des paramètres optimaux pour le séchage du FPP sur les courroies du poulailler muni des logements enrichis afin d'obtenir un matériel avec des propriétés favorables pour le traitement de bioséchage. Les infrastructures existantes à la ferme ont été utilisées et comprennent des poulaillers munis de cages disposées sur quatre rangées de cinq étages.

3.1.1.1 Procédure expérimentale

Le suivi du séchage du FPP sur la courroie a été réalisé à l'aide des interventions suivantes :

- La détermination du temps de résidence du FPP sur la courroie;
- Le suivi journalier des températures et de l'humidité de l'air du poulailler;
- L'échantillonnage du FPP à la sortie des courroies pour la mesure de la teneur en eau (TEE);
- La réalisation de trois campagnes d'échantillonnage et analyse du FPP pour l'évaluation de la masse volumique, la TEE et la perméabilité à l'air du fumier.
- La validation des bilans du poulailler (volume total produit par jour, volume total par poule pondeuse)

3.1.1.2 Paramètres suivis

Les variables prises en considération afin d'identifier les paramètres optimaux pour le séchage du FPP sur la courroie ont été :

- Le temps de résidence du FPP sur la courroie (TRC) dans le poulailler (1 à 7 jours);
- La TEE du matériel à la sortie du poulailler (échantillonnage périodique);
- La quantité de FPP évacuée du poulailler;
- Les propriétés physico – chimiques du FPP (échantillonnage et analyses de laboratoire);
- La régie de ventilation du poulailler (température et humidité de l'air).

Le régime de chauffage/ventilation du poulailler est ajusté par un système de commande et de contrôle automatique pour assurer les conditions prévues par les normes de confort thermique dans le bâtiment d'élevage. Le régime de ventilation/chauffage utilisé sous des conditions de production et d'opération habituelles a été maintenu tout au long du projet.

3.1.2 Traitement biologique par bioséchage

Un local isolé (20' x 12' x 12') a été spécialement aménagé à l'automne 2019 pour abriter le bioséchoir et les équipements d'acquisition de données. Ce local permet de contrôler la température ambiante autour du

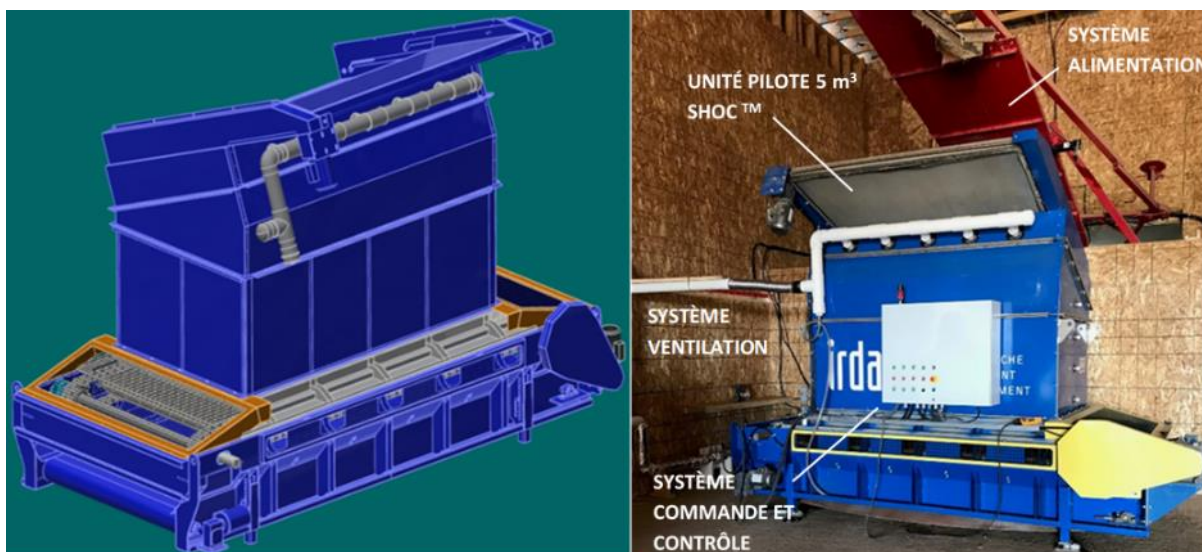


Figure 6. Unité pilote SHOC^{MD}: Conception de l'IRDA et installation de l'unité pilote le banc d'essai installé à la ferme

bioséchoir (Figure 6) et conséquemment celle de l'air de ventilation.

Le banc d'essai comprend:

- Une unité pilote de bioséchage SHOC^{MD} de 5 m³;
- Un système d'alimentation du bioséchoir;
- Un système de ventilation du bioséchoir (ventilateur d'aspiration ajustable);
- Un équipement pour le contrôle des paramètres du procédé et l'acquisition de données.

3.1.3 Caractéristiques de l'unité pilote

En 2018, l'IRDA a conçu et fabriqué une unité pilote de traitement biologique d'une capacité de 5 m³. Cette unité englobe toutes les améliorations apportées au modèle de base développé par l'IRDA.

Les principales caractéristiques de l'unité pilote sont (Figure 7) :

- Dimensions de la chambre de traitement: 96'' de longueur, 49'' de profondeur et 57'' de hauteur;
- Capacité maximale de la chambre de traitement: 5 m³;
- Isolation parois: polystyrène;
- Porte glissante d'alimentation;
- Système de vidange du matériel avec un couteau (simple action);
- Grillage à la base du bioséchoir de mailles variables ;
- Système d'évacuation par convoyeur à bande située à la base du bioséchoir;
- Régime d'alimentation: 300 à 400 kg de FPP/ jour;
- Régime d'évacuation: 200 à 300 kg de FPP bioséché/ jour;
- Circuit d'aération: système de ventilation par aspiration (débits d'air entre 20 et 200 cfm).

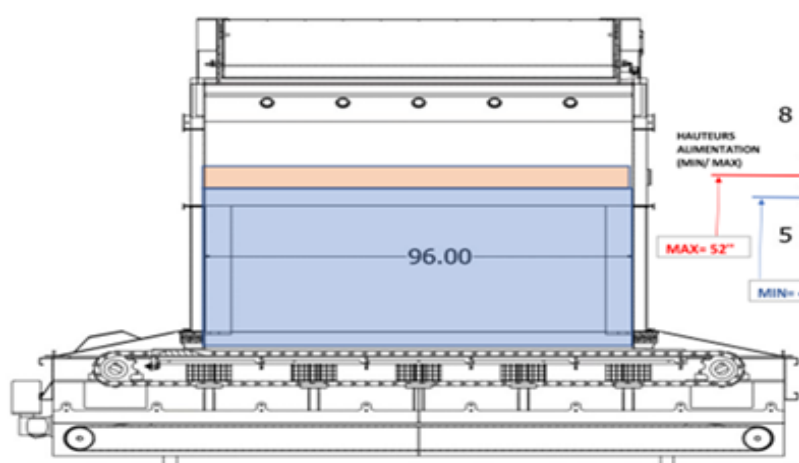


Figure 7. Détails de l'unité pilote SHOC^{MD} 5 m³

3.1.3.1 Procédure expérimentale

Le système d'évacuation du FPP du poulailler a été utilisé pour acheminer le matériel au bioréacteur et effectuer le remplissage quotidien à l'aide d'une ouverture (trappe) réalisée sur le convoyeur et enlignée avec la porte glissante du bioséchoir. À la base du bioséchoir, le FPP bioséché est évacué avec un convoyeur à courroie. Le démarrage du convoyeur d'évacuation, le passage du couteau pour extraire le matériel, l'ouverture et la fermeture de la porte d'alimentation sont réalisés manuellement.

Le temps de résidence dans le bioséchoir correspond à la durée du séjour du matériel dans la chambre de traitement (temps de résidence variant de 7 à 12 jours). Il est estimé en considérant la hauteur du matériel lorsque le bioséchoir est plein et la distance de déplacement du matériel à chaque passage du couteau.

Le bioséchoir est muni de 4 cellules de charge.

3.1.3.2 Paramètres suivis

Au cours des essais de bioséchage avec l'unité pilote, les paramètres suivants ont fait l'objet d'un suivi :

- Hauteur de la matière avant et après remplissage : maintenu entre 1,14 et 1,4 m (45 et 52 po);
- Nombre de coups de couteau et quantité de matière évacuée par coup de couteau;
- Masse de fumier ajoutée/enlevée journalièrement;
- Humidité de la matière entrante;
- Températures du matériel dans la chambre de traitement à diverses hauteurs (4 hauteurs T1, T2, T3, T4);
- Humidité de la matière sortante;
- Débit d'air et réglage de la ventilation;
- Températures et humidité de l'air évacué du bioséchoir;
- Température et humidité de l'air du local isolé.

Des échantillonnages périodiques ont été réalisés afin de caractériser le FPP à l'entrée et à la sortie du bioséchoir.

Les données suivantes ont été compilées quotidiennement pour établir notamment, un bilan de masse journalier (Fiche journalière Résultats SHOC^{MD}): temps de séjour sur courroie, quantité d'eau éliminée (déterminée par variation du poids entre deux périodes consécutives de remplissage/vidage), nombre de coups de couteau et réglage de débit d'air.

3.1.3.3 Commande, contrôle et acquisition de données

- Les paramètres suivants ont été enregistrés lors des essais à l'aide d'un système CR10 qui permet de contrôler, par commandes, certaines actions notamment celles liées au régime de ventilation.
- Les températures du matériel dans la chambre de traitement à quatre hauteurs à l'aide des sondes T1, T2, T3, T4 (Figure 8), la température de l'air et son humidité à la sortie et à l'entrée du bioséchoir;
- Le débit d'air;

- Le poids total du matériel en traitement.

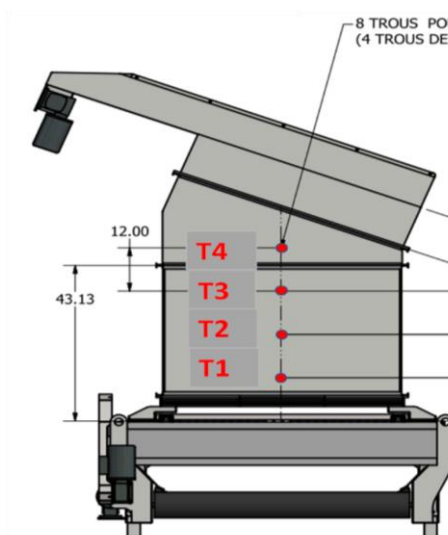


Figure 8. Emplacement des sondes de température du matériel

Les sondes de température, d'humidité relative de l'air, le dispositif de mesurage du débit d'air et les cellules de charge pour mesurage du poids total de l'unité sont interconnectés avec le système d'acquisition de données. Le réglage du débit d'air (ventilation) a été fait en régime constant ou variable et selon diverses variables (températures du matériel, températures de l'air à la sortie du bioséchoir). La transmission de données et le suivi du procédé à distance ont été réalisés avec les applications Teamviewer et Splashtop. Ces outils ont permis la visualisation à distance des paramètres du procédé sur une interface graphique présentant en temps réel, l'évolution du procédé (courbes de température du matériel, débit d'air, température et humidité de l'air, variation de la masse en traitement, température et humidité du local).

3.1.3.4 Traitements comparés

De nombreux essais avec deux grands patrons de ventilation (constant et séquentiel) ont été réalisés pour évaluer l'impact de la ventilation sur le taux de déshydratation et l'atteinte et le maintien de températures thermophiles; deux grands objectifs à concilier par l'optimisation de plusieurs paramètres.

- Essais en régime de ventilation constant stabilisé;
- Essais en régime de ventilation séquentiel.

Essais en régime stabilisé

Avant d'obtenir un régime stabilisé, une période transitoire doit être au préalable respecté pour une durée égale

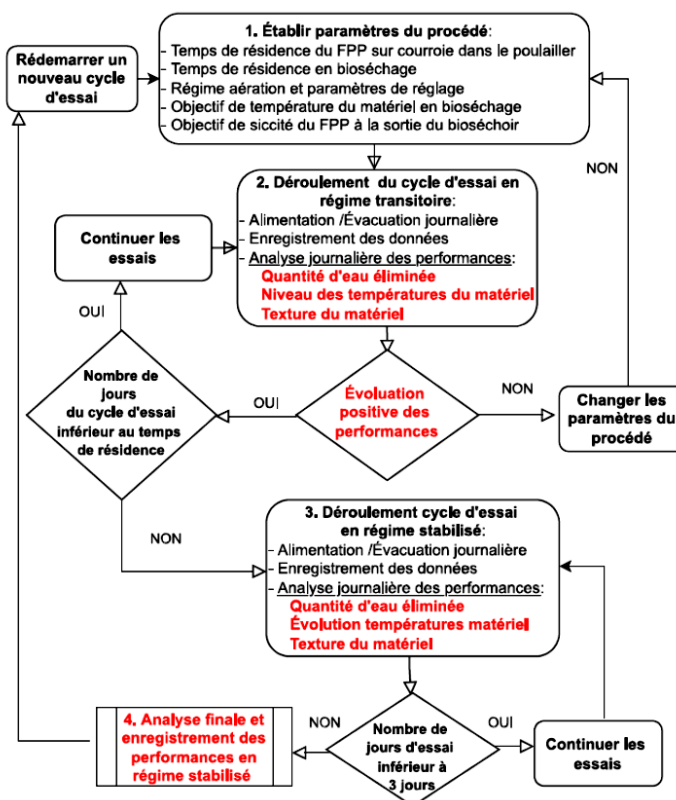


Figure 9. Procédure expérimentale pour la réalisation des essais en régime stabilisé

ou supérieure au temps de résidence de la matière dans le bioséchoir (TRB) et dont les paramètres de base sont constants et identiques à ceux qui seront testés. Cette période permet d'éliminer du bioséchoir le fumier traité pendant l'essai précédent et d'obtenir du matériel correspondant au régime que l'on souhaite étudier (gradient de température et gradient d'humidité dans le matériel situé dans la chambre de traitement du bioséchoir). Après cette période transitoire, le matériel dans le bioséchoir aura les caractéristiques qui définissent le régime stabilisé choisi. La Figure 9 présente la procédure pour la mise en place du régime stabilisé de bioséchage.

Les traitements sont mis en place en appliquant différents temps de résidence du FPP sur courroie dans le poulailler (0-1 à 0-7 jours), pour divers temps de bioséchage (8 à 10 jours) et pour plusieurs régimes d'aération. Au cours des essais la valeur de ces paramètres a été ajustée selon la méthode essai-erreur afin d'atteindre les objectifs établis (taux de déshydratation, températures du matériel).

Essais en régime de ventilation séquentielle

Les essais en régime de ventilation séquentielle reposent sur l'utilisation des régimes de ventilation améliorés qui permettent de maintenir la température dans la zone thermophile dans le bioséchoir (la zone des sondes de température T2 et T3, (Figure 8) à des valeurs supérieures à 55°C. Selon nos hypothèses initiales, une réduction

du débit d'aération du bioséchoir jumelée avec des séquences périodiques de courte durée à fort débit pourrait assurer à la fois le maintien de températures thermophiles dans la masse du fumier en traitement sans diminuer l'efficacité de la déshydratation biologique. Les traitements sont mis en place en appliquant différentes valeurs pour le temps de résidence du FPP sur courroie (TRC) et pour le temps de résidence en bioséchage (TRB). Au cours des essais, la valeur des paramètres liés à la ventilation a été modifiée pour identifier les limites opérationnelles qui permettent d'atteindre les objectifs établis (taux de déshydratation, températures du matériel).

3.1.4 Séchage thermique

Un autre objectif spécifique du projet visait l'identification des solutions et des paramètres optimaux pour la troisième étape de la chaîne de traitement du FPP à la ferme à savoir, le séchage thermique d'appoint. Cette étape doit permettre de compléter la déshydratation du FPP traité dans l'étape précédente de bioséchage dans l'éventualité où des TEE finale faibles sont requises notamment pour la confection de granules; l'humidité du matériel à la sortie du bioséchoir atteignant des valeurs minimales d'environ 30-35 %. Un séchage thermique additionnel réduirait la TEE à des valeurs requises pour la compaction et la fabrication de fragments séchés (granules, boulettes, bouchons). Cette étape permettrait donc de rendre le produit plus stable dans le but de faciliter 1) les opérations finales de conditionnement (broyage, tamisage, granulation) et 2) le stockage et l'ensachage du produit. Un banc d'essai pour le traitement du séchage thermique du FPP a été installé dans un local existant et situé à proximité du bioséchoir.

Le banc d'essai pour le séchage thermique comprenait :

- Une unité de séchage thermique de type séchoir par convection thermique à l'air;
- Un système d'évacuation de l'air du séchoir;
- Des équipements pour le contrôle et le mesurage du débit, de la température et humidité de l'air et de la consommation énergétique;
- Des équipements de mesure et accessoires tels que balance, bacs de stockage.

3.1.4.1 Caractéristiques de l'unité de séchage thermique

L'unité de séchage thermique utilisée est un équipement commercial de marque Harvest Saver Model R5A (Figure 10) produit par Commercial Dehydrator Systems Inc. fourni au projet par l'IRDA. L'équipement est conçu pour répondre aux exigences liées aux applications commerciales (séchage, déshydratation des produits alimentaires: fruits, légumes et viande), mais aussi aux essais de laboratoire pour le séchage de la biomasse.

Ce type de séchoir fait partie des systèmes de séchage direct qui utilisent la recirculation de l'air (Figure 11). La chambre de séchage est munie de tiroirs pour la disposition manuelle du matériel (traitement en «batch»). L'air est recirculé par un ventilateur et chauffé par des éléments électriques. Une partie de l'air humide est évacuée par une sortie d'air vers l'extérieur du bâtiment alors que l'air frais alimente le circuit principal à l'aide d'un clapet d'entrée d'air à réglage manuel.



Figure 10. Unité de séchage thermique HARVEST SAVER 5A avec module de commande et contrôle Honeywell UDC 2500

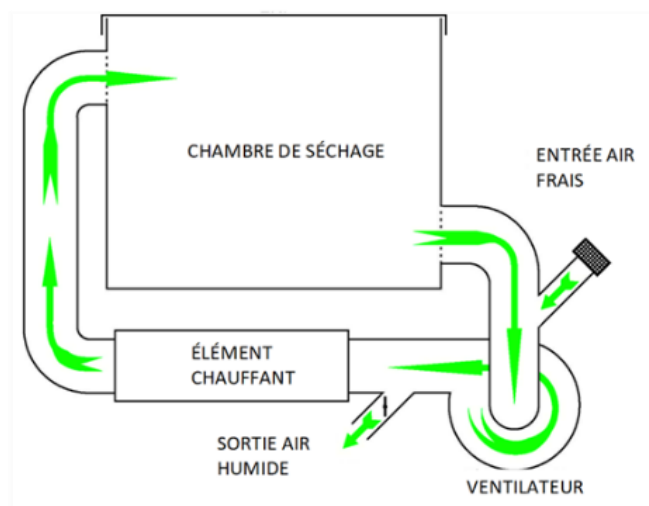


Figure 11. Schéma de principe d'un dispositif de séchage direct à l'air avec recirculation

Caractéristiques du déshydrateur HARVER SAVER 5A

- Dimensions de l'équipement : 60 " H x 60 " L x 33 " l;
- Construction en entier en acier inoxydable avec isolation thermique (double paroi);
- Nombre de tiroirs : 14;

- Superficie de séchage par tiroir : 24'' x 38'';
- Superficie totale de séchage : 88 pi²;
- Température de l'air de séchage : réglable, entre la température de l'air ambiant et 93°C;
- Ventilateur ¾ HP à débit d'air variable (4 vitesses), maximum 325 cfm;
- Puissance maximale électrique en chauffage : 4 600 W;
- Module de contrôle Honeywell UDC 2500 (programmation et contrôle de la température et de l'humidité de l'air et affichage de la température, de l'humidité de l'air et de la durée du cycle de séchage).

3.1.4.2 Procédure expérimentale

Les essais de séchage thermique du FPP ont été réalisés de la façon suivante :

- Échantillonnage du matériel avant le traitement en vue de sa caractérisation par analyses de laboratoire;
- Démarrage du séchoir et réglage des paramètres de séchage :
 - Température de séchage (entre 30 et 60°C);
 - Débit d'air de recirculation maximal de 325 cfm;
 - Débit d'air frais (position clapet d'entrée) : de 30 à 100 cfm.
- Remplissage et pesage de chacun des tiroirs au début de l'essai;
- Pesage des tiroirs pendant l'essai à des intervalles d'une heure et jusqu'à poids constant;
- Échantillonnage du matériel après le traitement en vue des analyses de laboratoire.

3.1.4.3 Paramètres suivis

- Quantité de matériel chargé par tiroir : entre 5 et 7 kg ;
- Quantité initiale totale de matériel: entre 70 et 84 kg ;
- Variation de la masse des tiroirs pendant le séchage;
- Température de séchage;
- Débit d'air total (cfm);
- Débit d'air frais (cfm);
- Durée totale du séchage (h);
- Consommation énergétique (kWh).

Les données enregistrées permettent de tracer des courbes de séchage (variation de l'humidité du matériel en fonction du temps et de la quantité d'eau éliminée) et d'évaluer l'humidité initiale du matériel soumis au séchage. Les bilans de masse et d'énergie de l'étape de séchage thermique seront ensuite élaborés et la qualité du matériel est évaluée à l'aide d'analyses physico-chimiques réalisées sur le matériel échantillonné avant et après l'essai.

4 ACTIVITÉS DU PROJET

Le projet d'adaptation s'est déroulé conformément aux étapes initialement prévues dans la demande. Le Tableau 2 présente les activités de recherche expérimentale réalisées et prévues au projet (activités 1 à 5).

Tableau 2. Activités du projet

ACTIVITÉ 1 Mise en place de l'installation expérimentale	1.1 Installation à la ferme des bancs d'essai pour le traitement du FPP
	1.2 Démarrage, ajustement et adaptation des bancs d'essai pour le traitement de FPP
ACTIVITÉ 2 Analyse expérimentale de la déshydratation du FPP dans le poulailler	2.1 Caractérisation du FPP sur les courroies situées sous les cages dans le poulailler, en fonction du temps de résidence (TRC) et de la régie de ventilation dans le bâtiment d'élevage
ACTIVITÉ 3 Analyse expérimentale du bioséchage du FPP avec l'unité pilote SHOC ^{MD}	3.1 Essais en continu et élaboration de régimes optimaux d'aération du bioséchoir
	3.2 Validation des régimes de remplissage/vidage pour optimiser le temps de résidence en bioséchage (TRB)
	3.3 Caractérisation du matériel sortant du bioséchoir
ACTIVITÉ 4 Analyse expérimentale du séchage thermique du FPP avec le séchoir direct à l'air	4.1 Identification des paramètres optimaux pour l'application du séchage thermique d'appoint afin de réduire davantage l'humidité du FPP sortant du SHOC ^{MD}
ACTIVITÉ 5 Analyse de l'impact de l'adaptation du bioséchage sur l'application du procédé de traitement du FPP à la ferme	5.1 Caractérisation des performances du traitement (séchage sur les courroies/bioséchage/séchage thermique) et estimation des coûts de traitement du FPP par bilans de masse et d'énergie
ACTIVITÉ 6 Activités de transfert des résultats et rédaction du Rapport final	6.1 Atelier de démonstration à la ferme, dédié aux collaborateurs
	6.2 Élaboration de la fiche de transfert, du rapport technique et de la documentation de présentation et diffusion de résultats
	6.3 Atelier virtuel de démonstration à la ferme dédié aux représentants du secteur avicole

La section suivante présente les résultats et les analyses relativement aux activités 1 à 5. L'activité 6 (transfert des résultats) est présentée dans le Rapport final, à la section 5 - Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs.

5 RÉSULTATS ET ANALYSES

5.1 DÉSHYDRATATION DU FPP DANS LE POULAILLER

5.1.1 Mise en place de la procédure expérimentale de suivi du séchage du FPP sur les courroies

L'infrastructure existante pour la gestion du fumier à la ferme a été utilisée pour la réalisation des essais. Sur les courroies d'évacuation du fumier dans le poulailler, on trouve en tout temps du fumier dont le temps de résidence varie entre quelques minutes (frais) et quelques jours. Ainsi, la désignation du fumier «0-2 jours» désigne le fumier récupéré sur la courroie qui a été produit dans l'intervalle 0 (déjections fraîches)- 48 heures. Le temps de résidence des fientes sur la courroie (TRC) avant l'évacuation peut, selon le mode de gestion d'une entreprise, s'étendre sur une période comprise entre 1 et 7 jours en fonction de la stratégie de gestion du fumier adopté.

5.1.2 Analyse de caractérisation du séchage du FPP dans le poulailler

Les caractéristiques du FPP sous les cages, dans le poulailler #2, ont été réalisées entre mai 2020 et janvier 2022, comme suit:

- Échantillonnage et analyses périodiques du matériel pour la détermination de la TEE; 71 échantillons au total ont été analysés au laboratoire de l'IRDA;
- Échantillonnage et analyses périodiques à la ferme par le producteur; environ 50 échantillons ont été mesuré pour la TEE avec un appareil (Coster);
- Campagnes d'échantillonnage réalisées le pour déterminer la TEE en fonction du TRC, évaluer la quantité de FPP produite (kg/jour), la masse volumique et la perméabilité à l'air du fumier prélevé sur les courroies.

5.1.2.1 L'humidité du FPP sur la courroie

La teneur en eau du FPP en fonction du TRC est présentée au Tableau 3. Les valeurs sont calculées à partir des résultats des analyses des échantillons du FPP prélevés sur les courroies du poulailler #2 (valeurs moyennes mensuelles). L'humidité du FPP frais (0 jour) est de 76% et diminue progressivement en fonction du temps de résidence (TRC) séjour jusqu'à environ 40% pour un TRC de 0 -7 jours. Les valeurs moyennes des TEE pour des TRC de 0 à 7 jours sont respectivement de 0-1j (61%), 0-2j (58%), 0-3j (50%), 0-4j (44%), 0-5j (49%), 0-6j (43%) et 0-7j (40%).

Tableau 3. Suivi de l'humidité du FPP sur la courroie dans le poulailler #2

Échantillonnage			Temps de résidence sur courroie (TRC), jours							
Mois	Nombre d'échantillons analysés		0 j	0-1 j	0-2 j	0-3 j	0-4 j	0-5 j	0-6 j	0-7 j
			TEE du FPP, %							
2020	mai	2		57,9	54,7					
	juin	8	75,8	66,1	60,3	55,9	48,3	49,2	42,6	39,7
	juillet									
	août	1					44,7			
	septembre	3			57,9	51,3				
	octobre	4				53,7				
	novembre	7		60,7	49,0	45,3				
	décembre	6		59,3						
2021	janvier	2		58,3						
	février	1		62,4						
	mars	3		60,7	51,1					
	avril	4			49,4					
	mai	4			51,1					
	juin	4		61,8	55,1	50,1	39,7			
	juillet	2			46,8					
	août	1			62,3					
	septembre									
	octobre	1			49,6					
	novembre	8			52,4					
	décembre	2			51,6					
2022	janvier	8			59,7	46,4	43,5			

La Figure 12 présente le suivi de la TEE pour quatre valeurs du TRC comprises entre 0-1 jour et 0-4 jours et correspondent aux fumiers analysés pendant les essais de bioséchage. Les saisons influencent la teneur en eau des fientes prélevées sur la courroie dans le poulailler en raison des caractéristiques de l'air dans le poulailler. D'autres facteurs tel le régime d'alimentation et la quantité d'eau consommée par les poules, ont également un impact significatif sur la TEE des fientes générées. Le suivi des paramètres de l'air du poulailler présentés à la Figure 13 a été réalisé à partir des données fournies par la ferme Lévis Œufs selon les enregistrements effectués pendant l'exploitation du système de commande et contrôle du régime de ventilation-chauffage de la ferme.

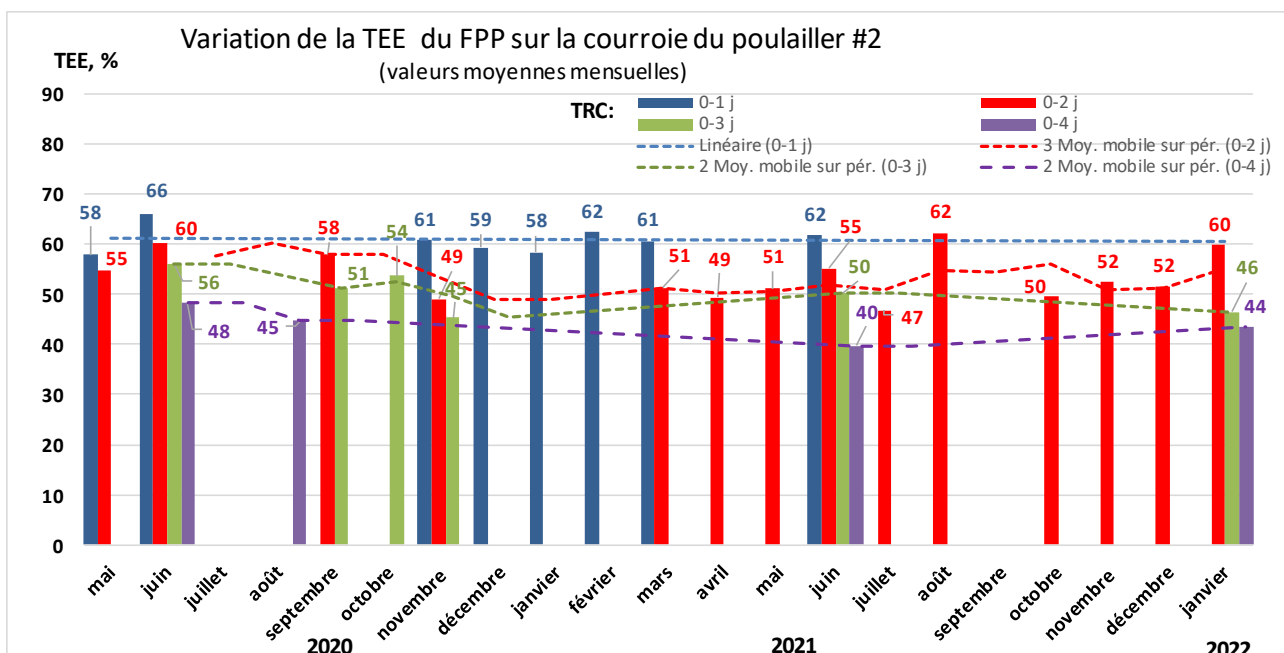


Figure 12. Déshydratation du FPP en fonction du temps de résidence sur la courroie

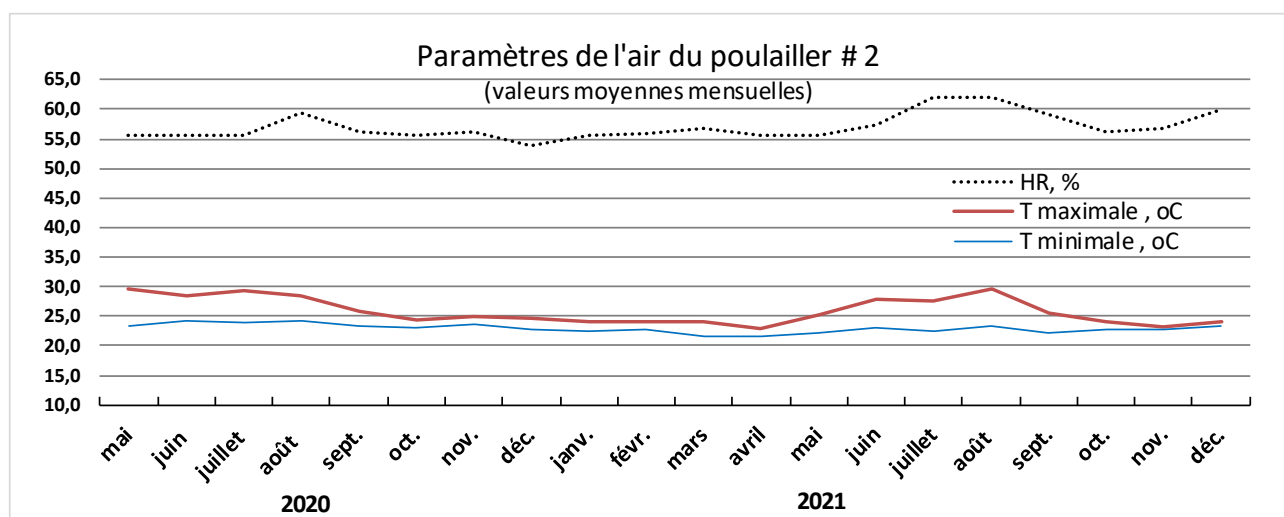


Figure 13. Suivi des paramètres de l'air dans le poulailler # 2 pendant les essais

La Figure 14 présente les valeurs moyennes de la TEE du fumier obtenues lors des campagnes de caractérisation du FPP sur la courroie en fonction du TRC.

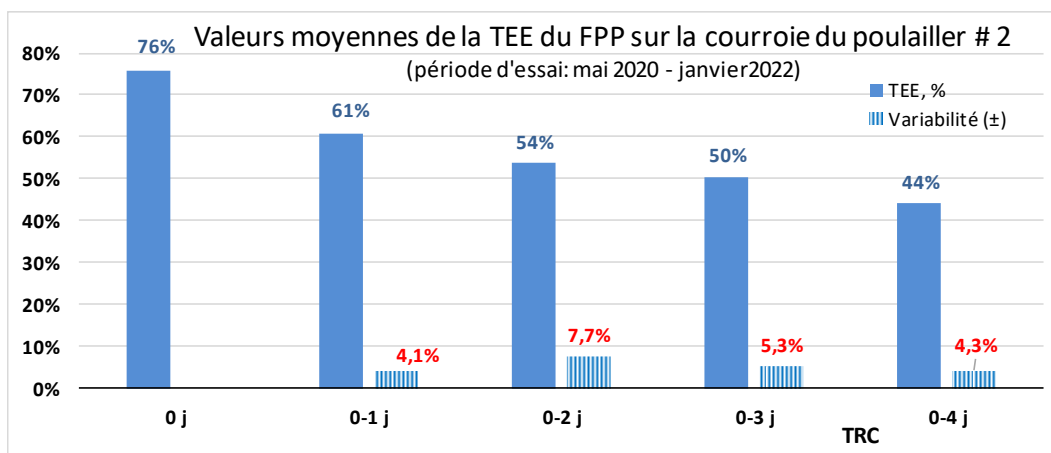


Figure 14. Valeurs de référence de l'humidité du FPP sur la courroie

En termes d'humidité et de consistance, il est envisageable de procéder au bioséchage des fientes de poules (sans ajout de structurant) avec le procédé SHOC^{MD} pour du fumier dont le temps de résidence sur la courroie varierait entre 1 jour et 3 jours alors que les TEE correspondantes varient entre 60 et 50 %. L'intérêt de biosécher du matériel dont la TEE initiale est inférieure à 50% est questionnable bien que techniquement faisable.

5.1.2.2 Perméabilité à l'air du FPP à la sortie du poulailler

Le Tableau 4 présente la masse volumique, la perméabilité à l'air et l'effet de compaction des FPP prélevés sur la courroie en fonction du temps de résidence.

Tableau 4. Caractéristiques du FPP sur la courroie dans le poulailler #2

Essai	Temps de résidence sur courroie, TRC	Humidité	État du matériel	Masse volumique	Perméabilité à l'air k	Compaction* (V ini-V fin) / V ini
				kg/m ³	μm ²	
1	0-7	40%	non compacté	426	24 973	11%
2	JOURS		compacté	481	9 665	
3	0-6	43%	non compacté	430	21 919	15%
4	JOURS		compacté	515	8 776	
5	0-5	49%	non compacté	457	22 429	15%
6	JOURS		compacté	545	6 694	
7	0-4	48%	non compacté	461	30 686	15%
8	JOURS		compacté	552	10 969	
9	0-3	56%	non compacté	542	15 824	18%
10	JOURS		compacté	671	3 064	
11	0-2	60%	non compacté	583	13 097	25%
12	JOURS		compacté	795	877	
13	0-1	66%	non compacté	775	1 967	20%
14	JOUR		compacté	987	155	

V ini Volume initial échantillon

V fin Volume final échantillon

* Compaction: si supérieure à 20%, il résulte une réduction importante de la perméabilité à l'air pour une hauteur du matériel H > 6 pi

La perméabilité à l'air du FPP est un paramètre physique essentiel qui permet d'évaluer la compatibilité du matériel pour le traitement par bioséchage sans brassage avec ventilation forcée dans une enceinte close. Ce paramètre définit la facilité de passage de l'air à travers le matériel en traitement dans la chambre du bioséchoir. Le coefficient de perméabilité à l'air k (μm²) a été évalué avec un dispositif de laboratoire développé par l'IRDA et mis à contribution pour la réalisation du projet. Selon notre expérience, des matériaux avec une faible perméabilité à l'air (inférieure à 5 000 μm²) engendrent une perte de charge importante pendant le passage du flux d'air. L'ajout d'agents structurants peut être requis pour des substrats dont la valeur de perméabilité est inférieure à 3 000 μm².

Les essais ont été réalisés sur du FPP compacté et FPP non compacté. Le FPP compacté reproduit les conditions du matériel soumis à la pression du matériel dans la chambre de traitement. Les analyses montrent que les valeurs de perméabilité sont adéquates pour du fumier dont le TRC est de 0-2 et 0-3 jours. Pour le FPP 0-1 jour (TEE= 60-65%, et μm²= 2 000), le bioséchage est envisageable avec une approche comme le SHOC^{MD} et ce, en raison de l'absence de brassage.

Un taux de compaction supérieure à 20% limite habituellement le passage de l'air dans la masse et conséquemment, l'aération optimale du matériel. Pour éviter ce phénomène et préserver un passage de l'air qui favorise une aération uniforme et efficace, la hauteur du matériel dans le bioréacteur ne devrait pas excéder 1,5m (60 po.) et environ 50 po. (1,3m) lorsque les fientes ont une TEE d'environ 65%. La manipulation des fientes humides, incluant le brasage mécanique, doit être évitée en raison de sa consistance «plastique».

5.1.2.3 Bilan de masse à la sortie du poulailler

Le bilan massique réalisé a permis d'établir les quantités de fumier produites par poule pondeuse (Tableau 5) pour la variante de gestion du fumier avec un TRC de 0-3 jours dans le poulailler #2. Ces informations ont été utilisées pour la réalisation des bilans massiques et le dimensionnement d'unités de bioséchage pour des poulaillers de capacités variant entre 10 000 et 80 000 poules.

Tableau 5. Bilan de masse du poulailler # 2 (TRC de 0-3 jours)

Paramètre			NOMBRE DE POULES:				
			10 000	20 000	40 000	60 000	80 000
Tests IRDA et Lévis Oeufs 16.10.2020	Masse/poule-jour	g	36,54				
	Humidité (TEE)	%	54				
	Masse volumique	kg/m ³	500				
	Volume /poule-jour	ml	73,08				
Bilan annuel	Volume total/an	m ³	263	526	1 052	1 579	2 105
	Masse totale/an	tonnes	132	263	526	789	1052

5.2 BIOSÉCHAGE DU FPP

5.2.1 Mise en place de l'installation expérimentale de séchage biologique

Les étapes suivantes ont été réalisées pour l'installation et le démarrage du banc d'essai de bioséchage :

- Configuration et réglage des dispositifs d'alimentation et d'évacuation du bioséchoir, du système de ventilation et de contrôle du débit d'air du bioséchoir, du système de pesées du bioséchoir, des dispositifs de mesurage des températures;
- Configuration des circuits d'évacuation de l'air du bioséchoir et du système de drainage (eau condensée à la sortie du bioséchoir);
- Mise à niveau et validation du système d'acquisition de données, enregistrement et transfert à distance des données et mise en place du système d'enregistrement en continu des paramètres du procédé;
- Validation et mise en place de la procédure d'essais pour les divers régimes de bioséchage);
- Transfert des connaissances au producteur pour l'application des procédures de réalisation des essais et le suivi quotidien du procédé;
- Démarrage des essais de bioséchage (mai - juin 2020).

5.2.2 Déroulement des essais et analyse préliminaire

Les essais de bioséchage se sont déroulés sur une période de 20 mois avec l'unité pilote SHOC^{MD} de 5 m³ de capacité quotidiennement alimentée avec du FPP. Des données sur les divers paramètres du bioséchoir ont été enregistrées entre janvier 2020 et mars 2022. La hauteur du matériel dans le bioréacteur a été ajustée à 137 cm (54po.) de hauteur après le remplissage, ce qui se traduit par un volume de matériel dans le SHOC^{MD} de 4 m³ (96 po.L X 48 po.l X 54 po.H). Une première analyse présente *le bilan de masse global* des essais en mettant en évidence, les quantités de FPP traitées et les performances du séchage biologique. Un bilan massique préliminaire

a été dressé à partir des enregistrements journaliers. Ce bilan repose sur la variation quotidienne de la masse du matériel en bioséchage, mesurée directement par pesage, entre l'étape de remplissage et l'étape suivante de vidange de fumier. La dégradation biologique de la masse (environ 1% de la matière sèche dégradée par jour) n'a pas été prise en considération dans les calculs, mais cet aspect a été considéré durant l'étape d'analyse de caractérisation qui suit (point 5.3.2 du rapport). La variation journalière de la masse traitée a donc permis d'évaluer la quantité d'eau éliminée par jour.

Le Tableau 6 résume la première étape expérimentale d'adaptation du traitement de bioséchage réalisée entre mai 2020 et mars 2021. Pendant les 334 jours d'essais, un total de 113,2 tonnes de FPP provenant du poulailler # 2 ont été traitées produisant ainsi 78,1 tonnes de FPP bioséché et 34,6 tonnes d'eau éliminée. La quantité moyenne d'eau éliminée représente 31 % de la masse de FPP traitée. Les moyennes journalières représentent 339 kg de FPP traités, 234 kg de fumier bioséché et 104 kg d'eau éliminée. Au cours des essais, le remplacement des poules pondeuses du poulailler # 2 a eu lieu en mars 2020.

Le Tableau 7 présente les résultats de la deuxième période d'essais qui s'est déroulée entre avril 2020 et décembre 2021. Au cours de cette période de 270 jours, 75,7 tonnes de FPP provenant du poulailler # 2 ont été traitées et 52,4 tonnes de fumier bioséché ont été ainsi obtenues, ce qui représente 23,8 tonnes d'eau éliminée. La quantité moyenne d'eau éliminée représente 31,4 % de la masse de FPP traitée. Les moyennes journalières sont : 281 kg de FPP traité, 194 kg de fumier bioséché et une quantité d'eau éliminée de 88 kg.

Le Tableau 8 résume le bilan des deux étapes réalisées : pendant les 604 jours d'essais, 188,9 tonnes de FPP ont été traitées (313 kg/ jour), 130,6 tonnes de fumier bioséché ont été produites (216 kg/ jour) et une quantité de 58,4 tonnes d'eau a été éliminée (97 kg/ jour).

Tableau 6. Bilan de masse global du traitement de bioséchage (étape 1 : mai 2020 - mars 2021)

Année	Mois (2020-2021)	Nombre total jours essais	Quantité FPP traitée (entrée SHOC)		Quantité FPP bioséché obtenue		Quantité d'eau éliminée		
			kg	kg/ jrs*	kg	kg/ jrs*	kg	kg/ jr*	kg eau /kg FPP traité
2020	MAI	31	9 632	311	6 475	209	2 888	93	30,0%
	JUIN	30	9 250	308	5 517	184	3 619	121	39,1%
	JUILLET	31	11 429	369	6 050	195	5 425	175	47,5%
	AOÛT	31	10 508	339	7 798	252	3 036	98	28,9%
	SEPTEMBRE	30	8 707	290	5 833	194	2 618	87	30,1%
	OCTOBRE	31	11 793	380	9 335	301	2 661	86	22,6%
	NOVEMBRE	30	10 611	354	8 605	287	2 186	73	20,6%
	DÉCEMBRE	31	11 365	367	7 631	246	2 917	94	25,7%
2021	JANVIER	30	11 014	367	7 485	250	3 446	115	31,3%
	FÉVRIER	28	9 234	330	6 410	229	3 063	109	33,2%
	MARS	31	9 619	310	7 004	226	2 778	90	28,9%
Moyenne (kg/ mois)			10 287		7 104		3 149		
Bilan période		334	113 162	339	78 143	234	34 637	104	30,6%

* moyenne journalière

Tableau 7. Bilan de masse global du traitement de bioséchage (étape 2: avril- décembre 2022)

Année	Mois (2021)	Nombre total jours essais	Quantité FPP traitée (entrée SHOC)		Quantité FPP bioséché obtenue		Quantité d'eau éliminée		
			kg	kg/ jrs*	kg	kg/ jrs*	kg	kg/ jr*	kg eau /kg FPP traité
2022	AVRIL	30	11 448	382	8 983	299	2 786	93	24,3%
	MAI	26	7 028	270	4 791	184	2 147	83	30,6%
	JUIN	30	8 629	288	6 037	201	2 608	87	30,2%
	JUILLET	31	8 775	283	5 608	181	3 031	98	34,5%
	AOÛT	31	8 855	286	6 173	199	2 909	94	32,8%
	SEPTEMBRE	30	8 097	270	5 058	169	2 740	91	33,8%
	OCTOBRE	31	7 942	256	5 600	181	2 735	88	34,4%
	NOVEMBRE	30	7 864	262	5 251	175	2 496	83	31,7%
	DÉCEMBRE	31	7 087	229	4 939	159	2 339	75	33,0%
Moyenne (kg/ mois)			8 414		5 826		2 644		
Bilan période		270	75 727	281	52 438	194	23 792	88	31,4%

* moyenne journalière

Tableau 8. Bilan de masse global pour la période d'essais 2020-2022

Bilan 2020-2022 (20 mois)	Nombre total jours essais	Quantité FPP traitée (entrée SHOC)		Quantité FPP bioséché obtenue		Quantité d'eau éliminée		
		kg	kg/ jrs*	kg	kg/ jrs*	kg	kg/ jr*	kg eau /kg FPP traité
	604	188 889	313	130 581	216	58 428	97	30,9%
Moyenne (kg/ mois)		9 444		6 529		2 921		

Les résultats obtenus et présentés aux figures 1, 2, 3, et 4 de l'annexe A permettent de visualiser les bilans de masse des deux étapes d'essai.

L'analyse des données présentées au tableau 10 permet de conclure que le bioséchage du FPP assure un taux de déshydratation important avec l'unité expérimentale SHOC^{MD}. Cette réduction d'humidité du matériel peut dépasser 50% de la quantité d'eau initiale du FPP entrant. La teneur en eau du FPP 0-1 et 0-2 jours passe généralement de 60 à 40 % pour un temps de séjour de 9 jours ce qui correspond à une perte d'humidité d'environ 20 point de % soit un taux de réduction habituellement obtenu avec le procédé.

L'unité expérimentale de bioséchage permet d'estimer les capacités suivantes pour chaque m³ de volume utile du bioséchoir :

- Le traitement de plus de 60 kg de FPP/ jour;
- La production de 400 kg de FPP bioséché/ jour;
- L'élimination d'environ 20 kg d'eau/ jour.

5.2.3 Analyse de caractérisation du traitement de bioséchage

Le traitement par bioséchage du FPP a été réalisé en appliquant deux grands modes de ventilation et conséquemment, par la réalisation de deux grandes catégories d'essais appliquées au cours des 20 mois de suivi.

- Essais en régime de ventilation constante selon la procédure détaillée au point 3.1.2.5 et réalisés au de la première période d'essais à l'été 2020, Traitements comparés (section 3 - Matériel et méthodes);
- Essais en régime de ventilation alternée pour favoriser l'hygiénisation biologique avec des températures supérieures à 55 °C dans la zone thermophile du bioséchoir.

Au cours des 20 mois d'essais, il a été constaté que :

- Une ventilation continue trop importante refroidie la masse dans le réacteur;
- Une température de l'air à l'entrée du bioséchoir de 20 °C ou plus est requise pour faciliter l'atteindre des T° d'hygiénisation dans la masse;
- La zone thermophile peut se déplacer dans l'ensemble du profil et selon l'humidité du matériel notamment;
- La déshydratation maximale du matériel et l'atteinte de températures d'hygiénisation de 55 °C ne sont pas des objectifs compatibles et l'adoption d'un mode opératoire de ventilation adéquat dépendra des objectifs à atteindre.

5.2.3.1 Essais en régimes de ventilation variés (R1S1 à R1S15)

Le Tableau 9 présente les 15 essais de bioséchage qui ont été réalisés entre juin 2020 et avril 2021 afin d'identifier les paramètres optimaux pour un taux de déshydratation maximal du FPP par séchage biologique. Chacun de ces régimes a été précédé par des régimes transitoires.

Les variables prises en considération pour la réalisation les régimes de ventilation au cours de la période sont :

- Temps de résidence du FPP sur la courroie (TRC)
 - 0-1 jour, 7 essais
 - 0-2 jours, 1 essai
 - 0-3 jours, 5 essais
 - 0-4 jours, 2 essais
- Temps de résidence en bioséchage (TRB)
 - 10 jours, 6 essais
 - 9 jours, 2 essais
 - 8 jours, 4 essais
 - 7 jours, 1 essai
 - 6 jours, 1 essai
 - 5 jours. 1 essai
- Ventilation
 - Constante : de 40 à 110 CFM soit l'équivalent de 10 à 27 CFM/m3 de matériel à biosécher
 - Automatisée : Ajustement de la ventilation en fonction de la température en T4
 - Alternée : de 62 000 à 77 000 CFM/24 heures soit l'équivalent de 10 à 13 CFM/m3 de matériel à biosécher

Tableau 9. Régimes de ventilation stable pour le bioséchage du FPP

Déroulement régime d'essai			Temps de résidence du FPP sur courroie (TRC)	Temps de résidence du FPP en bioséchage (TRB)	Régime de ventilation	Nombre de passages du couteau
Code	Régime transitoire	Régime stabilisé	jours	jours	Débit/réglage	
R1S1	6 -19 juin 2020	20 juin 2020	0-1 jr	10	90 cfm	4
R1S2	24 juin-3 juillet 2020	4-5-6 juillet 2020	0-1 jr	10	100 cfm	3
R1S3	9-23 juillet 2020	24-25-26 juillet 2020	0-1 jr	10	110 cfm	3
R1S4	1-10 août 2020	11-12-13 août 2020	0-4 jrs	10	110 cfm	3
R1S5	16-23 août 2020	24-25-26 août 2020	0-4 jrs	8	50-150cfm	4
R1S6	17-26 sept. 2020	27-28-29 sept. 2020	0-3 jrs	7	Ajustement automatique 25/50/100 cfm en fonction de la température T4	4
R1S7	1-11 oct. 2020	12-13-14 oct. 2020	0-3 jrs	8	Ajustement automatique 25/40/60 cfm en fonction de la température T4	4
R1S8	18-27 oct. 2020	28-29-30 oct. 2020	0-3 jrs	6	40cfm/50min-100cfm/10min	6
R1S9	1-8 nov. 2020	9-10-11 nov. 2020	0-3 jrs	5	40cfm/16min-100cfm/4min	6
R1S10	17-24 nov. 2020	26 nov. 2020	0-3 jrs	8	40 cfm	3
R1S11	9-19 déc. 2020	20-21-23 déc. 2020	0-1 jr	10	40cfm/16min-80cfm/4min	4
R1S12	30 déc. 2020-8 janv. 2021	9-10-11 janv. 2021	0-1 jr	10	10h:40cfm/56min-100cfm/4min 16h:40cfm/16min-100cfm/4min	4
R1S13	17-25janv 2021	26 janvier	0-1 jr	9	10h:40cfm/56min-100cfm/4min 14h:40cfm/16min-100cfm/4min	4
R1S14	13-25 février 2021	28 février 2021	0-1 jr	9	10h:40cfm/56min-120cfm/4min 14h:40cfm/15min-100cfm/5min	4
R1S15	1 -9 avril 2021	10-avr-22	0-2 jrs	8	10h:40cfm/56min-40cfm/4min 16h:40cfm/16min-60cfm/4min	4

Le nombre de passages du couteau, appliqué pour évacuer quotidiennement une quantité de FPP, a varié de 3 à 6 passages par jour afin de maintenir constant le niveau de matériel dans le bioséchoir et de respecter le temps de résidence choisi.

- Régime de ventilation du bioséchoir :

- Débit d'air réglé manuellement, 1 niveau constant (de 40 à 110 cfm), 5 essais;
- Débit d'air réglé manuellement, 2 niveaux (50/150 cfm), 1 essai;
- Débits d'air ajustés automatiquement en fonction de la température du matériel (T4), 3 niveaux (25/50/100 cfm et 25/40/60 cfm), 2 essais;
- Régime d'aération programmés : faible débit/longue durée + haut débit/courte durée, 7 essais.

Un nombre de trois répétitions (trois jours successifs d'essai en régime de ventilation stable) a été appliqué, sauf pour les régimes d'essai R1S1, R1S10, R1S13, R1S14, R1S15 qui ont été suivi pendant seulement 1 journée.

Le Tableau 10 présente les performances obtenues pour 15 scénarios de bioséchage du FPP.

Tableau 10. Analyse des performances en régime de ventilation stable pour le bioséchage du FPP

Régime stabilisé	Évaluation des objectifs de déshydratation par séchage biologique									Évaluation des objectifs d'hygiénisation thermophile		
	Valeurs moyennes en régime stabilisé											
	Quantité de FPP ajoutée, M in	Quantité de FPP bioséché obtenue, M out	Variation de la masse de FPP dans le SHOC, DM= M in - M out	Masse dégradée biologiquement (1% de ms dégradée par jour), Mdb	Quantité d'eau éliminée, Me = DM-Mdb	Humidité du FPP à l'entrée*, TEE in	Humidité du FPP à la sortie*, TEE out	Taux de déshydratation biologique, TDb= Me/(M in x TEE in)	Réduction relative de l'humidité, D%= TEE in- TEE out	Température de l'air à la sortie du bioséchoir, Tas	Température du matériel dans la zone thermophile T3	Température du matériel dans la zone thermophile T4
	kg/jour	kg/ jour	kg/ jour	kg/ jour	kg/ jour	%	%	%	%	°C	°C	°C
R1S1	319,6	217,6	147,9	10,9	137,0	66%	39%	65%	27%	34	42	46
R1S2	387,6	198,9	139,4	13,2	126,2	66%	33%	49%	33%	31	35	41
R1S3	287,3	148,5	159,8	9,8	150,0	66%	36%	79%	30%	34	38	39
R1S4	356,4	246,5	110,5	18,5	92,0	48%	35%	54%	13%	31	37	41
R1S5	330,9	241,4	110,5	13,8	96,7	48%	35%	61%	13%	32	34	39
R1S6	339,4	238,6	92,4	11,1	81,3	53%	44%	45%	9%	40	45	48
R1S7	311,7	263,5	75,9	11,7	64,3	53%	42%	39%	12%	33	49	52
R1S8	423,9	354,7	78,2	11,9	66,3	53%	34%	29%	19%	30	40	42
R1S9	472,0	354,2	77,1	13,2	63,9	44%	32%	31%	12%	30	37	41
R1S10	323,0	246,5	64,6	13,7	50,9	47%	34%	34%	13%	32	35	42
R1S11	373,4	238,0	104,3	14,5	89,8	61%	36%	39%	25%	34	51	54
R1S12	340,0	239,1	102,0	13,5	88,5	60%	35%	43%	25%	34	48	52
R1S13	360,4	241,4	117,3	12,2	105,1	62%	42%	47%	21%	33	54	58
R1S14	350,2	232,9	119,0	12,3	106,7	61%	40%	50%	21%	33	40	48
R1S15	493,0	370,6	107,1	19,3	87,8	51%	40%	35%	11%	36	45	46
* par échantillonnage et analyse de laboratoire												

À partir des résultats de performance du bioséchoir pour divers régimes de ventilation, les constats généraux suivants sont dégagés :

- l'unité de bioséchage de 5 m³ utilisée a permis d'enlever d'importantes quantités d'eau qui, pour certains régimes stables, dépassent les 100 kg/jour (régimes R1S1, R1S2, R1S3, R1S13 et R1S14). La quantité d'eau éliminée varie de 10 à 30 kg eau/jour et par m³ de FPP introduit dans le bioséchoir;
- la TEE à l'entrée du bioséchoir a varié entre 65% (0-1j) et 45% (0-3j) et entre 40 et 30% à la sortie du bioséchoir (TEE inférieure ou égale à 35% pour six régimes (R1S2, R1S4, R1S8, R1S9, R1S10, R1S12), malgré les valeurs assez élevées de la TEE à l'entrée du bioséchoir.
- la TEE à la sortie du bioséchoir n'est pas suffisamment basse pour empêcher l'activité microbienne de se poursuivre; le matériel bioséché mis en amas continu de chauffer.

Deux indicateurs ont été retenus pour l'analyse des performances de déshydratation par séchage biologique en régime stabilisé :

- **Taux de déshydratation biologique (TDb)** (le rapport entre la quantité d'eau éliminée pendant le traitement et la quantité initiale d'eau contenue par le FPP);
- **Réduction relative de l'humidité (D)** (la différence entre les valeurs de pourcentage de l'humidité du FPP à l'entrée et à la sortie du bioséchoir).

La Figure 15 présente les performances de déshydratation par bioséchage en régime de ventilation stable. Le taux de déshydratation biologique (TDb, %) s'avère particulièrement intéressant pour évaluer la performance d'un régime de ventilation. Il est supérieur à 50% pour les régimes R1S1, R1S2, R1S3, R1S4, R1S5 et R1S14. Selon cet indicateur, la quantité d'eau éliminée par bioséchage peut représenter, pour des régimes performants, entre 50% et 79% de la quantité d'eau initiale d'eau contenue dans le fumier. La réduction relative de l'humidité pour 7 essais est supérieure à 20% (R1S1, R1S2, R1S3, R1S11, R1S12, R1S13 et R1S14). Pour tous ces essais, l'humidité du matériel à la sortie du bioséchoir a été réduite entre 20 et 33 points de pourcentage par rapport à l'humidité du FPP à l'entrée du bioséchoir.

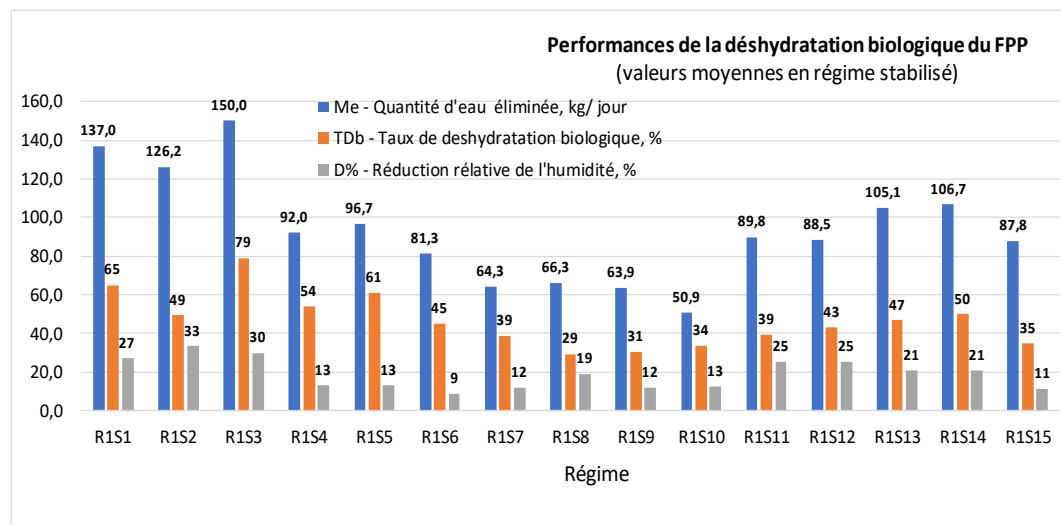


Figure 15. Performances de la déshydratation par bioséchage du FPP en régime stabilisé

La Figure 16 montre les valeurs moyennes de température obtenues pour quelques régimes de bioséchage étudiés.

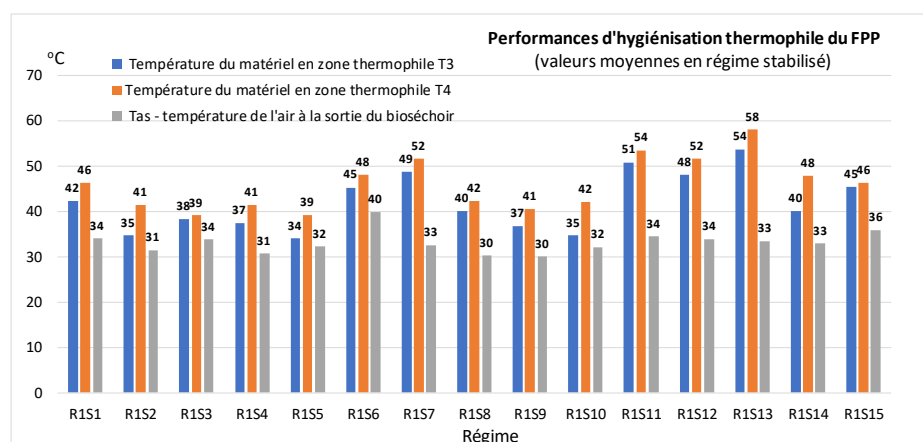


Figure 16. Performances d'hygiénisation par bioséchage du FPP en régime de ventilation stable

Les températures dans la zone thermophile du matériel dans le bioséchoir (thermocouples T3 et T4) sont des indicateurs de performance des processus et d'hygiénisation du matériel. Le seuil de températures visé lors des essais est celui prescrit par le PFRP (Process to Further Reduce Pathogens) et qui stipule qu'une température >55°C doit être maintenue pendant trois jours consécutifs dans la masse pour réduire significativement la présence de pathogènes dans la masse. Toutefois, si l'hygiénisation du fumier dépend notamment des températures atteintes et du temps d'exposition, il importe de souligner que les compétitions microbiennes dans la masse participent également à la réduction des microorganismes pathogènes. Étant donné la complexité associée aux conditions et mécanismes associés à l'hygiénisation du FPP par bioséchage, il n'a pas été possible de faire les analyses microbiologiques requises en cours de projet pour faire la démonstration de la performance d'hygiénisation du procédé de bioséchage SHOC^{MD}; des recherches plus spécifiques seront nécessaires avec un bioséchoir et sous des conditions en régime établi et stable.

Les courbes de températures présentées à l'annexe A2 ainsi que celles enregistrées au cours des deux années de suivi indiquent que le matériel a un fort potentiel d'autoéchauffement et qu'il est relativement facile d'atteindre le critère du PFRP pour plusieurs scénarios de ventilation. L'évolution des températures pendant les essais stabilisés est présentée en détail dans les figures 5 à 19 de l'annexe A. Ces graphiques présentent, pour chacun des régimes étudiés, la variation des températures suivantes:

- Température de la salle (température de l'air à l'entrée du bioséchoir). À partir du 14 septembre 2020, un dispositif de chauffage a été installé pour assurer le maintien d'une température de 20 °C dans la salle;
- Température de l'air à la sortie du bioséchoir dans le but d'établir une corrélation entre cette température, l'efficacité du séchage biologique et le régime de ventilation.
- Températures du matériel pour 4 thermocouples disposés dans le profil de la masse: T1, T2, T3, et T4.

Les résultats indiquent qu'il y a bien généralement un gradient de température du matériel qui s'établit dans la chambre de traitement du bioséchoir sous un régime de ventilation associé aux objectifs de bioséchage: les plus hautes températures étant dans la zone supérieure de la chambre (T4). La T° du matériel frais entrant dans le bioséchoir augmente rapidement après l'alimentation et diminuent graduellement dans les zones T2 et T1. Bien que la zone la plus chaude habituellement observée dans le bioséchoir se situe dans le premier tier supérieur de la masse, elle s'est déplacée occasionnellement du haut vers le bas au cours des essais.

Les «chutes» drastiques des T° jusqu'à la valeur de 20°C correspondent au retrait des sondes à l'extérieur du bioséchoir avant le passage du couteau pour l'évacuation quotidienne du matériel.

La température de l'air à la sortie du bioséchoir a varié entre 30 et 40°C. Ce paramètre constitue actuellement un excellent indicateur du bon déroulement des processus sur lequel pourrait s'appuyer une automatisation de la ventilation.

La ventilation alternée permet d'obtenir de bonnes performances de déshydratation tout en maintenant des températures hygiénisantes et en évitant la condensation dans le plénum et ce, avec une ventilation quotidienne totale moindre qu'en régime de ventilation constant.

Étant donné la complexité associée à la démonstration de l'hygiénisation de la matière organique par bioséchage (présence de pathogènes dans le matériel entrant, temps d'exposition aux températures pour l'ensemble de la masse, contamination croisée en milieu non stérile) des recherches plus spécifiques sont nécessaires pour valider les observations découlant du présent projet concernant l'hygiénisation du FPP avec le procédé SHOC^{MD}.

5.2.3.2 Essais en régime de ventilation alternée optimisé

Les résultats associés aux premiers essais en régime stabilisé ont indiqué que des régimes de ventilation constants supérieurs à 60 CFM (équivalents à 15 CFM/m³) n'ont pas permis de maintenir des To supérieures à 55°C à long terme dans la masse et ce, pour se conformer aux exigences du critère PFRP. L'hypothèse suivante avait donc été émise : Afin de maintenir des températures d'hygiénisation, une réduction du débit d'air qui devrait se traduire par une augmentation des températures du matériel dans le bioséchoir et une réduction de la quantité d'eau éliminée doit être compensée par des périodes courtes de forte ventilation. Cette hypothèse a été préalablement vérifiée en appliquant quelques modes de ventilation alternée. La deuxième série d'essais a donc été réalisée dans le but d'optimiser le mode de ventilation alternée.

Des essais en régime de ventilation alterné ont été développés et appliqués entre avril et décembre 2021.

Ventilation

- 1 mode de ventilation constante : 40 CFM soit l'équivalent de 10 CFM/m³ de matériel à biosécher
- 16 modes de ventilation alternée: de 47 000 à 72 000 CFM/24 heures soit l'équivalent de 8 à 12 CFM/m³ de matériel à biosécher

Le FPP utilisé pour ces essais provenait d'un TRC de 0-2 jours et le temps de résidence en bioséchage (TRB) a varié entre 7 et 11 jours.

La stratégie de traitement en régime de ventilation alternée repose sur l'utilisation de débits d'air constants de base faibles (inférieurs à 40 CFM) en combinaison avec de hauts débits d'air séquentiels. Les régimes de ventilation alternée ont été contrôlés par un automate programmable. Le Tableau 11 décrit les principaux régimes de ventilation alternée devant permettre une hygiénisation thermophile qui ont été développés et mis à l'essai.

Les passages du couteau ont été réalisés une fois par jour pour les premiers 5 essais. Par la suite, les passages ont été réalisés à deux moments différents, en avant-midi et en après-midi (1+1), tel que précisé au tableau 11. Le Tableau 12 présente les performances obtenues pour 15 scénarios de bioséchage du FPP.

À partir des résultats de performance du bioséchoir en régime de ventilation alterné, les constats suivants sont dégagés :

- l'unité de bioséchage de 5 m³ utilisée a permis d'enlever d'importantes quantités d'eau qui, pour un régime alterné, dépasse les 100 kg/jour (régimes RH 12). La quantité d'eau éliminée varie de 13 à 22 kg eau/jour et par m³ de FPP introduit dans le bioséchoir; ces quantités sont toutefois moindres que celles obtenues lors de la première série d'essais.
- À l'exception des régimes RH1 et RH4, l'humidité du FPP à la sortie du bioséchoir a été inférieure à 35% pour du FPP (TRC 0-2j) à des TEE à l'entrée comprises entre 60 et 50%.

Tableau 11. Régimes de ventilation alternée par bioséchage du FPP

Déroulement régime d'essai			Temps de résidence du FPP en bioséchage (TRB)	Régime de ventilation	Nombre de passages du couteau
Code	Période	Durée	jours	Débit/réglage	
RH1	11-20 avril 2021	10 jours	7	40 cfm	4
RH2	21-25 avril 2021	5 jours	12	9h-14 h: 30cfm 14h-9 h: 48cfm	2
RH3	26-30 avril 2021	5 jours	10	9h-14 h: 30cfm 14h-9 h: 30cfm/16 min, 48cfm/4 min	2
RH4	1-5 mai 2021	5 jours	12	9h-14 h: 30cfm 14h-9 h: 30cfm/16 min, 39cfm/4 min	2
RH5	6-12 mai 2021	7 jours	11	9 h-14h: 30cfm/59 min, 100cfm/1 min 14h-9 h: 30cfm/14 min, 100cfm/1 min	2
RH6	19-29 mai 2021	11 jours	9	7h-15h: 30cfm/19 min, 100cfm/1 min 15h-7 h: 30cfm/19 min, 100cfm/1 min	1+1
RH7	17- 28 juin 2021	12 jours	8	7h-14h: 30cfm/14 min, 120cfm/1 min 14h-7 h: 30cfm/14 min, 120cfm/1 min	1+1
RH8	29 juin-12 juillet 2021	14 jours	10	7h-14h: 30cfm/9 min, 120cfm/1 min 14h-7 h: 30cfm/9 min, 120cfm/1 min	1+1
RH9	13-20 juillet 2021	8 jours	9	7h-14h: 30cfm/14 min, 120cfm/1 min 14h-7 h: 30cfm/14 min, 120cfm/1 min	1+1
RH10	21-25 juillet 2021	5 jours	9	7h-14h: 30cfm/14 min, 170cfm/1 min 14h-7 h: 30cfm/14 min, 170cfm/1 min	1+1
RH11	6-13 août	8 jours	9	7h-14h: 30cfm/14 min, 170cfm/1 min 14h-7 h: 30cfm/14 min, 170cfm/1 min	1+1
RH12	14-21 août	8 jours	9	7h-14h: 36cfm/14 min, 170cfm/1 min 14h-7 h: 36cfm/14 min, 170cfm/1 min	1+1
RH13	26 sept- 2 oct. 2021	7 jours	9	7h-14h: 40cfm/14 min, 120cfm/1 min 14h-7 h: 40cfm/14 min, 120cfm/1 min	1+1
RH14	9-21oct	13 jours	8	7h-14h: 45cfm/14 min, 120cfm/1 min 14h-7 h: 45cfm/14 min, 120cfm/1 min	1+1
RH15	27 oct- 5 nov.	10 jours	8	7h-14h: 40cfm/14 min, 130cfm/1 min 14h-7 h: 40cfm/14 min, 130cfm/1 min	1+1
RH16	13-22 nov.	10 jours	8	9h-14h: 36cfm/14 min, 130cfm/1 min 14h-9 h: 36cfm/14 min, 130cfm/1 min	1+1
RH17	2-11 déc. 2021	10 jours	8	9h-14h: 33cfm/14 min, 130cfm/1 min 14h-9 h: 36cfm/14 min, 130cfm/1 min	1+1
TRC= 0-2 jours					

Sur la base des résultats présentés au Tableau 12, on constate que les températures moyennes atteintes ont été plus élevées qu'en régime de ventilation stable. En plus d'obtenir une efficacité plus élevée pour le maintien de températures d'hygiénisation du matériel, les performances de déshydratation du FPP ont été supérieures aux régimes stables testés et ce, pour des ventilations quotidiennes moyennes de variant de 50 à 70 000 CFM/j soit un équivalent de 13 à 18 CFM/m³.

Tableau 12. Analyse des performances en régime de ventilation alterné par bioséchage du FPP

Évaluation des objectifs de déshydratation par séchage biologique										Évaluation des objectifs d'hygiénisation thermophile			
Régime	Valeurs moyennes en régime d'hygiénisation												
	Quantité de FPP ajoutée, (M in)	Quantité de FPP bioséché obtenue, (M out)	Variation de la masse de FPP dans le SHOC, DM= M in-M out	Masse dégradée biologiquement (1% de ms dégradée par jour), Mdb	Quantité d'eau éliminée, Me = DM-Mdb	Humidité du FPP à l'entrée*, TEE in	Humidité du FPP à la sortie*, TEE out	Taux de déshydratation biologique, TDb= Me/(M in x TEE in)	Réduction relative de l'humidité, D%= TEE in - TEE out	Température de l'air à la sortie du bioséchoir, Tas	Température du matériel dans la zone thermophile T3	Température du matériel dans la zone thermophile T4	Effet d'hygiénisation thermophile
	kg/jour	kg/ jour	kg/ jour	kg/ jour	kg/ jour	%	%	%	%	°C	°C	°C	
RH1	347,3	93,2	12,3	12,3	80,9	59%	40%	32%	19%	33	45	46	Faible
RH2	187,9	97,8	13,5	13,5	84,3	59%	32%	52%	27%	32	45	47	Faible
RH3	168,6	85,0	10,6	10,6	74,4	59%	32%	49%	27%	38	36	45	Faible
RH4	182,9	83,3	13,5	13,5	69,8	58%	35%	44%	24%	36	42	49	Faible
RH5	151,3	77,7	10,1	10,1	67,6	58%	33%	52%	26%	35	39	46	Faible
RH6	201,1	85,6	13,1	13,1	72,6	52%	28%	46%	24%	36	54	53	Moyen
RH7	206,8	96,3	11,9	11,9	84,5	55%	27%	46%	28%	39	58	58	Très fort
RH8	175,2	94,1	11,7	11,7	82,4	53%	39%	59%	15%	38	53	56	Moyen
RH9	193,8	106,7	13,8	13,8	92,9	51%	29%	58%	22%	42	54	57	Fort
RH10	191,8	111,5	13,3	13,3	98,2	51%	29%	63%	22%	42	62	63	Très fort
RH11	182,1	105,0	11,7	11,7	93,2	52%	27%	65%	25%	41	58	62	Très fort
RH12	209,5	123,5	13,3	13,3	110,2	56%	31%	59%	24%	41	61	61	Très fort
RH13	157,6	100,1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	38	61	61	Très fort
RH14	182,4	96,2	10,4	10,4	85,8	55%	31%	55%	23%	34	48	54	Moyen
RH15	183,6	75,7	9,7	9,7	66,0	53%	29%	49%	24%	32	45	55	Moyen
RH16	169,8	79,7	9,6	9,6	70,2	55%	32%	48%	23%	33	46	53	Moyen
RH17	165,8	83,5	10,4	10,4	73,1	52%	32%	52%	20%	34	56	59	Très fort

La Figure 17 présente les performances de déshydratation par bioséchage en régime de ventilation alterné. Les quantités d'eau enlevée sont supérieures à 80 kg/jour pour 9 essais (RH1, RH2, RH7, RH8, RH9, RH10, RH11 et RH12, RH14) et sont supérieures à 90 kg/jour pour les scénarios RH9, RH10, RH11 et RH12. L'humidité du FPP à la sortie du bioséchoir est inférieure à 32% pour 12 essais (RH2, RH3, RH6, RH7, RH9, RH10, RH11 et RH12, RH14, RH15, RH16, RH17). Les plus faibles TEE du FPP à la sortie du bioséchoir sont comprises entre 27 et 30% et correspondent à des taux de ventilation compris entre 52 000 et 56 000 CFM/j soit 9-10 CFM/m³).

Le taux de déshydratation biologique (TDb, %) dépasse 50% pour 9 régimes mis à l'essai (RH2, RH5, RH8, RH9, RH10, RH11, RH12, RH14 et RH17). Selon cet indicateur, la quantité d'eau éliminée par bioséchage peut

représenter, pour des régimes performants, entre 50% et 65% de la quantité d'eau initiale contenue dans le FPP. La réduction relative de l'humidité est supérieure à 20 points de % pour 14 essais (RH2, RH3, RH4, RH5, RH6, RH7, RH9, RH10, RH11, RH12, RH14, RH15, RH16, RH17). Les plus importantes réductions de points de pourcentage ont atteint 27 et 28 respectivement sous les régimes RH3 (8 CFM/m³) et RH7 (9 CFM/m³). Les plus importantes quantités d'eau éliminées par jour sont associées aux régimes RH10 et RH12 correspondant à 10 et 11 CFM/m³.

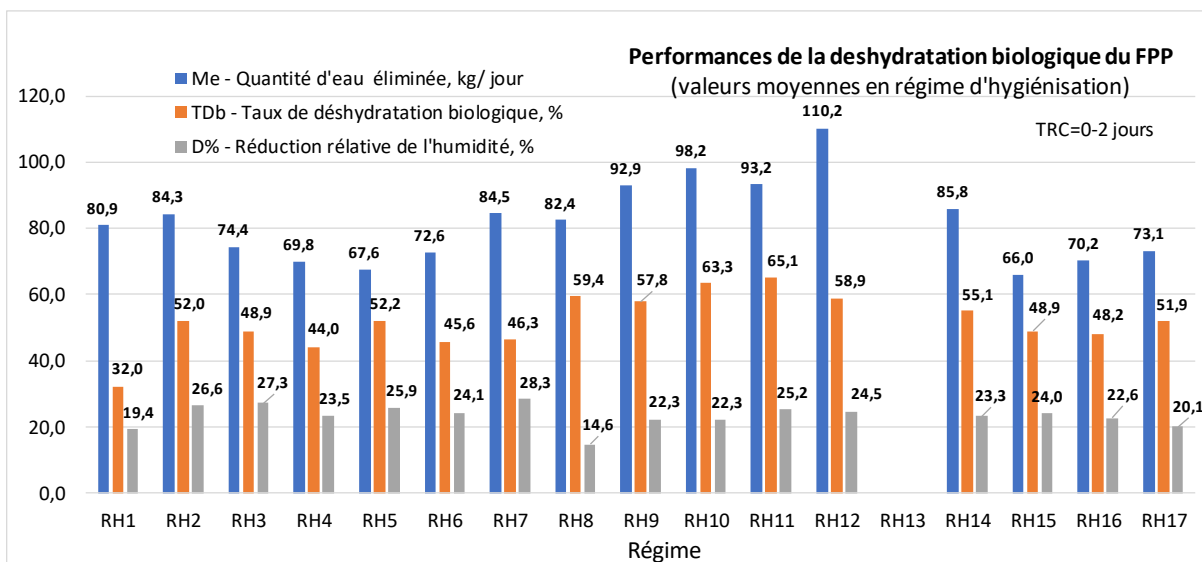


Figure 17. Performances de la déshydratation par bioséchage du FPP en régime de ventilation alterné

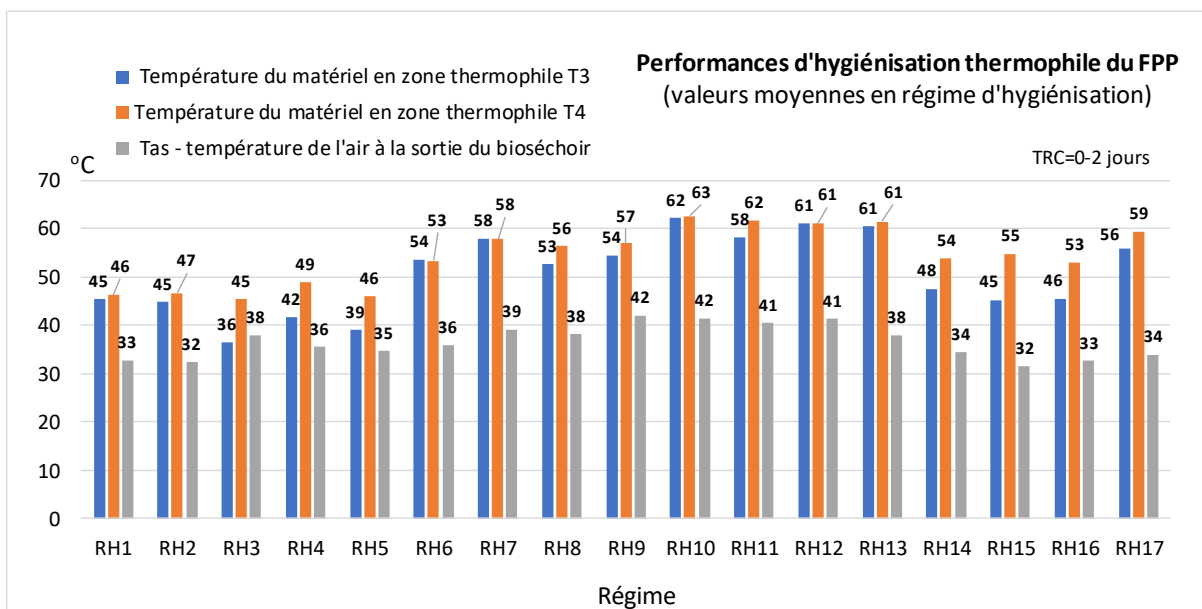


Figure 18. Températures par bioséchage du FPP en régime de ventilation alternée

Le Tableau 12 et la Figure 18 montrent l'atteinte de températures moyennes d'hygiénisation thermophile ($\geq 55^{\circ}\text{C}$) pour 6 régimes de ventilation alternés (RH7, RH10, RH11, RH12, RH13, RH17). La température de l'air à la sortie du bioséchoir a varié entre 32 et 42°C comparativement à 30-40°C pour les régimes de ventilation stables.

Les conclusions générales suivantes peuvent être dégagées :

Les meilleures performances de déshydratation ont été obtenues avec des régimes de ventilation constante équivalent à 22-27 CFM/m³ (130 000 et 160 000 CFM/j). Les régimes d'aération alternée optimisés ont également produit de bonnes performances de déshydratation tout en atteignant des températures d'hygiénisation pour des conditions équivalentes à 8-11 CFM/m³ (48 000-65 000 CFM/j).

5.2.4 Caractéristiques du FPP à l'entrée et la sortie du bioséchoir

Les performances du traitement réalisées avec le bioréacteur SHOC^{MD} concernant non seulement la déshydratation du matériel, mais impacte aussi l'évolution des propriétés physico-chimiques et biologiques du FPP et conséquemment, les caractéristiques finales du produit.

Deux activités ont été consacrées aux analyses de caractérisation du FPP à l'entrée et la sortie du bioséchoir :

- Échantillonnages périodiques du FPP et analyses de laboratoire pour déterminer les paramètres biochimiques du FPP frais et bioséché;
- Réalisation d'une étude de caractérisation détaillée des divers paramètres biochimiques et des ratios du FPP.

5.2.4.1 Analyses de laboratoire pour la caractérisation du FPP

Le Tableau 13 présente les caractéristiques du FPP frais à l'entrée du bioséchoir (échantillonnage du 29 juin 2021 réalisé par le personnel de la ferme Lévis œufs). Les résultats sont présentés sur une base de matière humide.

Tableau 13. Analyses de laboratoire du FPP à l'entrée et à la sortie du bioséchoir (I)

Méthode	Paramètre	Matériel analysé		VP - F		Méthode	Paramètre	Matériel analysé		VP - F			
		Identification client		FumAvShoc				Identification client		SortieShoc			
		No Laboratoire		Réf.	FU-0089214			No Laboratoire		Réf.	FU-0089215		
AEL-I-FUM-010	Matière sèche	M.S	(%)	30.0	42.5	AEL-I-FUM-010	Matière sèche	M.S	(%)	30.0	65.9		
AEL-I-FUM-010	Matière organique	M.O	(%)	20.5	32.6	AEL-I-FUM-010	Matière organique	M.O	(%)	20.5	44.2		
AEL-I-FUM-012	Densité	D	(t/m3)	0.8	0.502	C	AEL-I-FUM-012	Densité	D	(t/m3)	0.8	0.394	C
Calcul	Rapport C/N	C/N		6.0	5.8	Calcul	Rapport C/N	C/N		6.0	4.6		
AEL-I-FUM-014	Azote total	N total	(kg/t)	17.1	28.3	AEL-I-FUM-014	Azote total	N total	(kg/t)	17.1	47.7		
AEL-I-FUM-013	Azote ammoniacal	N-NH ₄	(kg/t)	11.5	2.64	AEL-I-FUM-013	Azote ammoniacal	N-NH ₄	(kg/t)	11.5	2.62		
AEL-I-FUM-013	Azote nitrate	N-NO ₃	(ppm)			AEL-I-FUM-013	Azote nitrate	N-NO ₃	(ppm)				
AEL-I-EQP-028	Phosphore	P ₂ O ₅	(kg/t)	17.5	15.9	AEL-I-EQP-028	Phosphore	P ₂ O ₅	(kg/t)	17.5	22.2		
	Potassium	K ₂ O	(kg/t)	9.6	11.0		Potassium	K ₂ O	(kg/t)	9.6	19.5		
	Calcium	Ca	(kg/t)	26.0	18.2		Calcium	Ca	(kg/t)	26.0	58.1		
	Magnésium	Mg	(kg/t)	1.5	2.4		Magnésium	Mg	(kg/t)	1.5	3.7		
	Cuivre	Cu	(ppm)	16	25		Cuivre	Cu	(ppm)	16	37		
	Manganèse	Mn	(ppm)	100	186		Manganèse	Mn	(ppm)	100	365		
	Zinc	Zn	(ppm)	120	250		Zinc	Zn	(ppm)	120	363		
	Fer	Fe	(ppm)		446		Fer	Fe	(ppm)		556		
	Sodium	Na	(ppm)		1589		Sodium	Na	(ppm)		2523		
	Aluminium	Al	(ppm)		229		Aluminium	Al	(ppm)		356		
	Conductivité		(ms/cm)				Conductivité		(ms/cm)				
AEL-I-FUM-007	Acidité	pH			6.1	AEL-I-FUM-007	Acidité	pH			7.5		
				FumAvShoc						SortieShoc			
C / N				5.8		C / N				4.6			
NH ₄ / N total				9.3		NH ₄ / N total				5.5			
Niveau de minéralisation				Forte minéralisation		Niveau de minéralisation				Forte minéralisation			
Disponibilité de l'azote				Elevée à très élevée		Disponibilité de l'azote				Elevée à très élevée			
N potentiellement disponible				kg/t		N potentiellement disponible				kg/t		21.6	

Après 9-10 jours de temps de résidence dans le bioséchoir, la TEE du fumier à la sortie est de 34% et les valeurs N,P,K (bh) demeurent élevées, favorisant ainsi la production d'un fertilisant de qualité.

Le Tableau 14 présente les caractéristiques du FPP frais à l'entrée et à la sortie du bioséchoir (échantillonnage du 9 février 2022 réalisé par le personnel de l'IRDA). Les résultats sont présentés sur une base de matière sèche et humide.

Tableau 14. Caractéristiques du FPP à l'entrée et à la sortie du bioséchoir

Matériel		SHOC IN	SHOC OUT		% de perte ou de gain p/r à l'intrant
date échantillonnage		09/02/2022	09/02/2022		
Identification		220209-03	220209-02		
Notes					
Matière sèche	%	56,6	65,7		
Teneur en eau	%	43,4	34,3		
pH eau		7,47	8,16	↑	9
NTK	mg/kg b.h.	38171	43889	↑	15
NTK	mg/kg b.s.	67440	66802	↓	-1
N-NH4	mg/kg b.h.	1782	2312	↑	30
N-NH4	mg/kg b.s.	3148	3519	↑	12
P	mg/kg b.h.	7312	8796	↑	20
P	mg/kg b.s.	12919	13388	↑	4
P2O5	% b.h.	1,7	2,0	↑	20
P2O5	% b.s.	3,0	3,1	↑	4
K	mg/kg b.h.	11233	13877	↑	24
K	mg/kg b.s.	19846	21122	↑	6
K2O	%b.h.	1,4	1,7	↑	24
K2O	%b.s.	2,4	2,6	↑	6
Ca	mg/kg b.h.	59429	64269	↑	8
Ca	mg/kg b.s.	104998	97822	↓	-7
Mg	mg/kg b.h.	2562	3130	↑	22
Mg	mg/kg b.s.	4527	4764	↑	5
MO	% b.s.	66,6	63,6	↓	-5
MO	% b.h.	37,7	41,8	↑	11
CO	% b.s.	33,3	31,8	↓	-5
CO	% b.h.	18,8	20,9	↑	11
Cendres	% b.s.	33,4	36,4	↑	9
Cendres	% b.h.	18,9	23,9	↑	27
C/N		4,9	4,8		
Cu	mg/kg b.h.	34,2	38,2	↑	12
Cu	mg/kg b.s.	60	58	↑	-4
Zn	mg/kg b.h.	292	333	↑	14
Zn	mg/kg b.s.	516	507		-2
Cond élect.	mS/cm	9,84	10,03	↑	2
Respirométrie	mgO2/kgSV-h	6740	5570	↓	-17
E. coli	UFC/g sec	>1 300 000	44	↓	
Salmonelle	10g. Humide	ABS	ABS	---	

Comme les échantillons entrants et sortants ont été prélevés la même journée, il ne s'agit pas du même matériel analysé. On peut toutefois poser comme hypothèse que les caractéristiques du FPP entrant dans le bioséchoir, dont le temps de résidence sur la courroie était de 0-3 jours, était les mêmes sur une période de 9 jours puisqu'aucun changement significatif a été apportés dans le poulailler.

Sur la base des analyses, les constats suivants peuvent être faits pour un TRC de 0-3 j et un temps de résidence dans le bioséchoir (TRB) de 9 jours:

- La perte en azote total n'est pas importante et représente environ 1% sur une base de matière sèche;
- La perte en matière organique totale est de 11%, ce qui représente une perte d'environ 1% par jour de rétention;
- La concentration en phosphore et en potassium est respectivement de 4 et de 6% de la matière sèche;
- La concentration en Ca est très élevée dans le fumier frais et bioséché.
- La valeur fertilisante du produit en NTK, P_2O_5 et K_2O correspond à 6,6-2,0-1,7 en % de la matière humide;
- La stabilité exprimée par un indice de respirométrie a légèrement augmenté, mais le FPP bioséché demeure instable;
- La teneur en E. coli diminue de façon très importante avec une valeur à la sortie de 44 UFC/g sec confirmant ainsi le caractère hygiénisant du procédé lorsque les températures thermophiles sont atteintes.

La Figure 19 présente une autre analyse de pathogènes effectuée (méthodes MIC-161-7014F pour Salmonelle et MIC-161-7013F pour E. coli) sur un échantillon de FPP prélevé en juin 2021 par le personnel de la ferme pendant les essais de bioséchage en régime de ventilation alternée à 8,8 CFM/m³. Les résultats démontrent et confirme l'effet d'hygiénisation obtenu pendant l'application de ce régime pour l'échantillonnage du FPP sur du matériel humide collé sur le couteau (2 200 UFC/g sec).



Figure 19. Analyse de laboratoire concernant les pathogènes pour un régime d'hygiénisation (RH7) par bioséchage du FPP

5.2.4.2 Étude de caractérisation en détail des paramètres biochimiques et des ratios du FPP

Une étude financée par le partenaire du projet, le groupe AMICO, intitulée «Caractérisation du fumier de poules frais et bioséché avec le procédé SHOC^{MD}» a été réalisée par l'IRDA (Landry et coll., 2021) de septembre à décembre 2021. Cette étude a permis de clarifier certains aspects essentiels concernant l'effet du bioséchage dans un contexte de production d'un engrais organique et son impact sur le comportement anticipé du produit. Les analyses réalisées sont présentées au Tableau 15.

Tableau 15. Analyses réalisées sur le fumier frais et le fumier bioséché

Description des analyses
Préparation - Homogénéisation des engrais organiques
pH
Matière sèche (105°C) (Hum.), cendres (500°C)
Matière organique (MO) et carbone organique total (C _{org. total})
Carbone Organique Total (soluble à l'eau - TOC Shimadzu)(C _{org. soluble})
Azote Total Kjeldahl (N _{total})
N org (soluble)
Urée (azote uréique) (N _{urée})
Azote total (NT) (dissous à l'eau - TOC Shimadzu) sur extrait du COT Garcia (N _{total soluble})
N-NH ₄ et N-NO ₃ sur extrait du C _{org soluble}
Phosphore minéralisable au HCl (P _{HCl})
Phosphore soluble à l'eau (P _{soluble})
Métaux totaux - Digestion EPA 3050 (P, K, Ca, Mg, Na, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Cd, Cr, Co, Pb, S, Ba, Sr) (X _{totaux})
Métaux dissous (P, K, Ca, Mg, Na) (Si même extrait phosphore soluble à l'eau) (X _{soluble})
Indice de stabilité biologique (ISB)
Indice de la Stabilité de la Matière Organique (ISMO)

(Landry et coll. 2021)

Les activités et les analyses suivantes ont été réalisées sur du FPP ayant un TRB de 9-10 jours. Des échantillons de FPP ont été prélevés à l'entrée et à la sortie du bioséchoir aux deux dates suivantes :

- Entrée : une vingtaine de sous-échantillons provenant du fumier frais ajouté dans le bioséchoir, le 1er et le 2 septembre 2021 (l'échantillon composite de «fumier frais»);
- Sortie : un échantillon composite des 4 amas (10 sous-échantillons/amassés) réalisés à partir du matériel bioséché retiré du bioséchoir, le 11 septembre (l'échantillon composite de «fumier bioséché»);

Le Tableau 16 et le Tableau 17 présentent des paramètres biochimiques analysés dans le but d'établir le potentiel fertilisant du FPP frais et FPP bioséché et de le comparer avec d'autres engrais organiques (EO) disponibles sur le marché. Les valeurs sont présentées sur base humide, tel que reçu (b.h.).

Tableau 16. Comparaison des contenus (b.h.) et des ratios des formes solubles et totales de C et N entre le fumier frais et le fumier bioséché et d'autres engrais organiques sur le marché

Éléments	Hum.	pH	C/N	C _{org} total	C _{org} soluble	C _{org sol} /C _{org}	N Total	N-NH ₄	N-NO ₃	N _{min} ¹ /N _{tot}	N _{org}	N _{org} /N _{tot}
Unités	%			kg/T b.h.	kg/T b.h.	%	kg/T b.h.	kg/T b.h.	kg/T b.h.	%	kg/T b.h.	%
Fumier frais Amico	44,3	7,4	6,3	216	52,6	24,3	34,09	2,51	0,022	7,4	31,56	92,6
Fumier bioséché Amico	27,4	8,0	5,7	258	77,0	29,9	45,46	0,73	0,001	1,6	44,73	98,4
«Fumier bioséché théorique Amico ² »	9,5	8,0	5,7	321	96,0	29,9	56,67	0,91	0,001	1,6	44,73	98,4
FPG ³	9,5	7,4	6,9	328	81,3	25,0	47,49	1,29	0,180	3,1	46,02	96,9
Compost marin	57,4	8,0	12,2	133	2,0	1,5	10,88	0,70	0,297	9,2	9,88	90,8
Fumier de <i>broiler</i>	30,6	6,9	8,2	288	82,1	28,5	35,13	5,13	0,012	14,6	29,99	85,4

¹ N minéral = somme de N-NH₄ et du N-NO₃.

² Produit théorique obtenu en rapportant par calcul la composition du fumier bioséché AMICO de 27,4 % à 9,5 % de taux d'humidité.

³ Fientes de poules en granules

(Landry et coll. 2021)

Tableau 17. Comparaison des contenus et des ratios des formes solubles et totales de P, K, Ca, Mg, Cu et Zn entre le fumier frais et le fumier bioséché et d'autres engrais organiques sur le marché

Ratios	P _{HCl}	P _{ICP sol}	P _{tot}	P _{sol} /P _{tot}	N _{tot} /P _{tot}	K _{ICP sol}	K _{tot}	K _{sol} /K _{tot}	Ca _{ICP sol}	Ca _{tot}	Mg _{ICP sol}	Mg _{tot}	K
Unités	kg/T b.h.	kg/T b.h.	kg/T b.h.	%	kg/T b.h.	kg/T b.h.	kg/T b.h.	%	kg/T b.h.	kg/T b.h.	kg/T b.h.	kg/T b.h.	Ca+Mg
Fumier frais Amico	4,81	0,99	6,99	14,1	4,9	8,81	11,36	77,6	0,688	38,89	0,83	2,43	0,27
Fumier bioséché Amico	6,02	0,67	10,33	6,5	4,4	9,79	17,30	56,6	0,587	79,13	0,41	3,47	0,21
Fumier bioséché théorique Amico (à 9,5 % hum.) ¹	7,51	0,84	12,88	6,5	4,4	12,21	21,57	56,6	0,732	98,63	0,52	4,32	0,21
FPG ²	8,72	1,39	14,27	9,7	3,3	13,83	21,70	63,7	0,851	34,90	0,96	5,34	0,54
Compost marin	4,95	0,86	6,09	14,1	1,8	5,17	9,60	53,8	0,137	31,26	0,07	2,85	0,28
Fumier de <i>broiler</i>	N/D	1,22	7,63	16,0	4,6	14,61	17,85	81,8	0,831	14,73	1,25	4,20	0,94

¹ Produit théorique obtenu en rapportant par calcul la composition du fumier bioséché AMICO de 27,4 % à 9,5 % de taux d'humidité.

² Fientes de poules en granules

(Landry et coll. 2021)

- Les résultats indiquent que pour un même taux d'humidité de 9,5 %, le fumier AMICO bioséché contient près de 10 Kg de N_{total} de plus par tonne de produit, soit près de 20 % de plus, que les fientes de poules granulées (FPG) vendues commercialement.
- Pour des raisons qui demeurent inexplicables, le fumier AMICO bioséché caractérisé contient une quantité nettement supérieure de calcium (Ca) aux autres produits.

- Lors de l'analyse de l'ISB, quatre fractions organiques de plus en plus résistantes à la dégradation biochimique (fractions solubles, hémicelluloses, cellulose, lignine) sont dosées. Les valeurs de ces quatre fractions organiques permettent de distinguer les produits relativement labiles dans le sol (avec un comportement agronomique de type « engrais organique »), des produits plus stables (avec un comportement de type « amendement organique »). La proportion des diverses fractions mesurées pour le produit AMICO classifie ce dernier (frais ou bioséché) dans la catégorie (1) des engrais organiques, avec un ISB de moins de 13 d'autant plus que le produit est riche en N_{tot} et dont plusieurs mesures ont indiqué la grande facilité de minéralisation. Les fientes de poules granulées FPG appartiennent également à cette catégorie.

La faible valeur d'ISMO (17,9) obtenue pour le fumier AMICO bioséché vient confirmer la nature fertilisante du produit. Un temps de bioséchage court permet de retirer l'eau du produit rapidement par bioséchage et non d'obtenir une matière organique stabilisée.

Ces travaux d'investigation réalisés sur le FPP bioséché ont conduit aux conclusions suivantes :

- le procédé de bioséchage a permis d'abaisser l'humidité à des niveaux inférieurs à 30%;
- l'engrais bioséché encore instable demeure trop humide (27 % d'humidité résiduelle) pour envisager l'ensachage du produit. Un traitement additionnel de séchage d'appoint serait une solution pour l'ensachage du produit; cette avenue est abordée au point 5.3.

Le contenu en N_{total} ne change pas suite au bioséchage (moyenne de 62 kg N_{total} /T b.s.) même si les formes minérales et solubles organiques diminuent. Cependant, comme les formes minérales sont en faibles quantités et que le N_{org} soluble a probablement été réorganisé (i.e. intégré) dans le N microbien facilement minéralisable, la valeur et l'efficacité du produit demeure similaire; sur une base humide, le produit AMICO bioséché (TEE=27%) contient une quantité similaire de N_{total} (45,5 kg N_{total} /T) comparativement aux FPG (47,5 kg N_{total} /T) (TEE=10%) et leurs efficacités seront similaires et élevées. Cependant, l'engrais bioséché présente un ratio N/P 33% plus élevé que celui des FPG, ce qui peut constituer un avantage en contexte de contraintes liées aux apports en P.

5.3 SÉCHAGE THERMIQUE DU FPP

5.3.1 Mise en place de l'installation expérimentale

Les essais de séchage thermique ont été réalisés à la ferme dans un local chauffé avec un équipement de déshydratation appartenant à l'IRDA.

La configuration de l'unité de déshydratation Harvest Saver R5A a été réalisée selon les spécifications du fabricant pour assurer une consommation énergétique réduite pour le séchage du FPP :

- Débit de l'air en recirculation à la valeur maximale : 325 cfm;
- Débit d'air frais (la position clapet d'entrée) : 40 cfm;
- Température de séchage: 60° C.

5.3.2 Analyse de caractérisation du traitement de séchage thermique du FPP

Conformément à l'un des objectifs du projet, l'étape de séchage thermique post-bioséchage doit permettre de compléter, au besoin, la déshydratation du FPP préalablement bioséché qui est caractérisée par une humidité à la sortie du bioséchoir d'environ 30 %, afin de la réduire à moins de 20% et possiblement davantage. Un fumier sec est plus stable et facilite les opérations finales de conditionnement (broyage, tamisage, granulation), de stockage, d'ensachage et d'épandage du produit. Selon le temps de séchage, l'application d'une température de séchage supérieure à 55° C à cette étape pourrait également permettre voir assurer l'élimination des organismes pathogènes (hygiénisation). Cette option pourrait s'avérer particulièrement pertinente pour la production d'un produit qui doit être obligatoirement sécuritaire et exempt d'agents pathogènes.

5.3.2.1 Essais de caractérisation du séchage thermique du FPP

L'essai de caractérisation du séchage thermique du FPP a été réalisé dans les conditions suivantes :

- Alimentation du déshydrateur avec 27, 3 kg de FPP bioséché disposé sur 5 tiroirs (5 répétitions);
- Mise en fonction avec les réglages mentionnés au point 5.3.1;
- Mesure et enregistrement de la masse du fumier aux heures.

Les travaux de séchage thermique ont permis de procéder à :

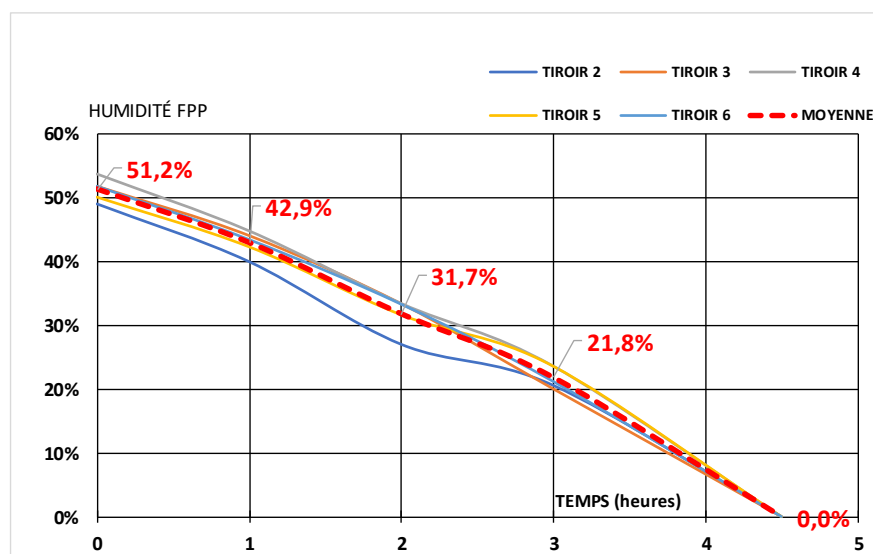
- Évaluation du bilan de masse pour le séchage thermique (Tableau 18);
- Traçage des courbes expérimentales de séchage du FPP (Figure 20);
- Traçage des courbes de caractérisation du séchage du FPP (Figure 21);
- Évaluation de la durée de séchage en fonction de l'humidité du FPP (Figure 22);
- Évaluation théorique des performances du séchage thermique direct à l'air pour cinq variantes de séchage du FPP frais et bioséché (Tableau 19):
 - STC - Séchage thermique - essai de caractérisation, TEE à l'entrée = 51%, TTE à la sortie= 0%;
 - STB1 - Séchage thermique du FPP bioséché: TEE à l'entrée = 30%, TTE à la sortie = 18%;
 - STB2 - Séchage thermique du FPP bioséché: TEE à l'entrée = 35%, TTE à la sortie = 18%;
 - STF1 - Séchage thermique du FPP frais: TEE à l'entrée = 50%, TTE à la sortie= 18%;

- STF2 - Séchage thermique du FPP frais: TEE à l'entrée =60%, TTE à la sortie= 18%.

Le Tableau 18 résume les tests de caractérisation du séchage direct à l'air pour la déshydratation du FPP. Après 4,5 heures suivant le début de l'essai, le séchage était complété et la matière sèche (ms) atteignait 100%.

Tableau 18. Séchage thermique du FPP avec le déshydrateur Harvest Saver

Intervalle de temps	0h (démarrage du séchage)		Après 1h		Après 2h		Après 3h		Après 4,5 h ms = 100% (fin du séchage)	
TIROIR	Masse FPP (kg)	TEE	Masse FPP (kg)	TEE	Masse FPP (kg)	TEE	Masse FPP (kg)	TEE	Masse FPP (kg)	TEE
Tiroir 2	5,3	49,1%	4,5	40,0%	3,7	27%	3,4	21%	2,7	0%
Tiroir 3	5,8	51,7%	5,0	44,0%	4,2	33%	3,5	20%	2,8	0%
Tiroir 4	5,6	53,6%	4,7	44,7%	3,9	33%	3,4	24%	2,6	0%
Tiroir 5	5,2	50,0%	4,5	42,2%	3,8	32%	3,4	24%	2,6	0%
Tiroir 6	5,4	51,9%	4,6	43,5%	3,9	33%	3,3	21%	2,6	0%
Bilan de masse du séchoir thermique										
Masse totale en séchage (kg)	27,3		23,3		19,5		17,0		13,3	
Humidité moyenne FPP (%)	51,2%		42,9%		31,7%		21,8%		0,0%	
Quantité d'eau totale éliminée (kg)	0,0		4,0		7,8		10,3		14,0	



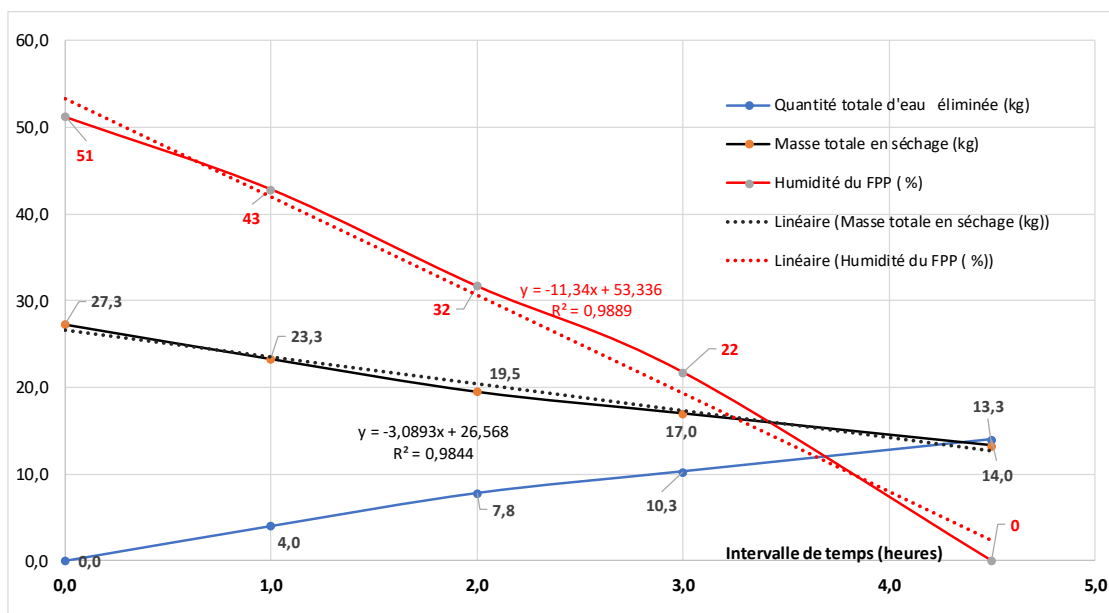


Figure 21. Courbes de caractérisation du séchage thermique du FPP

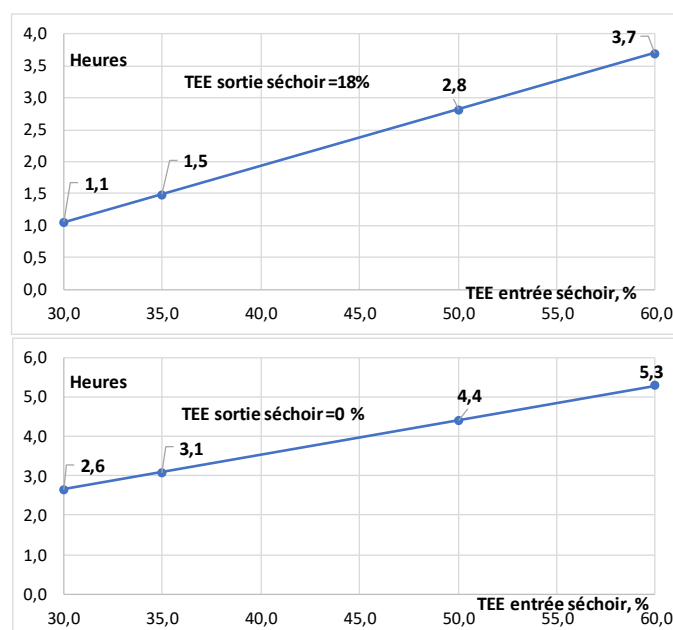


Figure 22. Évaluation de la durée de séchage en fonction de l'humidité du FPP

5.3.2.2 Traitements de séchage thermique du FPP

L'estimation des performances de séchage thermique direct à l'air pour cinq variantes est présentée au Tableau 19:

Il regroupe les caractéristiques des quatre traitements de séchage direct à l'air qui ont été évaluées sur la base des données obtenues de l'essai de séchage thermique de caractérisation (STC) réalisé avec le déshydrateur Harvest Saver R5A.

Tableau 19. Performances du séchage thermique du FPP avec le déshydrateur Harvest Saver

Type de traitement		Masse initiale FPP (kg)	Humidité initiale	Humidité finale	Quantité d'eau évaporée (kg)	Masse finale FPP (kg)	Durée séchage (h)	*Consommation énergétique spécifique (kWh/ kg eau évaporée)	\$/tonne d'eau évaporée	Consommation énergétique (kWh)	Coût séchage (\$)	\$/tonne FPP à traiter (entrée séchoir)	\$/tonne FPP séché (sortie séchoir)
STC	Séchage thermique - essai de caractérisation	27,3	51%	0%	14,0	13,3	4,5	1,4	131,32	19,6	1,84	67,29	138,12
STB 1	Séchage thermique du FPP bioséché	20,2	30%	18%	3,0	17,1	1,1			4,1	0,39	19,22	22,51
STB 2	Séchage thermique du FPP bioséché	21,5	35%	18%	4,5	16,9	1,5			6,2	0,59	27,22	34,35
STF 1	Séchage thermique du FPP frais	25,5	50%	18%	10,0	15,7	2,8			13,9	1,31	51,25	84,04
STF 2	Séchage thermique du FPP frais	28,2	60%	18%	14,4	14,2	3,7			20,2	1,90	67,26	137,89

L'essai de séchage thermique de caractérisation (STC) a été réalisé dans les conditions suivantes :

- Réglage de la température de séchage à 60°C dans le but d'assurer des conditions d'hygiénisation du FPP et une déshydratation rapide;
- Une consommation énergétique spécifique de 1,4 kWh/kg d'eau évaporée (caractéristique de l'appareil pour la température imposée et les débits d'air préétablis).

Les quatre traitements spécifiés au tableau 19 représentent :

- Le séchage du FPP bioséché pour réduire la TEE initiale de 30% et respectivement de 35 % jusqu'à une humidité finale du fumier de 18 % (traitement STB1 et STB2). Ces scénarios représentent l'application du séchage d'appoint qui accompagne le bioséchage, selon le traitement proposé par le projet.
- Le séchage du FPP frais pour réduire la TEE initiale de 60 % et respectivement de 50 % jusqu'à une humidité finale du fumier de 18 % (traitement STF1 et STF2). Ces scénarios correspondent au traitement par séchage complet du FPP frais, sans bioséchage.

La Figure 23 résume les caractéristiques de ces deux catégories de traitement.

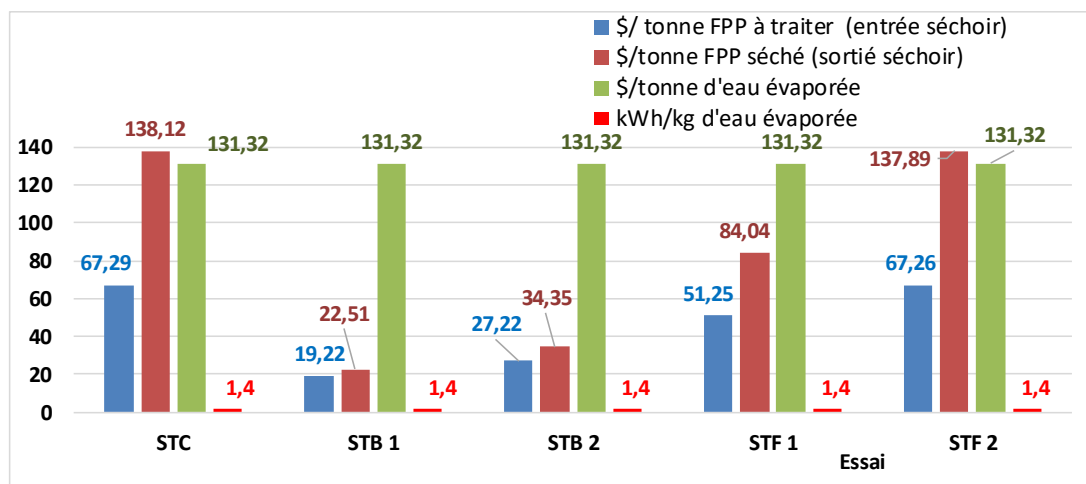


Figure 23. Comparaison des performances et des coûts du séchage thermique du FPP

Pour réaliser la déshydratation du fumier jusqu'au taux d'humidité ciblé de 18 %, il est plus rentable d'utiliser un traitement de séchage biologique, suivi d'un séchage thermique d'appoint (STB1 et STB2), comparativement à un unique séchage thermique (STF1 et STF2). Plus de 50% de l'eau à éliminer est évaporée par bioséchage. Suite au bioséchage, l'application d'un séchage thermique d'appoint, il est possible de poursuivre la déshydratation pour atteindre la TEE désirée (18%). Le traitement de séchage thermique d'appoint implique des coûts réduits, car la quantité d'eau à éliminer suite au bioséchage, est minime.

Selon notre analyse, les coûts spécifiques de traitement pour le séchage d'appoint (Tableau 20: STB 1 et STB 2) sont de 19,22 \$ et respectivement 27,22 \$ par tonne de FPP à traiter (entrée séchoir) et de 22,51 \$ et respectivement 34,35 \$ par tonne de FPP séché (sortie séchoir). Avec le traitement de séchage thermique, sans faire appel au traitement préalable de bioséchage (tableau 22 : STF 1 et STF 2), on atteint les mêmes objectifs de déshydratation avec des coûts spécifiques de 51,25 \$ et respectivement 67,26 \$ par tonne de FPP à traiter (entrée séchoir) et de 84,04 \$ et respectivement 137,89 \$ par tonne de FPP séché (sortie séchoir).

Tableau 20. Performances du séchage thermique du FPP avec le déshydrateur Harvest Saver

Code	Scénarios	TEE début (%)	TEE finale (%)	Coûts \$/t.h. entrée	
STB1	Séchage thermique du FPP bioséché	30	18	Avec bioséchage 19	Sans bioséchage 22
STB2	Séchage thermique du FPP bioséché	35	18	Avec bioséchage 27	Sans bioséchage 34
STF1	Séchage thermique du FPP frais	50	18	Avec bioséchage 51	Sans bioséchage 67
STF2	Séchage thermique du FPP frais	60	18	Avec bioséchage 84	Sans bioséchage 138

Les essais sur l'utilisation du séchage thermique permettent de conclure que :

- Le séchage du FPP est réalisable à la ferme par des séchoirs thermiques à l'air. La durée du traitement serait assez courte et les équipements qui sont relativement compacts, sont munis de dispositifs de réglage et contrôle pouvant assurer une gamme étendue de régimes de traitement;
- Les infrastructures (bâtiment, accessoires) sont minimales par rapport aux procédés de traitement conventionnels (compostage, séchage l'air à basse température avec l'air récupéré du bâtiment d'élevage);
- Les dépenses pour l'énergie sont élevées car la consommation énergétique spécifique pour les séchoirs thermiques se situe entre 1 200 et 1 500 kWh/kg d'eau évaporée. Cette constatation limite l'application du séchage thermique à l'air pour la déshydratation des FPP, surtout à des températures de plus de 50°C, considérant les coûts engendrés élevés pour la production d'un matériel dont la valeur de vente est faible.
- Pour les applications avec une réduction d'humidité limitée (la situation du séchage d'appoint), les coûts spécifiques sont moindres et permettent d'améliorer la rentabilité du produit. Plus la déshydratation biologique est avancée (la TEE à la sortie bioséchoir inférieure à 30%), plus les coûts énergétiques pour le séchage thermique d'appoint qui l'accompagne sont réduits.
- Les équipements de séchage thermique avec un traitement par lot (« batch ») nécessitent beaucoup de main-d'œuvre (remplissage/vidage des tiroirs, alimentation/vidage du séchoir) et l'intérêt de recourir à l'utilisation d'un séchoir en continu devrait être évalué.

5.4 BILAN DE MASSE ET D'ÉNERGIE POUR LE TRAITEMENT DU FPP

Un bilan massique préliminaire relatif aux étapes de traitement du FPP (séchage sur courroie, séchage biologique et séchage thermique d'appoint) a été établi en fonction du nombre de poules pondeuses et des conditions moyennes correspondant à un temps de rétention sur les courroies de 0-3 jours et un temps de résidence dans le bioséchoir de 10 jours. Les calculs sont basés sur une TEE de 54% à la sortie du poulailler pour atteindre 35% à la sortie du bioséchoir et 18% à la sortie du séchoir. Les données de départ correspondent aux essais de suivi du séchage du FPP sur les courroies (5.1.2.3 et Tableau 5).

5.4.1 Bilans de masse pour le traitement du FPP (unité pilote de 5 m³)

L'unité pilote SHOC^{MD} utilisée pendant deux ans pour les essais de bioséchage et pour une large gamme de régimes de traitement, a généré un nombre important d'informations techniques sur le procédé et l'équipement. Le bilan massique présenté au Tableau 21 est basé sur des conditions moyennes de fonctionnement obtenues lors des essais de bioséchage. La réduction de l'humidité initiale du FPP de 50% à une valeur de 30% pour le produit bioséché et pour une capacité de traitement à l'entrée du bioséchoir de 237,5 kg/jour (0,475 m³/jour) a engendré la production d'une quantité de FPP bioséchée de 169,6 kg/jour et d'une quantité d'eau éliminée de 67,9 kg/jour.

La dégradation biologique n'a pas été considérée pour cette étape de calcul car jugée très faible (impact sur la précision estimé à $\pm 5\%$).

Tableau 21. Bilan massique du bioséchage du FPP avec l'unité pilote de 5 m³

MATÉRIEL ENTRANT	CAPACITÉ DE TRAITEMENT		PROPRIÉTÉS À L'ENTRÉE DU BIOSÉCHOIR				PROPRIÉTÉS À LA SORTIE DU BIOSÉCHOIR			QUANTITÉ D'EAU ÉLIMINÉE	
FPP FRAIS	Volumique	Massique	Masse volumique	Humidité	Contenu en eau	Matière sèche (MS)	Humidité	Contenu en eau	Masse totale		
	m³/jour	kg/jour	kg/m³	50%	kg	kg	30%	kg	kg/jour		kg/jour
	0,475	237,5	500		119	119		50,9	169,6		67,9
	m³/an	t/an							t/an		t/an
	171	86							61	24	

Les résultats des essais avec le séchoir thermique d'appoint (I) présentés au Tableau 22 sont basés sur le traitement de l'ensemble de la quantité de FPP bioséché par l'unité pilote.

Tableau 22. Bilan massique du FPP bioséché avec le séchoir thermique d'appoint (I)

MATÉRIEL ENTRANT	CAPACITÉ DE TRAITEMENT		PROPRIÉTÉS À L'ENTRÉE DU SÉCHOIR THERMIQUE				PROPRIÉTÉS À LA SORTIE DU SÉCHOIR THERMIQUE			QUANTITÉ D'EAU ÉLIMINÉE
FPP BIOSÉCHÉ	Volumique	Massique	Masse volumique	Humidité	Contenu en eau	Matière sèche (MS)	Humidité	Contenu en eau	Masse totale	
	m³/jour	kg/jour	kg/m³	30%	kg	kg	18%	kg	kg/jour	kg/jour
	0,485	169,6	350		51	119		26,1	144,8	24,8
	m³/an	t/an							t/an	t/an
	174	61							52	9

Le séchage thermique génère une quantité de FPP séché de 144,8 kg/jour. Il est important de noter que la quantité moyenne d'eau éliminée par bioséchage est de 67,9 kg/ jour (24,4 tonnes par an) comparativement à 24,8 kg/ jour (8,9 tonnes par an) d'eau éliminée par séchage thermique. Le Tableau 23 résume le bilan du traitement complet du FPP (bioséchage plus séchage thermique d'appoint) incluant l'unité pilote de 5 m³.

Tableau 23. Bilan massique pour le traitement du FPP par bioséchage et séchage thermique d'appoint (I)

MATÉRIEL ENTRANT	CAPACITÉ DE TRAITEMENT		PROPRIÉTÉS À L'ENTRÉE DU BIOSÉCHOIR				PROPRIÉTÉS À LA SORTIE DU SÉCHOIR THERMIQUE			QUANTITÉ D'EAU ÉLIMINÉE
FPP FRAIS	Volumique	Massique	Masse volumique	Humidité	Contenu en eau	Matière sèche (MS)	Humidité	Contenu en eau	Masse totale	
	m³/jour	kg/jour	kg/m³	50%	kg	kg	18%	kg	kg/jour	kg/jour
	0,475	237,5	500		119	119		26,1	144,8	92,7
	m³/an	t/an							t/an	t/an
	171	86							52	33

5.4.1.1 Performances énergétiques pour le traitement du FPP

Les performances énergétiques pour l'unité pilote de 5 m³ sont présentées au Tableau 24. Une quantité d'énergie est nécessaire pendant la saison froide pour préchauffer l'air qui alimente le bioséchoir afin de maintenir une

température à l'entrée du bioséchoir de 20° C. Les systèmes mécaniques d'actionnement de l'équipement et la ventilation nécessitent aussi la consommation d'électricité.

Tableau 24. Performances énergétiques pour l'unité pilote de 5 m³

	Puissance installée (kW)	Charge maximale	Heures par jour	Énergie moyenne consommée (kWh/jour)	Total énergie consommée (kwh)		Coûts énergie (\$)		Consommation spécifique (kWh/ tonne d'eau éliminée)		Coût spécifique (\$ /tonne FPP bioséchée)		Coût spécifique (\$/tonne d'eau éliminée)	
					Saison froide (180 jrs)	Saison chaude (180 jrs)	Saison froide (180 jrs)	Saison chaude (180 jrs)	Saison froide (180 jrs)	Saison chaude (180 jrs)	Saison froide (180 jrs)	Saison chaude (180 jrs)	Saison froide (180 jrs)	Saison chaude (180 jrs)
Ventilation bioséchoir	0,5	70%	24	8,4	1512	1512	141,83	141,83	1131,79	190,99	42,46	7,17	106,16	17,91
Chauffage air entrée bioséchoir	4	70%	24	67,2	12096	604,8	1134,60	56,73						
Mécanisation (porte, convoyeur, couteau)	3	80%	0,5	1,2	216	216	20,26	20,26						
TOTAL	8			77	13 824	2 333	1 296,69	218,82						
prix électricité 0,0938		\$/ kWh					Moyenne		661,39		24,82		62,04	

L'analyse de la performance énergétique confirme les avantages de l'application du bioséchage comme première étape de traitement du FPP pour réduire l'humidité de 20 points de pourcentage et suivi d'un traitement de séchage thermique d'appoint permettant de réduire l'humidité de 12 points de pourcentage additionnels. Les coûts spécifiques pour la déshydratation par bioséchage sont plus faibles (65,41\$/ tonne d'eau évaporé) comparativement au séchage thermique (131,32\$/tonne d'eau évaporé). Il apparaît plus intéressant de sécher le FPP par bioséchage pour un écart d'humidité qui soit le plus grand possible afin de minimiser les coûts du séchage thermique d'appoint.

Il est démontré qu'un traitement de fumier par bioséchage et séchage thermique d'appoint serait plus économique, du point de vue dépenses énergétiques, que l'emploi d'un unique séchage thermique (Figure 24), réalisé dans les mêmes conditions (taux de déshydratation et températures de séchage de l'air).

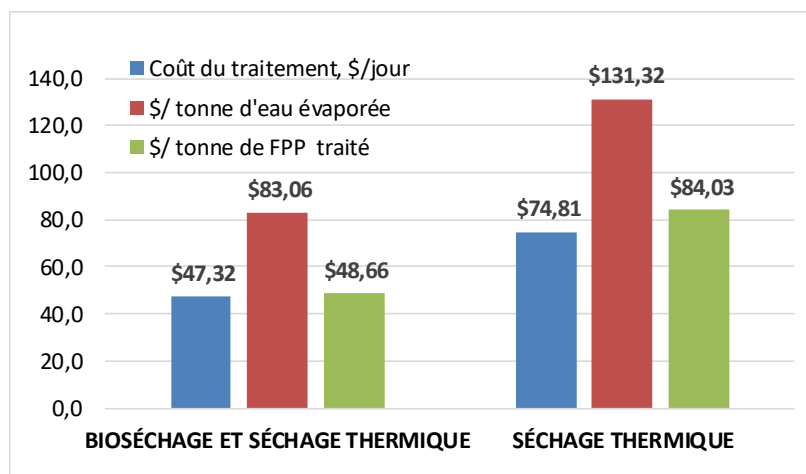


Figure 24. Comparaison des performances d'un traitement combiné (bioséchage et séchage thermique d'appoint) et d'un traitement unique de séchage thermique

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le bioséchage est un procédé qui s'apparente au compostage et dont l'objectif principal est de déshydrater la matière organique rapidement et efficacement en utilisant la chaleur provenant d'une activité intense microbienne. Dans le contexte d'une demande croissante notamment pour des engrais organiques utilisables en agriculture biologique, le projet visait à évaluer le potentiel du bioséchage avec la technologie SHOC^{MD} comme approche pour la production d'engrais séchés ou compostés. La séquence étudiée comportait trois étapes successives soit le séchage du FPP sur les courroies dans le poulailler, le bioséchage du FPP en enceinte fermée (SHOC^{MD}) et le séchage thermique d'appoint post traitement avec un équipement spécialisé.

Le projet a permis de dégager les résultats et conclusions suivants :

TEE du FPP frais provenant de cages enrichies

En termes d'humidité et de consistance, il est envisageable d'alimenter le bioséchoir SHOC^{MD} (sans ajout de structurant) avec du FPP issu de poulaillers avec cages enrichies et dont le temps de résidence sur la courroie d'évacuation (TRC) varie de 0-1 jour à 0-7 jours. Ces temps de résidence correspondent à des TEE du FPP qui varient entre 76 et 40 %. Toutefois, comme le bioséchage est basé sur une activité microbienne, un taux d'humidité relativement élevé est requis de sorte que la pertinence de biosécher un FPP dont la TEE à la sortie du poulailler serait inférieure à 50% est questionnable. Conséquemment, le procédé SHOC^{MD} apparaît particulièrement intéressant pour des temps de résidence du FPP sur courroies courts soit entre 0-1 et 0-3 jours.

En suivant un mode opératoire de remplissage quotidien du bioséchoir, (apports de 1-4 po FPP/jour), la structure du FPP provenant des courroies permet de maintenir une ventilation adéquate de la masse et conséquemment d'assurer des conditions aérobies et ce, sans avoir à ajouter d'agents structurants.

Bioséchoir

Les résultats obtenus quant à la performance du procédé à l'échelle de l'unité pilote de bioséchage, dans des conditions réelles dans une ferme de productions d'œufs de consommation, sont représentatifs d'un système de traitement qui serait construit à une échelle commerciale. Le projet a confirmé, par voie expérimentale, le potentiel d'intégrer la technologie de bioséchage SHOC^{MD} dans une chaîne de traitement du FPP à la ferme, pour réaliser un assèchement du fumier et l'obtention d'une matière organique de base partiellement déshydratée, stabilisée et désodorisée pour la production de fertilisants.

Déshydratation et ventilation

Les meilleures performances de déshydratation ont été obtenues avec des régimes de ventilation constante équivalent à 22-27 CFM/m³. Toutefois, sous ces conditions de ventilation constantes, il a été difficile de maintenir des températures élevées dans la masse, particulièrement l'hiver. Des régimes d'aération alternée optimisés, avec

une température d'air maintenue à 20°C, ont été mis à l'essai et ont permis d'obtenir de bonnes performances de déshydratation (TEE d'environ 30%) tout en atteignant des températures d'hygiénisation supérieures à 55°C.

En résumé et pour des temps de résidence du FPP dans le bioséchoir moyen de 9 jours (entre 8 et 12 jours), les deux régimes de ventilation suivant ont permis de biosécher adéquatement le FPP:

- Ratios de 20 à 30 CFM/m³ de matériel en bioséchage pour une déshydratation avancée (20 à 30 kg d'eau évaporée par m³ de matériel en bioséchage) et une TEE finale inférieure à 30%;
- Ratios de 7 et 10 CFM/m³ de matériel en bioséchage pour une hygiénisation efficace (températures du matériel en zone thermophile supérieures à 55°C), sans générer de lixiviats.

Températures

Le FPP constitue une matière organique qui, sous des conditions d'opération optimisés, génère suffisamment de chaleur pour atteindre dans une enceinte fermée isolée, des températures associées à la plage thermophile et conséquemment, aux conditions d'hygiénisation reconnues soit >55°C pendant 3 jours consécutifs). De tels résultats ont été obtenus avec un équipement adéquatement isolé et une température de l'air de ventilation maintenue à au moins 20°C en tout temps.

Hygiénisation

Étant donné la complexité associée à la démonstration de l'hygiénisation de la matière organique par bioséchage (présence de pathogènes dans le matériel entrant, temps d'exposition aux températures pour l'ensemble de la masse, contamination croisée en milieu non stérile) des recherches plus spécifiques sont nécessaires pour valider les observations découlant du présent projet concernant l'hygiénisation du FPP avec le procédé SHOC^{MD}. Une étape de séchage thermique post traitement augmenterait l'assurance d'obtenir une hygiénisation du produit sous des conditions de traitement biologique qui pourraient varier.

Adaptation technologique

Certains travaux sont à prévoir pour adapter le bioséchoir à l'environnement des poulaillers et au FPP issu de cages enrichies dont :

- Le système mécanisé d'alimentation et de distribution du FPP dans le bioséchoir;
- Le système d'automatisation pour l'ajustement de la ventilation et le maintien des températures à l'aide d'un automate programmable;

Le déplacement vertical de la zone thermophile au sein de la masse complexifie l'utilisation des thermocouples pour contrôler et ajuster la ventilation du matériel. La température de l'air à la sortie du bioséchoir apparaît un paramètre davantage intéressant sur lequel pourrait s'appuyer l'automatisation de la ventilation.

Séchage thermique additionnel

L'intégration d'une étape de séchage thermique d'appoint permettrait d'abaisser la TEE du FPP sortant du bioséchoir d'environ 30% TEE à 15 - 20% tout en procurant une garantie supplémentaire pour l'hygiénisation du produit particulièrement importante pour les produits vendus. Pour ce faire, les équipements spécialisés suivants sont disponibles en plusieurs variantes :

- séchoir thermique direct à l'air à haute température (60° C et plus) - équipements pour traitement par lot;
- séchoir thermique direct à l'air à basse température et récupération de l'air du poulailler – séchoirs à bande pour traitement en continu;
- séchoir thermique indirect à haute température - séchoirs à vis pour traitement en continu.

Pour réaliser la déshydratation du fumier jusqu'au taux d'humidité ciblé d'environ 18 %, il est plus rentable d'utiliser un traitement de séchage biologique, suivi d'un séchage thermique d'appoint, comparativement à un unique séchage thermique.

Les équipements de séchage thermique avec un traitement par lot (« batch ») nécessitent beaucoup de main-d'œuvre (remplissage/vidage des tiroirs, alimentation/vidage du séchoir) et l'intérêt de recourir à l'utilisation d'un séchoir en continu devrait être évalué.

Considérations économiques

L'analyse des dépenses liées à la consommation énergétique pour le traitement du FPP montre des coûts spécifiques de 26,16\$/tonne de FPP bioséché et de 65,41\$/tonne d'eau évaporée dans des conditions moyennes d'utilisation (réduction de la TEE du FPP de 50% à 30%). Les mêmes coûts spécifiques pour le séchage thermique d'appoint sont de 22,51\$/tonne de FPP séchée et respectivement 131.32 \$/tonne d'eau évaporée (réduction de la TEE de 30 à 18%).

Cette analyse confirme les avantages économiques du bioséchage comme première étape de traitement pour réduire l'humidité de 20 points de pourcentage suivi d'un traitement de séchage thermique d'appoint qui permet de réduire l'humidité de 12 points de pourcentage additionnels. Il est donc plus intéressant d'utiliser le bioséchage pour déshydrater le FPP humide au niveau le plus bas possible afin de minimiser les coûts plus élevés inhérents au séchage thermique d'appoint.

Caractéristiques du FPP bioséché

Les constats suivants sont faits pour un temps de résidence sur courroie (TRC) de 0-3 j et un temps de résidence dans le bioséchoir (TRB) du FPP de 9 jours:

- La perte en azote total n'est pas importante et représente environ 1% sur une base de matière sèche;
- La perte en matière organique totale est de 11%, ce qui représente une perte d'environ 1% par jour de rétention;

- La teneur en E. coli diminue de façon très importante avec une valeur à la sortie de 44 UFC/g sec confirmant ainsi le caractère hygiénisant du procédé lorsque les températures thermophiles sont atteintes;
- l'engrais bioséché est encore instable et demeure trop humide (27 % d'humidité résiduelle) pour envisager l'ensachage du produit sous forme pulvérulente. Un traitement additionnel de séchage d'appoint serait une solution pour inhiber l'activité microbienne et envisager l'ensachage du produit sous forme granulé;
- En régime établie, le bioséchage a généré un produit fertilisant dont l'humidité a varié entre 30 et 35%, et qui s'avère encore instable avec une consommation en oxygène de 5 600 mgO₂/kg MV-h et ce, malgré un C/N d'environ 5.
- La valeur fertilisante du matériel bioséché, exprimée conformément à la réglementation des fertilisants en % sur le produit (b.h.), est de 4,4% N_{tot}, 2,0% P₂O₅ et 1,7% K₂O. Le produit contient 64% de MO (b.s.), son pH est alcalin avec une valeur d'environ 8. Les températures élevées permettent d'abaisser la teneur en E Coli à un faible niveau d'environ 44 UFC/g sec.

Une étude de caractérisation des paramètres biochimiques et des divers ratios du FPP réalisée par Landry et coll., 2021, conclut que :

- Le procédé de bioséchage a permis d'abaisser l'humidité du FPP bioséché à de niveaux inférieurs à 30%;
- L'humidité de l'engrais bioséché était de 27% et demeure trop élevée pour l'ensachage et un traitement de séchage thermique d'appoint constitue une solution pour assurer une stabilité du produit;
- Du point de vue azoté, le contenu en N_{tot} ne change pas avec le bioséchage (moyenne de 62 kg N_{tot} /T b.s.) malgré que les formes minérales et solubles organiques diminuent. Le N_{org} soluble a probablement été réorganisé (c.-à-d. intégré) dans le N microbien facilement minéralisable et la valeur et l'efficacité du produit demeurent similaires;
- La faible valeur d'ISMO (17,9) obtenue pour le fumier bioséché vient appuyer la nature fertilisante du produit.
- Rapporté sur un même taux de 9,5 % d'humidité, le FPP bioséché contient près de 10 Kg N_{tot} de plus par tonne de produit, soit près de 20 % de plus que les FPG (Fientes de poules granulés) commercialisées;
- Un ratio N/P amélioré de 33 % en comparaison des FPG devient un avantage notable, car celui-ci permet d'apporter moins de P dans les sols pour chaque kilo de N visé;
- Un FPP bioséché plus sec serait ainsi d'autant plus compétitif.

Procédé SHOC^{MD} et bioséchage du FPP

Les essais réalisés dans le cadre du présent projet avec le procédé SHOC^{MD} démontrent qu'avec des modifications mineures, l'implantation d'un tel procédé est envisageable à court terme sur des entreprises de productions d'œufs de consommation du Québec. D'une façon générale, le FPP issu de poulaillers conformes aux nouvelles normes (cages enrichies) possède les caractéristiques requises pour engendrer de la chaleur et favoriser le séchage biologique du produit. Les procédés de compostage en enceinte fermée muni d'un système de ventilation ont un potentiel d'utilisation comme bioséchoir et les performances de déshydratation, de stabilisation et de désodorisation sont spécifiques à chacun des équipements.

Les données obtenues par la réalisation du présent projet permettront aux producteurs d'œufs de consommation du Québec d'évaluer la performance et les avantages que procurent ce type de traitement pour la transformation du FPP et la production subséquente d'un engrais organique de qualité.

Le bioséchoir SHOC^{MD} est le résultat des avancements obtenus pendant plus de 15 ans de développement, incluant des améliorations au niveau de l'ingénierie apportées par nos partenaires industriels (Industries Fournier, Prométal Plus) qui ont contribué à la construction de bioréacteurs de diverses capacités (25, 50 et 250 m³) et adaptable au traitement du FPP.

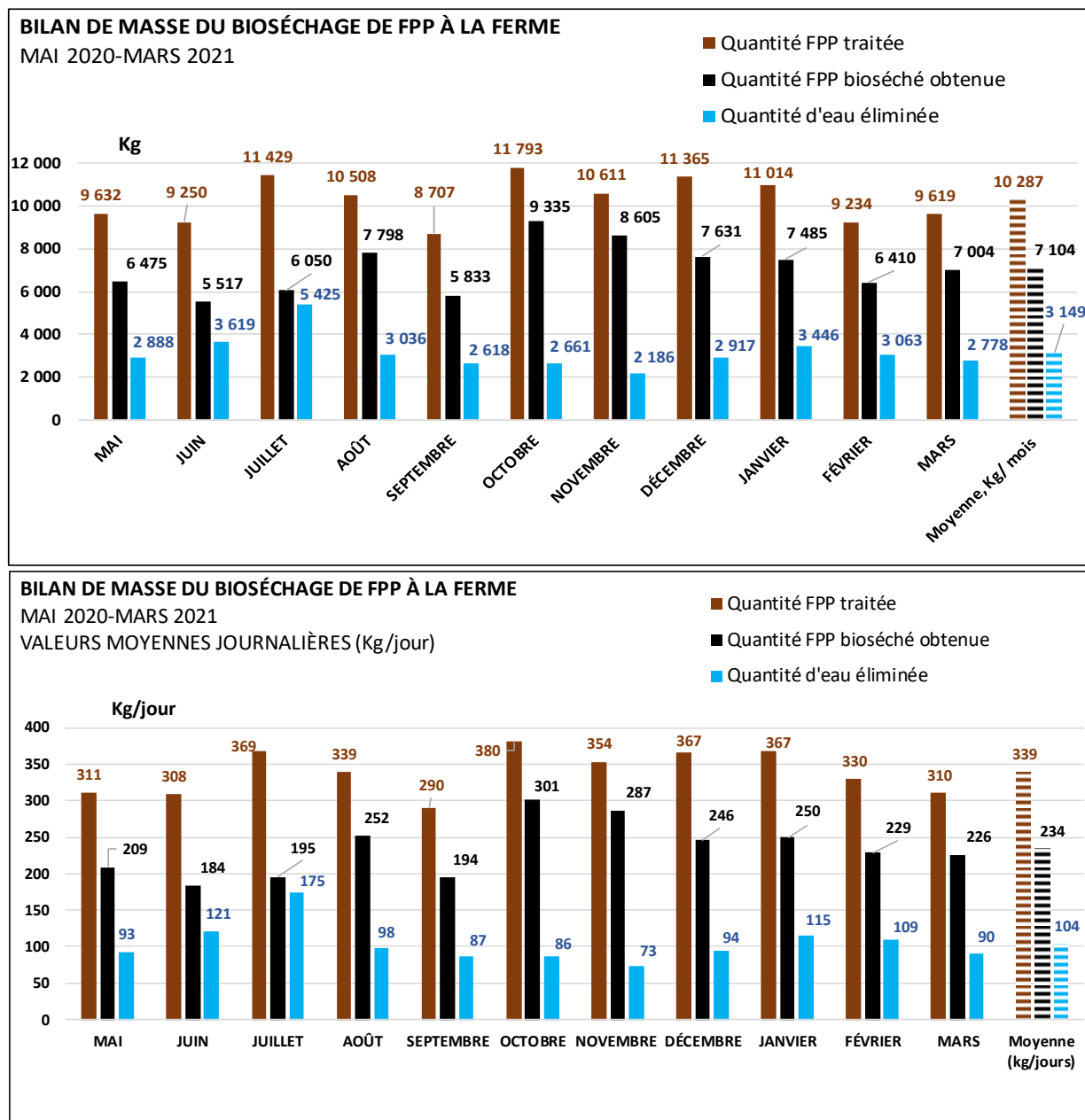
Le traitement de FPP proposé repose sur la technologie brevetée par l'IRDA pour la fabrication des engrais à partir de lisier, fumier, boues organiques (brevets d'invention CA 2,611,292 et US 8,124,401). Connue sous le nom commercial de SHOC^{MD} (Système d'Hygiénisation par Oxydation Contrôlée), la technologie fait l'objet d'un brevet accordé à l'IRDA en 2019 (CA 2,865,767).

RÉFÉRENCES

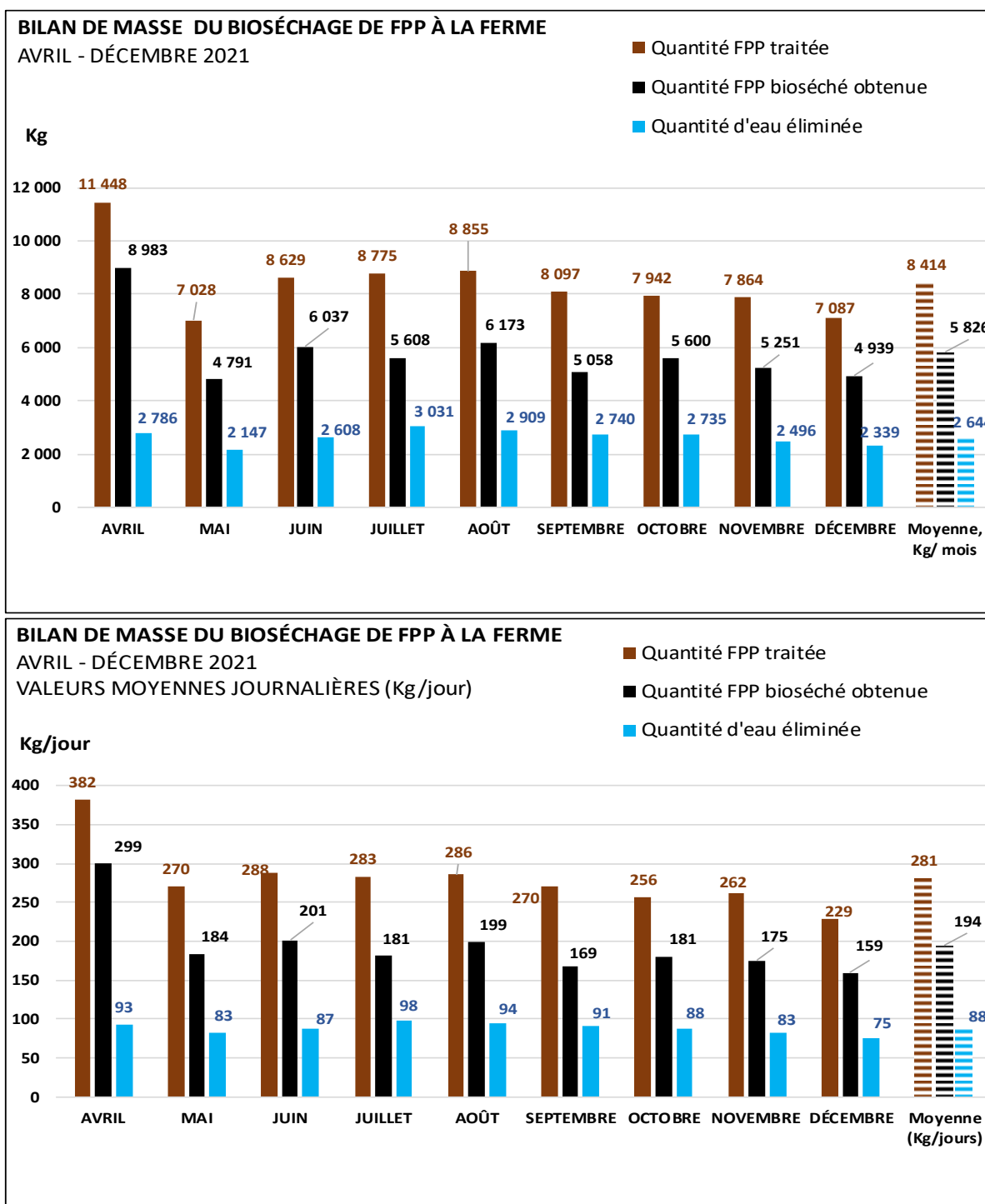
- Choi, H.L., 2001. Composting High Moisture Materials: Biodrying Poultry Manure in a Sequentially Fed Reactor. *Compost Science & Utilization* 2001. V9, No 4., 303-311
- Duval, J., 2016. Stratégies et engrais pour la fertilisation en agriculture biologique, Journées agricoles 2016, MAPAQ
- FPOQ, 2019. 2018-2019, Rapport annuel de la Fédération des producteurs d'œufs du Québec, 2019
<http://www.oeuf.ca/publications>
- FPOCQ, 2001. Le plan d'action en agroenvironnement - Œufs de consommation. Fédération des producteurs d'œufs de consommation du Québec. <http://www.oeuf.ca/publications>.
- Gagné, J.-C., 2016. Valorisation du fumier de poulet, Le traitement se développe au Québec, NOUVAiles - Mars 2016
- Garcia, C., Hernandez, T. Costa, F. 1990. Study on water extract of sewage sludge compost. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37:399-408.
- IRDA, 2019. SYSTEM TO EVACUATE MATERIALS FROM A CHAMBER, Brevet CA 2 865 767
- IRDA, 2010. METHOD AND SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF BIOFERTILIZERS, Brevet US 8,124,401
- IRDA 2010. PROCÉDÉ ET SYSTÈME DE FABRICATION DE BIOFERTILISANTS, Brevet CA 2 611 292
- Landry, C., et coll., 2021. Caractérisation du fumier de poule frais et bioséché avec le produit SHOC™. Rapport IRDA 2021
- Mengchun, G. et al, 2009. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust, *Bioresource Technology* 101 (2010)
- Messier, J.-F. 2013. Évaluation de lisier séché et granulé de poules pondeuses comme démarreur dans une production de maïs-grain. MAPAQ, Journée bio 2013 en grandes cultures
- Robitaille, R., 2007. DU FUMIER DE POULE PONDEUSE COMPOSTÉ DANS LES PATATES?
<https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/ecolonature.pdf>
- Seydoux, S. et coll., 2006. Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des effluents d'élevages de poulettes et de poules pondeuses. IRDA. 41 p. et annexes
- Velis, C.A., et al, 2009. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering, *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 11, June 2009,
- Waqas, Q. et al. 2018. Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* (2018) 7:261 -267

ANNEXE A

A1. BILANS DE MASSE PRÉLIMINAIRES POUR LE BIOSÉCHAGE DU FPP

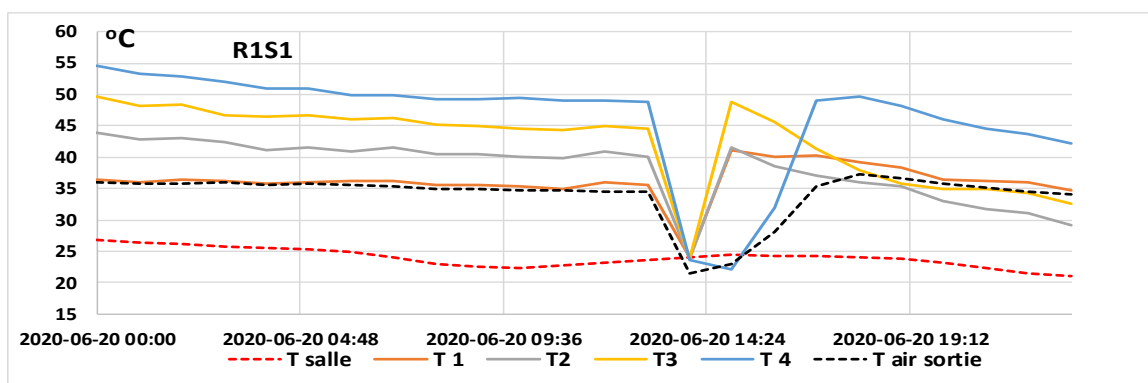


A - Figure 1. Bilan de masse préliminaire pour l'étape 1 d'essais

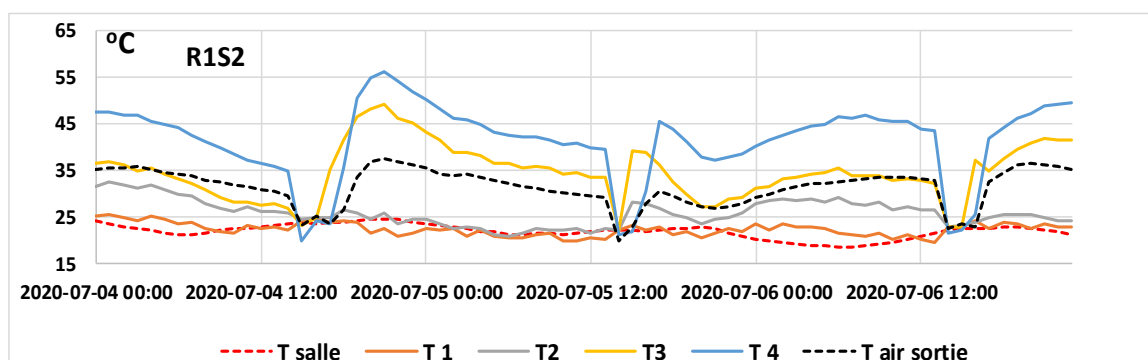


A - Figure 2. Bilan de masse préliminaire pour l'étape 2 d'essais

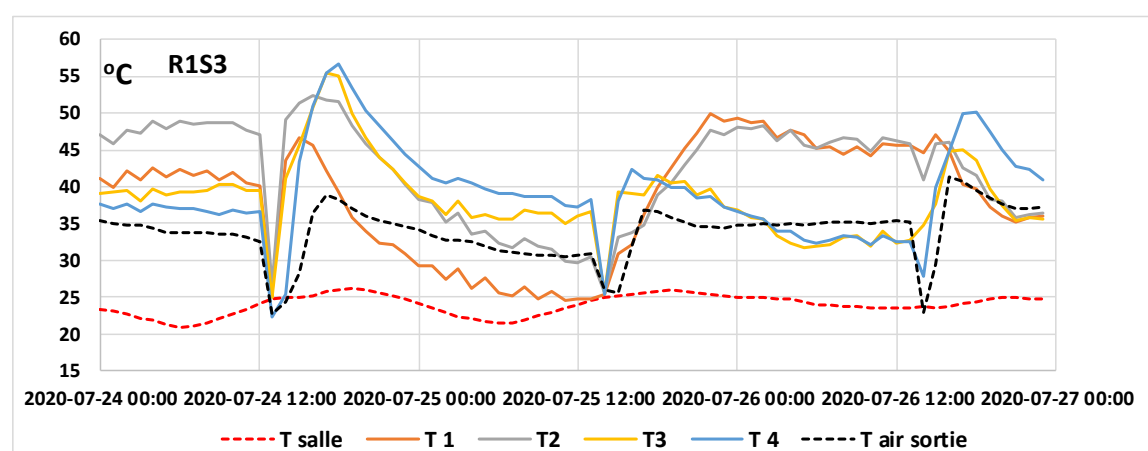
A2. VARIATION DES TEMPÉRATURES POUR LE BIOSÉCHAGE DU FPP EN RÉGIME STABILISÉ



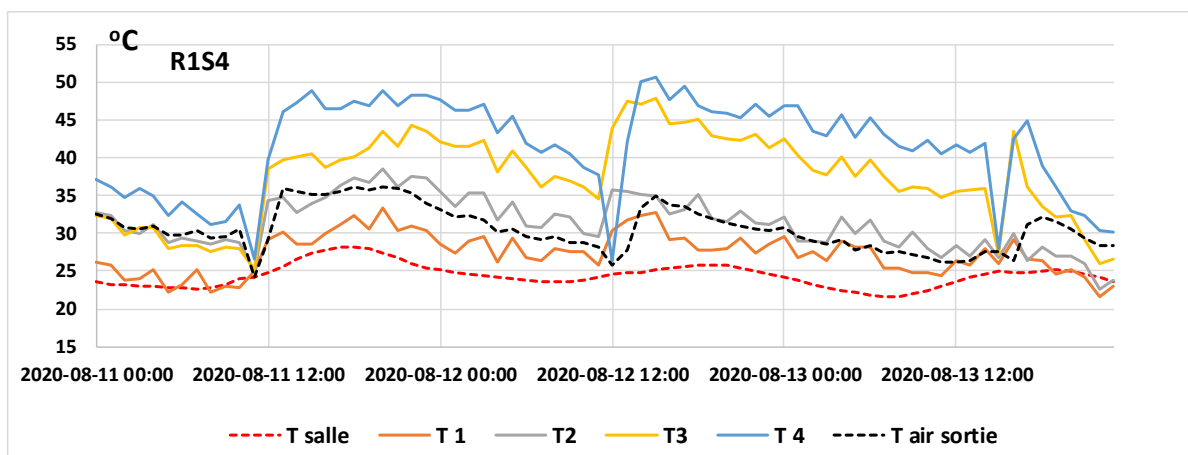
A - Figure 3. Variation des températures en régime stabilisé R1S1, le 20 juin 2020



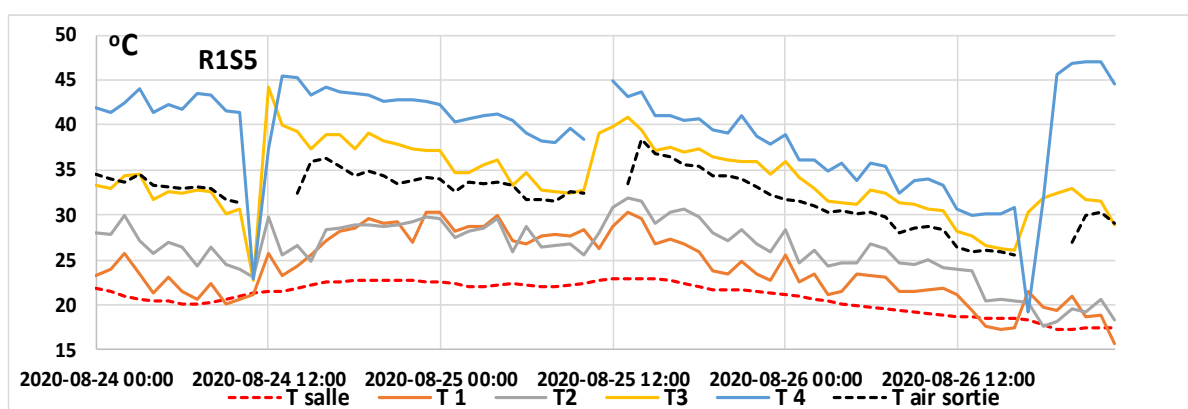
A - Figure 4. Variation des températures en régime stabilisé R1S2, du 4 au 6 juillet 2020



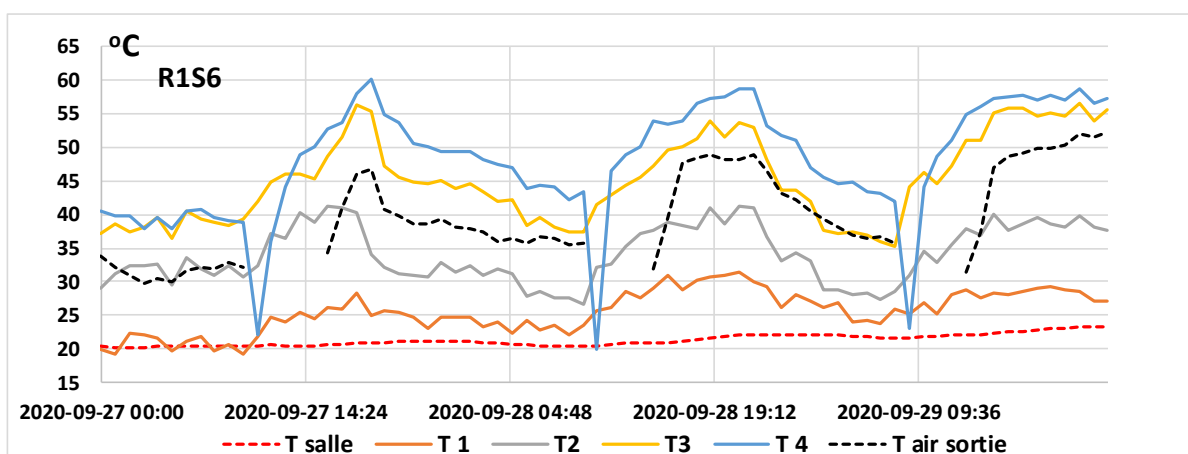
A - Figure 5. Variation des températures en régime stabilisé R1S3, du 24 au 26 juillet 2020



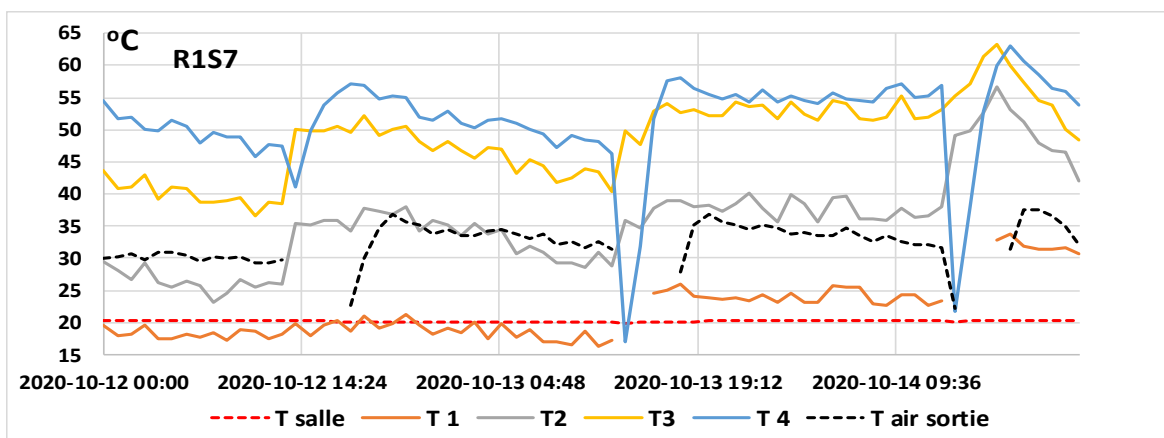
A - Figure 6. Variation des températures en régime stabilisé R1S4, du 11 au 13 août 2020



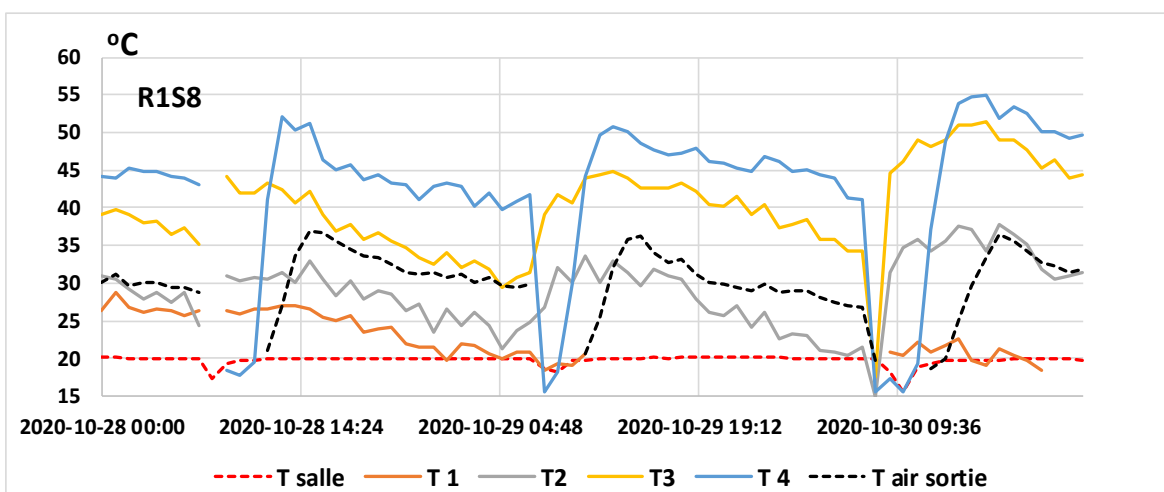
A - Figure 7. Variation des températures en régime stabilisé R1S5, du 24 au 26 août 2020



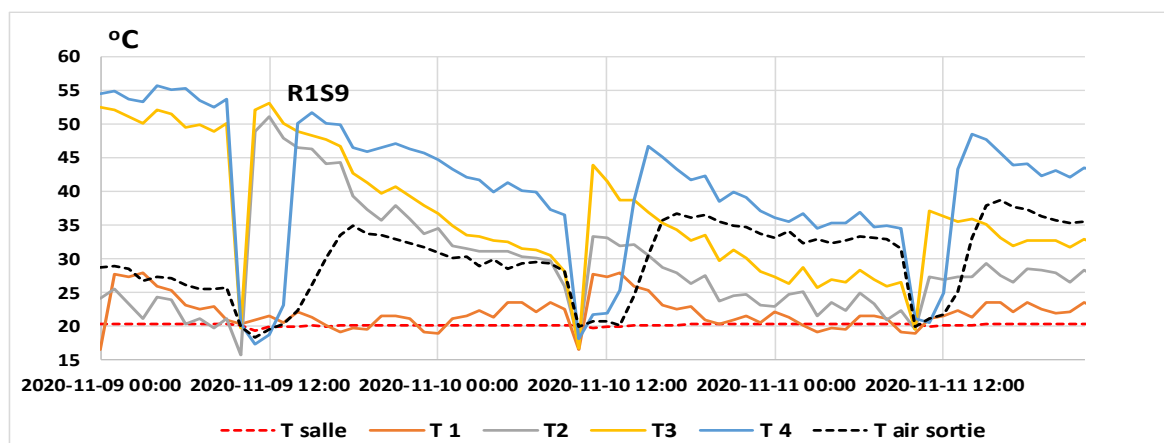
A - Figure 8. Variation des températures en régime stabilisé R1S6, du 27 au 29 sept. 2020



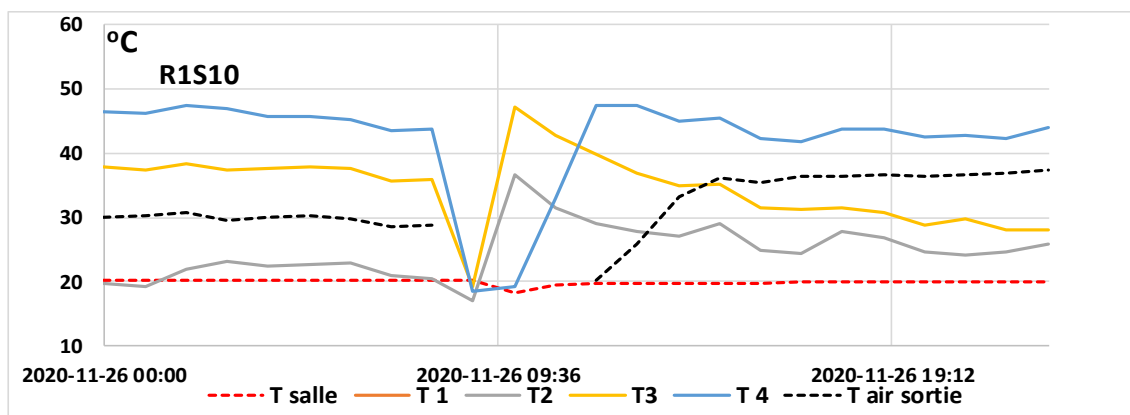
A - Figure 9. Variation des températures en régime stabilisé R1S7, du 12 au 14 oct. 2020



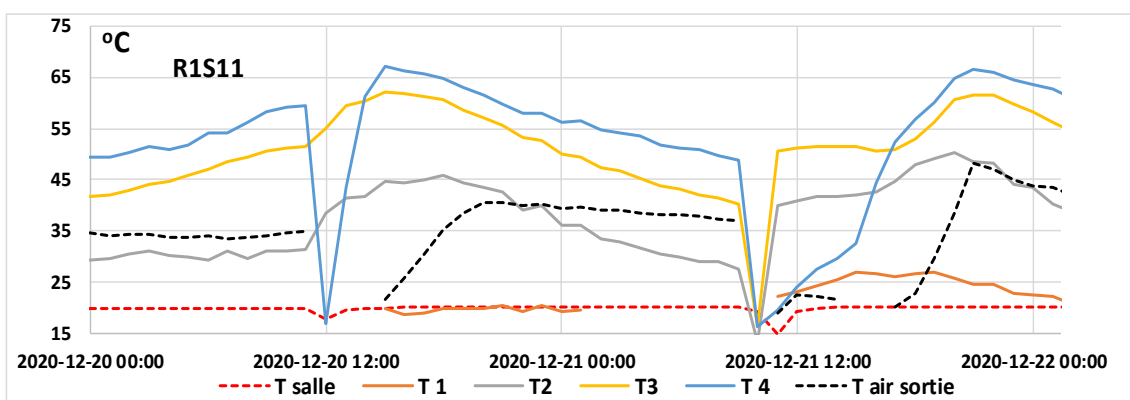
A - Figure 10. Variation des températures en régime stabilisé R1S8, du 28 au 30 oct. 2020



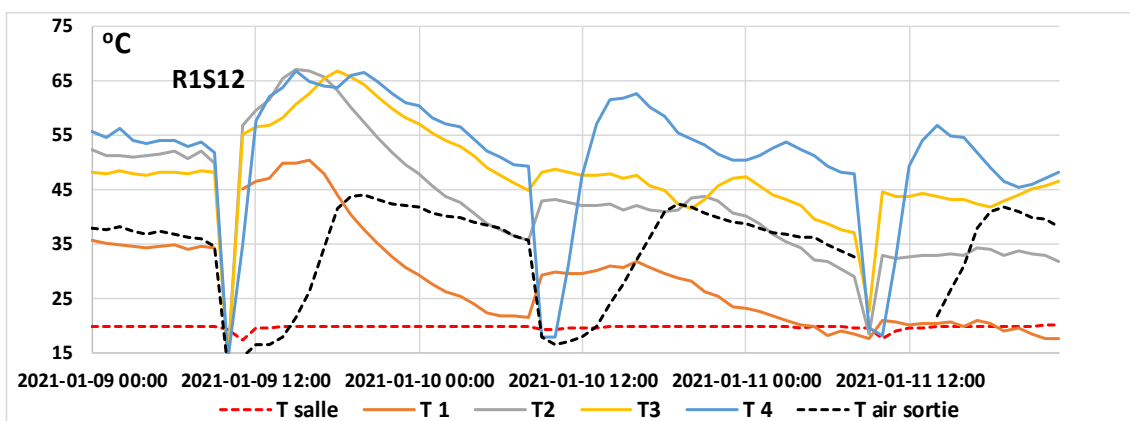
A - Figure 11. Variation des températures en régime stabilisé R1S9, du 9 au 11 nov. 2020



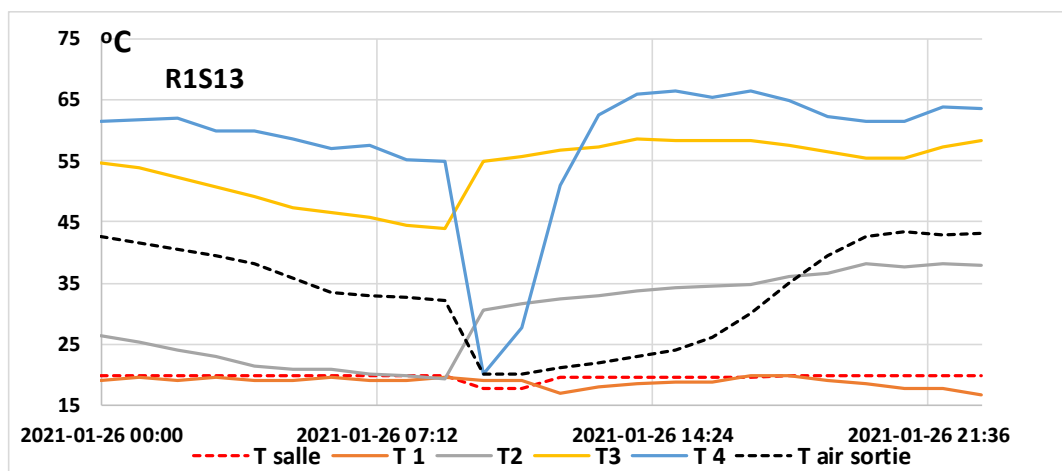
A - Figure 12. Variation des températures en régime stabilisé R1S10, le 26 nov. 2020



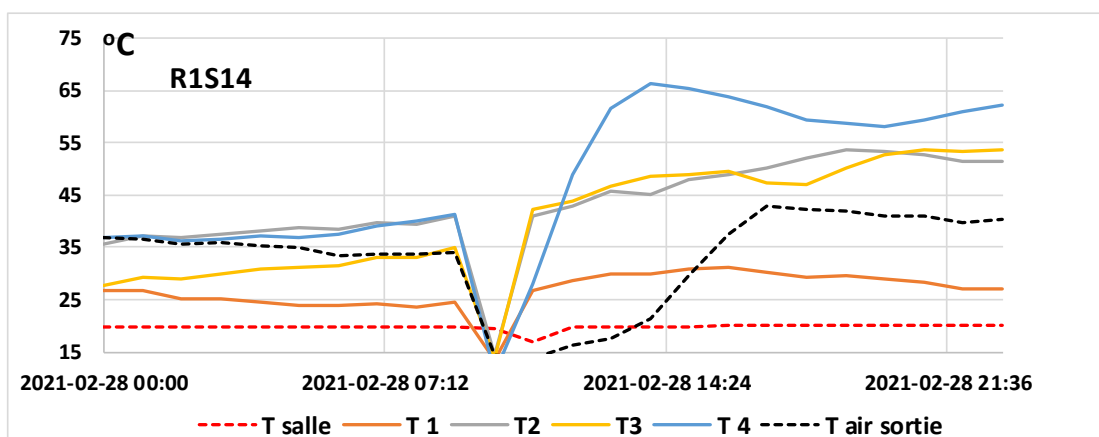
A - Figure 13. Variation des températures en régime stabilisé R1S11, du 20 au 22 déc. 2020



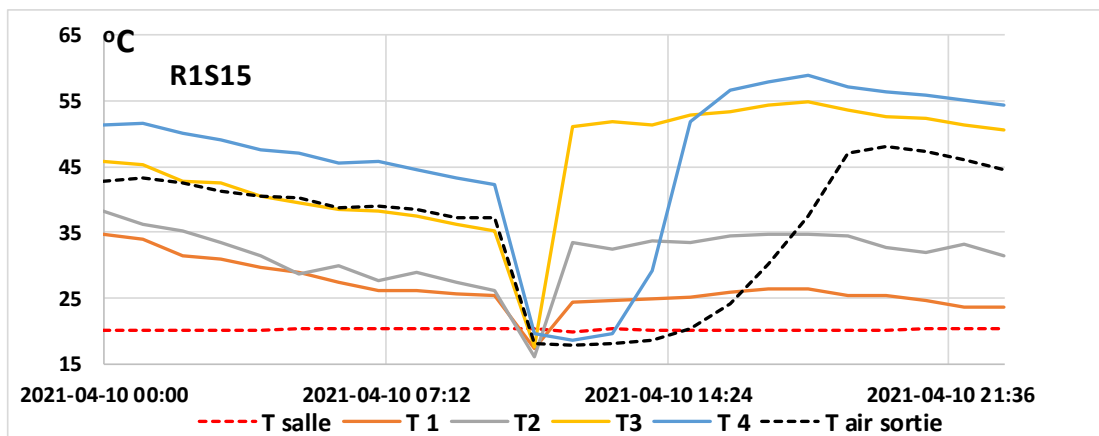
A - Figure 14. Variation des températures en régime stabilisé R1S12, du 9 au 11 janv. 2021



A - Figure 15. Variation des températures en régime stabilisé R1S13, le 26 janv. 2021

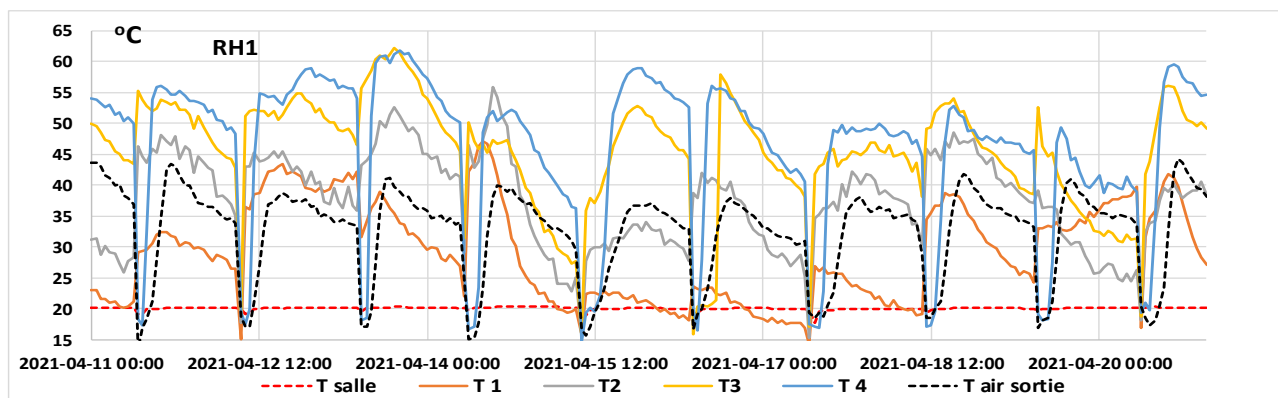


A - Figure 16. Variation des températures en régime stabilisé R1S14, le 28 février 2021

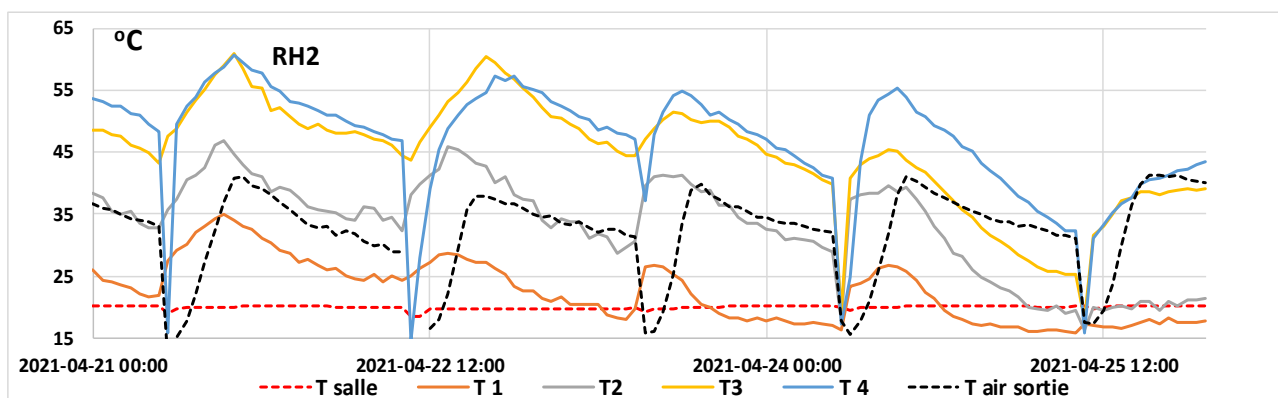


A - Figure 17. Variation des températures en régime stabilisé R1S15, le 10 avril 2021

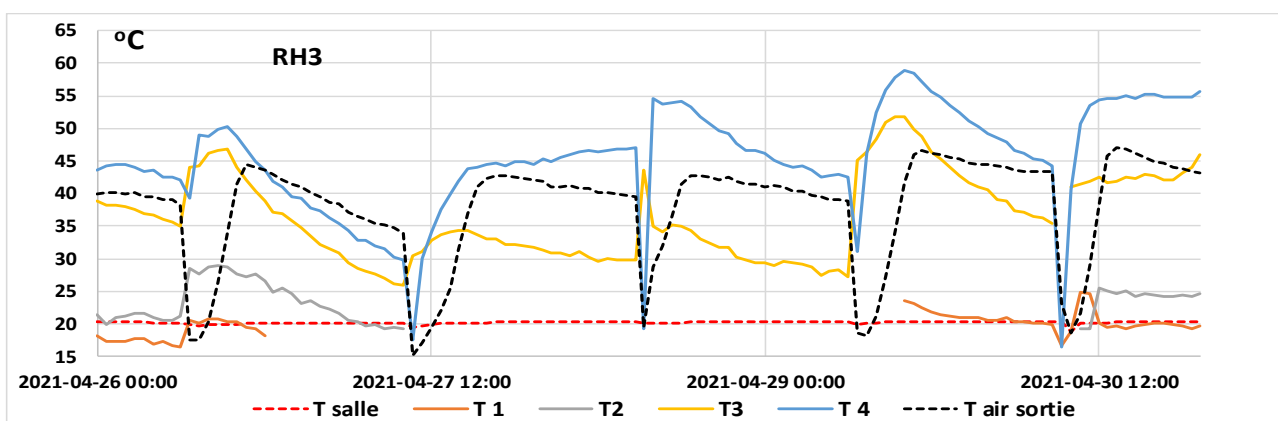
A3. VARIATION DES TEMPÉRATURES POUR LE BIOSÉCHAGE DU FPP EN RÉGIME D'HYGIÉNISATION



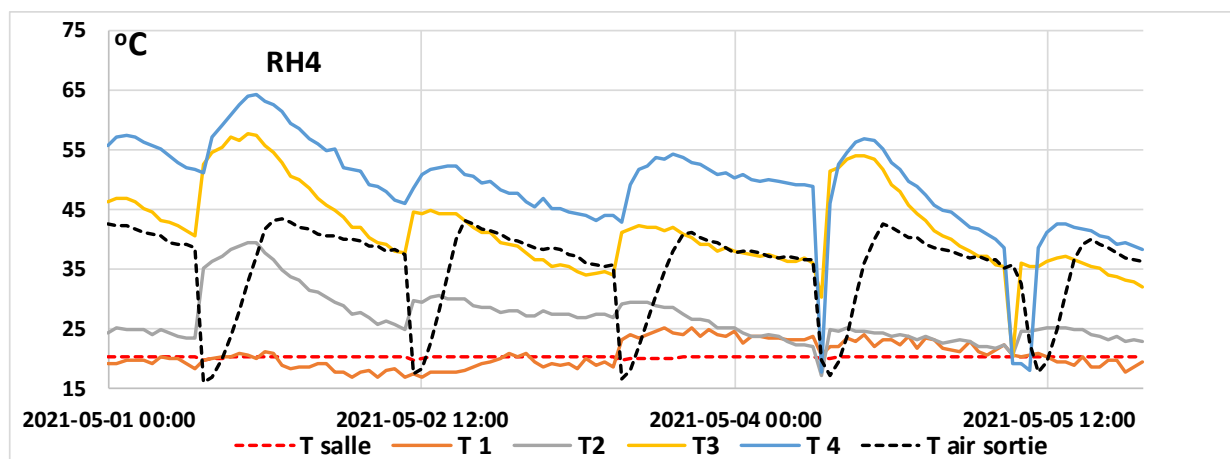
A - Figure 18. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH1, du 11 au 20 avril 2021



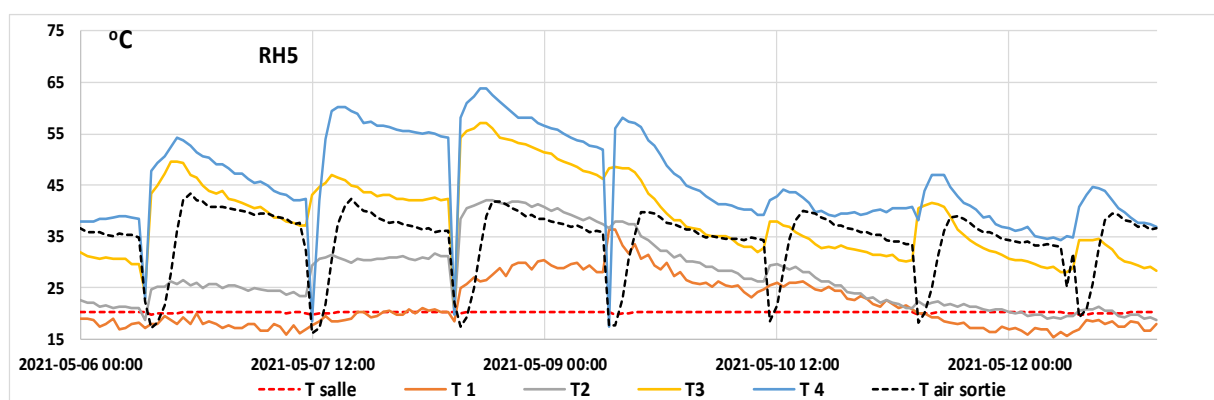
A - Figure 19. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH2, du 21 au 25 avril 2021



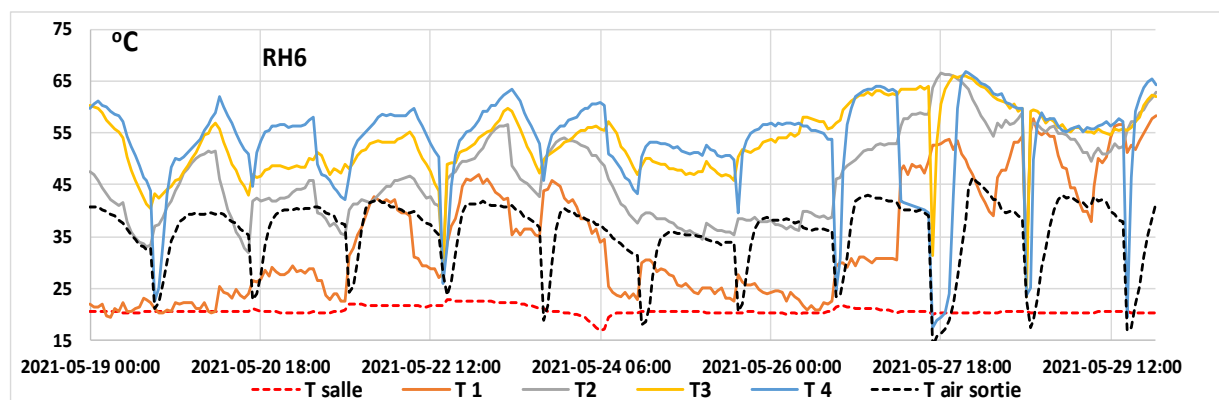
A - Figure 20. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH3, du 26 au 30 avril 2021



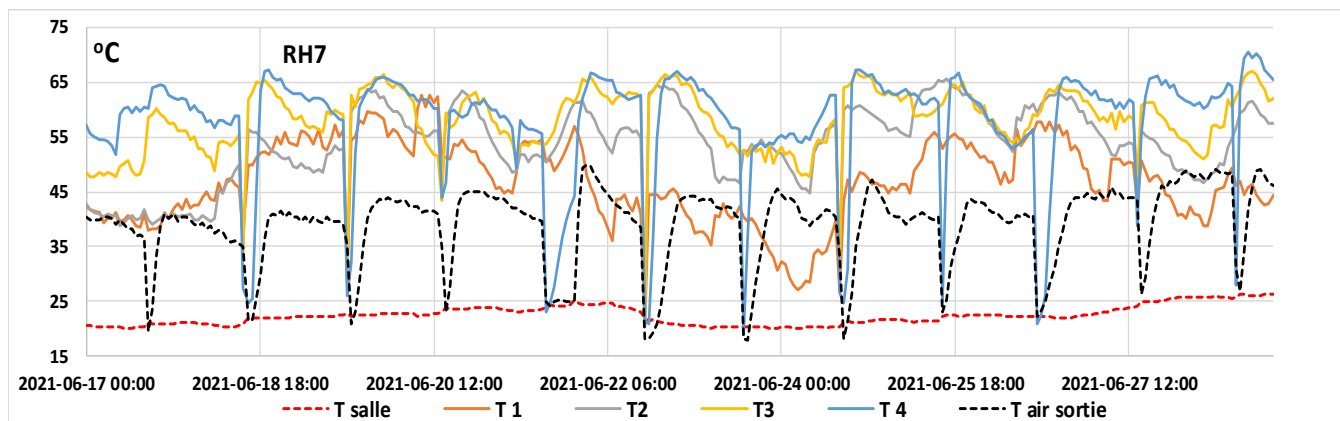
A - Figure 21. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH4, du 1^{er} au 5 mai 2021



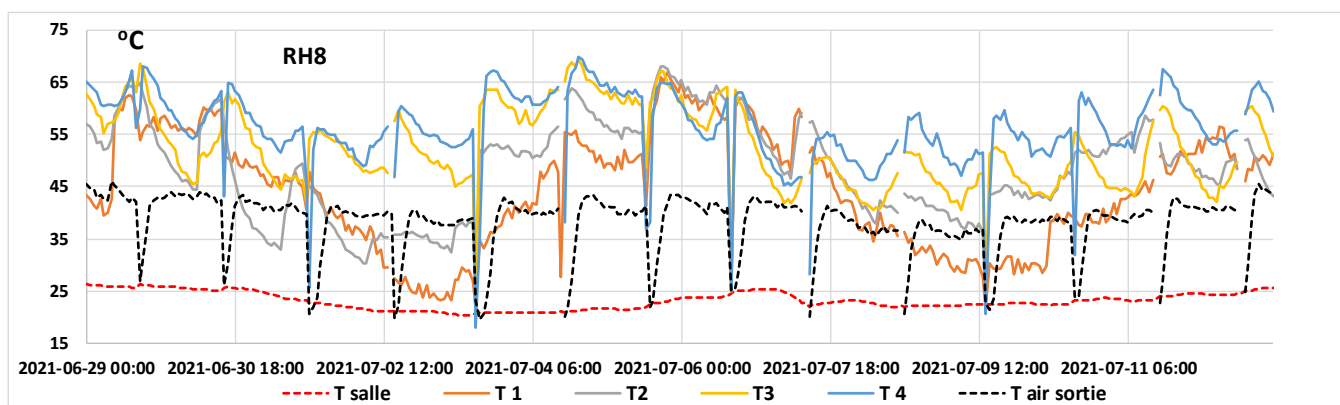
A - Figure 22. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH5, du 6 au 12 mai 2021



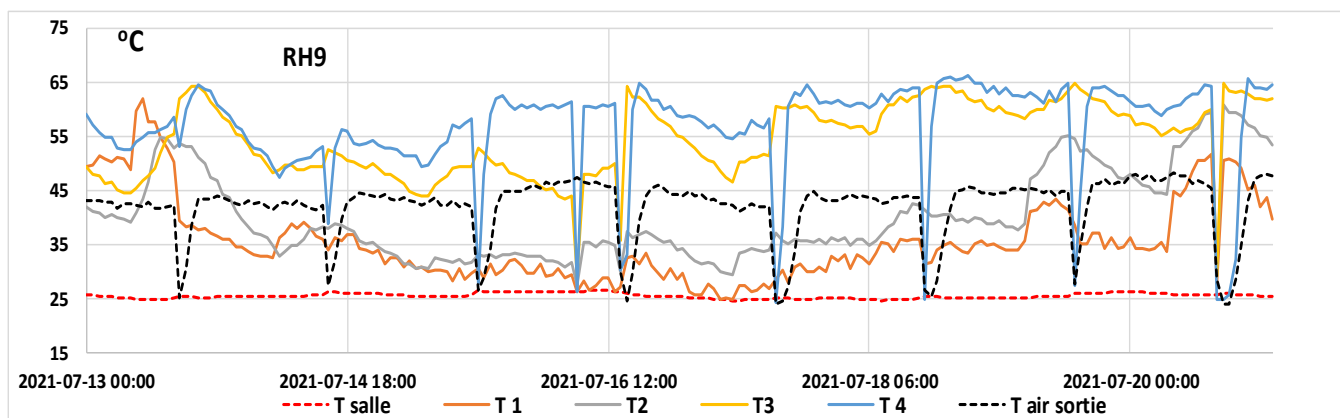
A - Figure 23. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH6, du 19 au 29 mai 2021



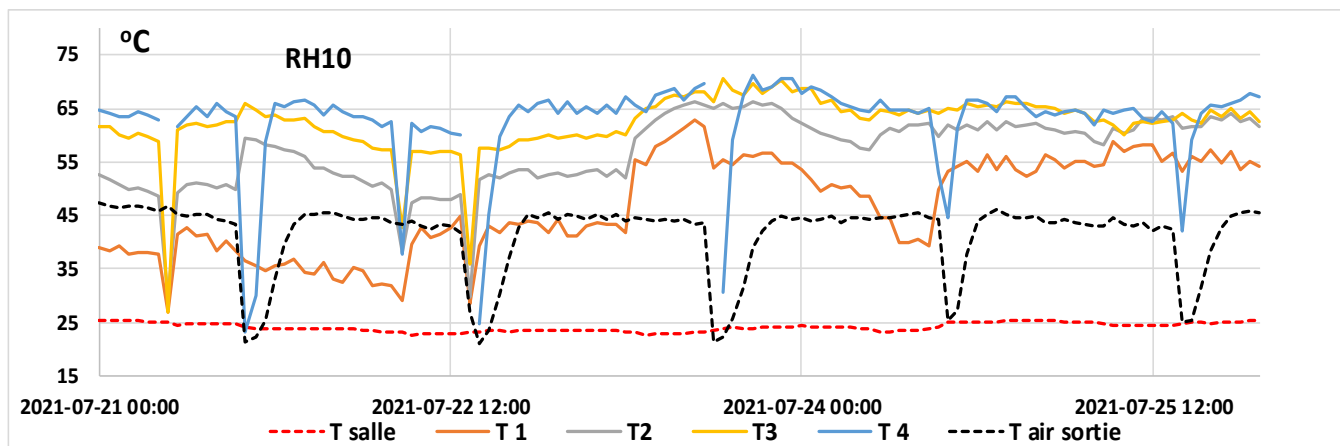
A - Figure 24. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH7, du 17 au 27 juin 2021



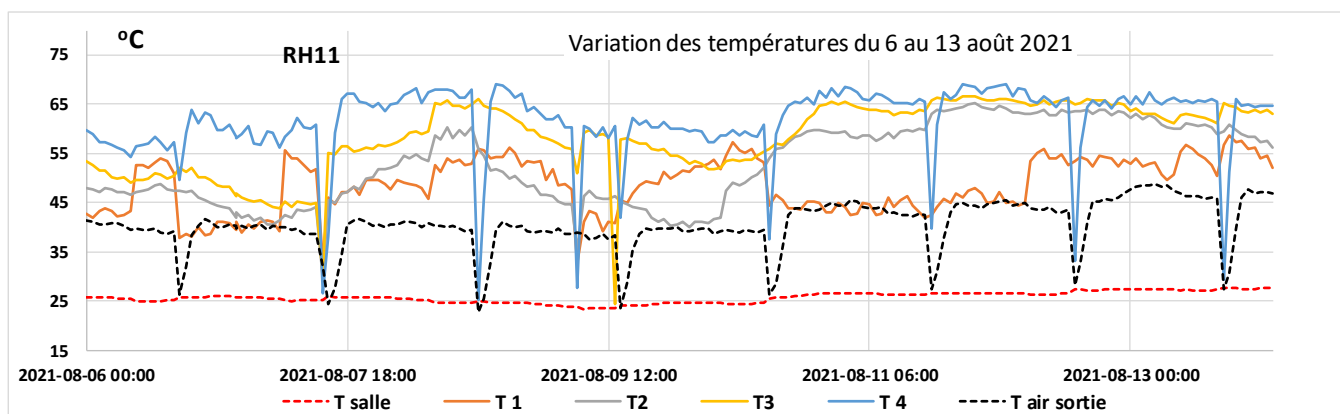
A - Figure 25. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH8, du 29 juin - 11 juillet 2021



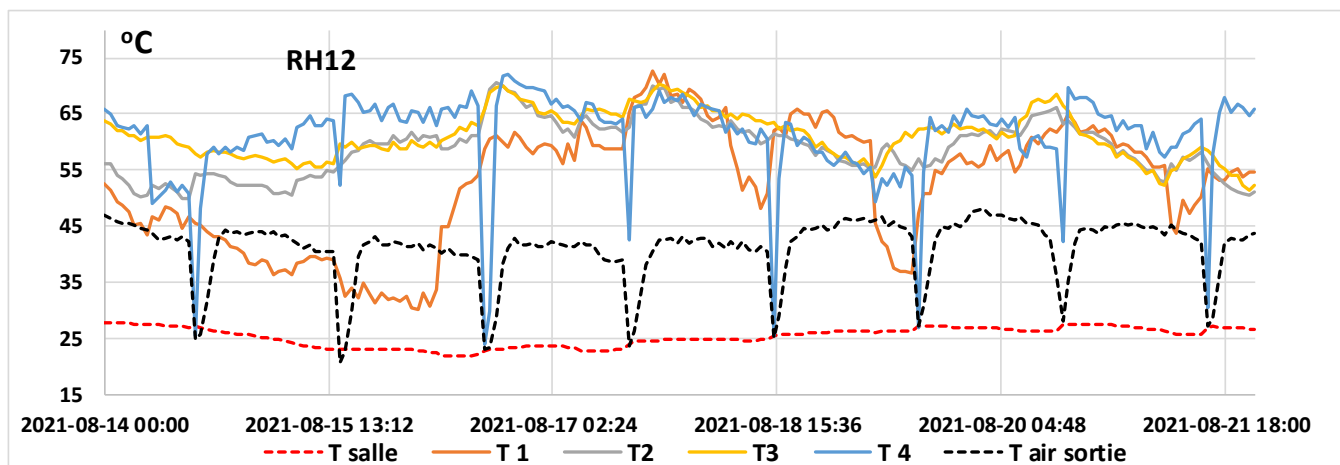
A - Figure 26. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH9, du 13-20 juillet 2021



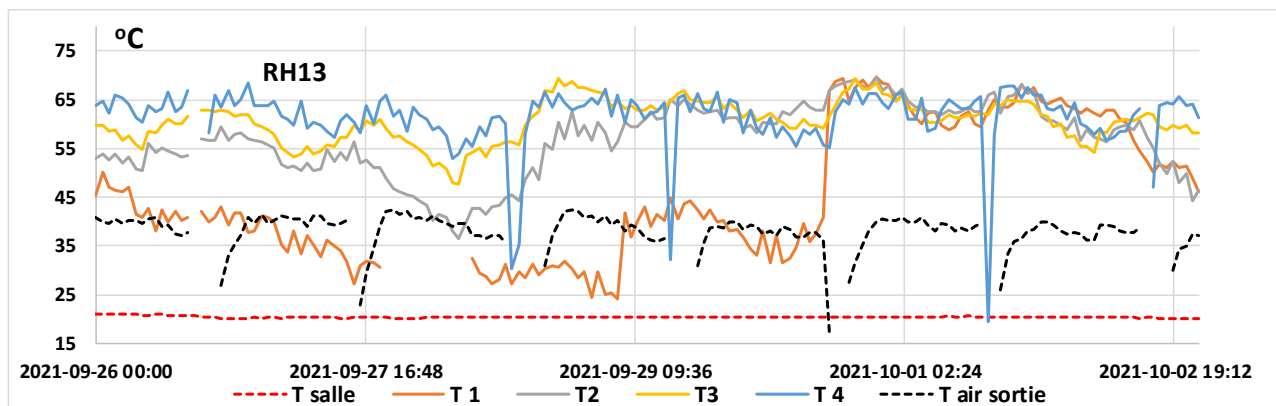
A - Figure 27. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH10, du 21 au 25 juillet 2021



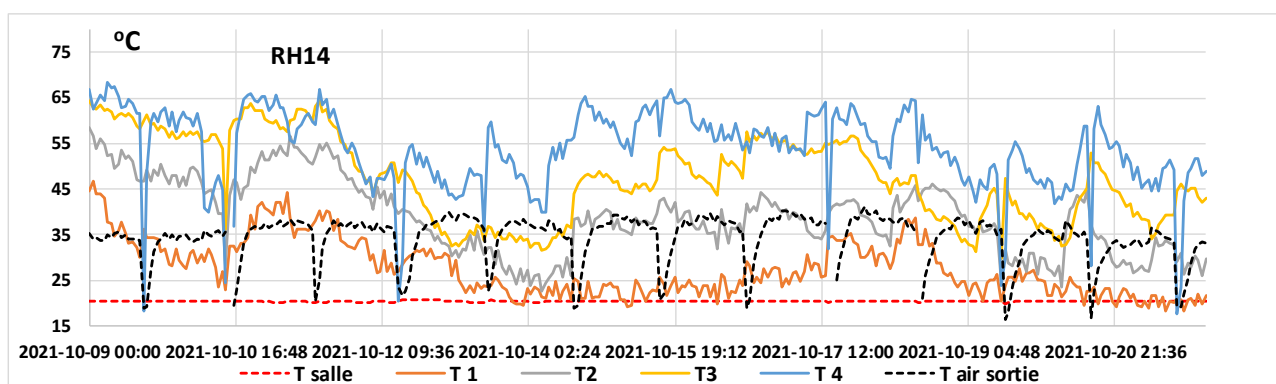
A - Figure 28. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH11, du 6 au 13 août 2021



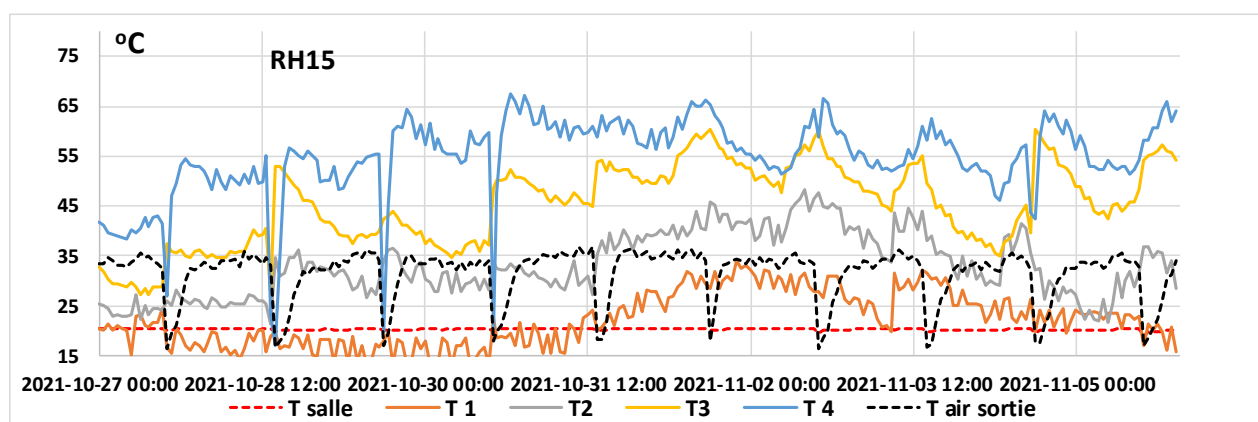
A - Figure 29. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH12, du 14 au 21 août 2021



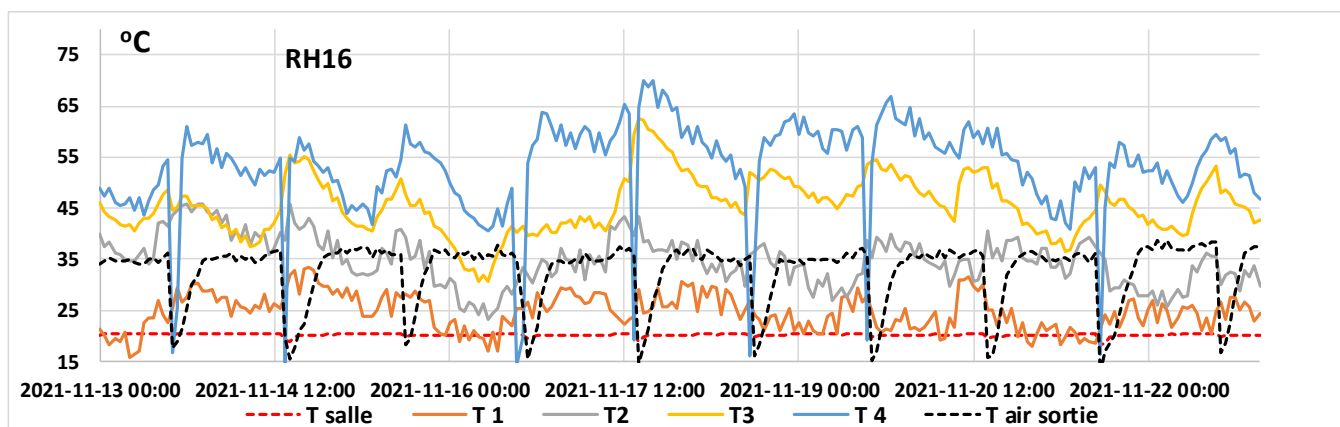
A - Figure 30. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH13, du 26 sept. au 2 oct. 2021



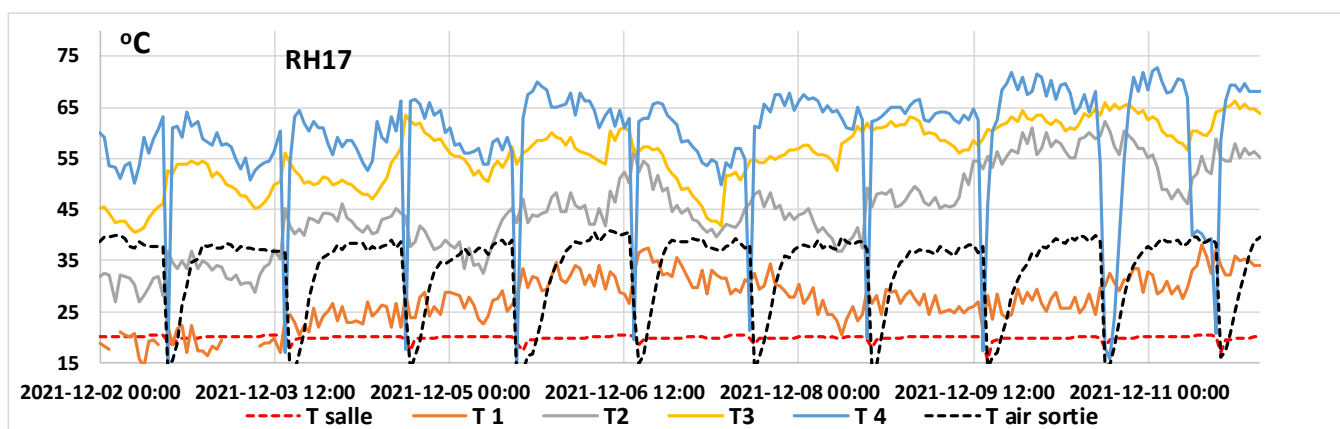
A - Figure 31. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH14, du 9 au 21 oct. 2021



A - Figure 32. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH15, du 27 oct. au 11 nov. 2021



A - Figure 33. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH16, du 13 au 22 nov. 2021



A - Figure 34. Variation des températures en régime d'hygiénisation RH17, du 2 au 22 déc. 2021