LA REVUE INRAE PRODUCTIONS ANIMALES

INRAE

INRAE Prod. Anim., 2026, 39(3), 9510

Fermentation du tourteau de colza : une technologie d'avenir pour l'alimentation des volailles françaises ?

Valérie HEUZÉ[1], Patrick CARRÉ[2], Isabelle DE LA BORDE[2, 3], Élodie TORMO[3], Gilles TRAN[1]
[1]Association Française de Zootechnie, 91120, Palaiseau, France
[2]Terres Inovia, 75008, Paris, France
[3]Terres Univia, 75008, Paris, France
Courriel : valerie.heuze@zootechnie.fr

■ **Le tourteau de colza fermenté suscite un intérêt croissant en alimentation des volailles dans le monde, car la fermentation peut réduire certains facteurs antinutritionnels et modifier la valeur nutritionnelle de ce tourteau. Des données récentes rapportent des effets favorables sur les performances zootechniques, la santé digestive et le microbiote, mais qui dépendent de l'espèce animale, du type de production, du taux d'incorporation et du procédé de fermentation utilisé. En revanche, les données économiques et environnementales manquent encore.**

Introduction

Les tourteaux de colza (TC[1]) sont des coproduits abondants, appréciés pour leur richesse en protéines et leurs qualités nutritionnelles. En France, en 2023, 2,33 millions de tonnes de TC ont été utilisées en alimentation animale, dont 9,2 % pour les volailles de chair ; le TC représentait ainsi 4,2 % des aliments volailles (Oriflaam, 2024). Disponible localement et déjà utilisé dans les aliments composés, il constitue une alternative partielle au tourteau de soja, notamment dans un contexte de recherche d'autonomie protéique. Son utilisation en alimentation avicole reste toutefois limitée par plusieurs caractéristiques nutritionnelles : une teneur élevée en fibres, une moindre teneur en lysine par rapport au tourteau de soja, et la présence de facteurs antinutritionnels, en particulier les glucosinolates et les phytates (Heuzé *et al.*, 2020 ; INRAE *et al.*, 2026).

Parmi les procédés susceptibles d'améliorer la valeur alimentaire du TC, la fermentation suscite un intérêt croissant. En modifiant le tourteau sous l'action de microorganismes, elle peut contribuer à réduire certains facteurs antinutritionnels, transformer la fraction protéique, libérer des composés de plus faible poids moléculaire et modifier la disponibilité de certains nutriments. Ces effets peuvent ensuite se traduire, chez l'animal, par des réponses sur la digestibilité, les performances zootechniques, la santé digestive, le statut antioxydant ou encore le microbiote intestinal.

Les résultats disponibles restent cependant hétérogènes. Les études diffèrent par le type de tourteau utilisé, les microorganismes mis en œuvre, les conditions de fermentation, les espèces animales étudiées et les niveaux d'incorporation dans les régimes. De plus, les comparaisons expérimentales ne portent pas toujours sur les mêmes témoins : certaines évaluent l'effet de la fermentation par comparaison au tourteau de colza non fermenté (TC), tandis que d'autres testent le tourteau de colza fermenté (TCF) en substitution partielle au tourteau de soja (TS). Cette diversité rend nécessaire une analyse séparée des effets propres de la fermentation et de l'intérêt pratique du TCF dans les régimes avicoles.

La revue bibliographique présentée ici analyse les travaux publiés entre 2020 et 2025 sur le TCF en alimentation des volailles. Elle examine successivement les effets de la fermentation sur la composition chimique, les facteurs antinutritionnels, la valeur nutritionnelle, les

1 Les abréviations définies à leur première occurrence dans le texte sont rappelées dans une liste à la fin de l'article.

performances zootechniques, la santé, l'écosystème microbien intestinal et la qualité des produits animaux. Les dimensions économiques et environnementales sont également discutées, bien qu'elles soient encore peu documentées. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure le TCF peut constituer une voie de valorisation du colza en alimentation avicole, et quelles questions restent à résoudre pour envisager son utilisation dans les conditions françaises.

1. Méthodologie de la revue bibliographique

Cette revue bibliographique porte sur les travaux publiés entre 2020 et 2025 concernant le TCF et son utilisation en alimentation des volailles. Elle a été conduite dans la base *CAB Abstracts* sur la période 2020-2025.

La requête a été construite de façon à inclure les différentes dénominations du tourteau de colza ou de canola, les termes liés à la fermentation, ainsi que des mots-clés relatifs à la nutrition, aux performances zootechniques, à la santé, à l'environnement et aux volailles. Après sélection, le corpus analysé a été centré sur les études portant sur l'alimentation des volailles, complétées par des articles décrivant les effets de la fermentation du tourteau de colza/canola sur sa composition chimique, ses facteurs antinutritionnels, même lorsqu'ils ne comportaient pas directement d'essai sur volailles.

Les informations extraites ont été compilées dans une matrice d'analyse recensant, pour chaque étude, la nature du tourteau utilisé, les microorganismes employés, les conditions de fermentation, le type d'animal, l'âge ou le stade physiologique, le niveau d'incorporation, la nature du régime témoin et les principaux effets observés. Les résultats ont été classés par grandes catégories : composition chimique, facteurs antinutritionnels, valeur nutritionnelle, performances zootechniques, paramètres de santé, microbiote intestinal, qualité des produits animaux, économie et environnement.

Lorsque les données le permettaient, les effets de la fermentation ont été analysés en distinguant deux types de comparaisons : d'une part, les comparaisons entre TCF et TC, permettant d'évaluer l'effet propre de la fermentation ; d'autre part, les comparaisons entre régimes contenant du TCF et régimes témoins à base de tourteau de soja, permettant d'apprécier l'intérêt pratique du TCF comme ingrédient de substitution partielle.

Pour les variables de composition chimique, de facteurs antinutritionnels et de valeur nutritionnelle, les variations ont été exprimées en pourcentage par rapport au TC, selon la formule : (TCF – TC) × 100 / TC. Ces variations comparent les teneurs rapportées dans les produits avant et après fermentation ; elles ne constituent pas des bilans matière et ne prennent pas en compte les pertes de matière lorsque celles-ci ne sont pas rapportées. Lorsque le nombre d'observations le permettait, une analyse statistique exploratoire des variations a été réalisée par test t de Student à un échantillon, en comparant les variations moyennes à la valeur zéro. Les résultats ont été interprétés en tenant compte du faible nombre d'observations disponibles pour certains paramètres et de l'hétérogénéité des études. Cette analyse ne constitue pas une méta-analyse au sens strict, car les comparaisons ne portent pas sur des traitements fermentaires standardisés. Les souches microbiennes, les substrats, les durées d'incubation, les conditions d'humidité, les traitements associés et les niveaux d'incorporation diffèrent fortement selon les études. La dispersion qui en résulte augmente le risque de ne pas mettre en évidence d'effet moyen significatif, même lorsque certains procédés fermentaires sont efficaces pour un critère donné. Une valeur de p supérieure à 0,05 ne doit donc pas être interprétée comme l'absence d'effet possible de la fermentation, mais comme l'absence d'un effet moyen robuste dans l'ensemble hétérogène des observations disponibles.

2. Le tourteau de colza/canola (TC)

Le tourteau de colza ou de canola constitue une alternative courante au tourteau de soja en raison de sa teneur en protéines brutes (PB), de 38,1 ± 1,3 % dans les tourteaux de colza de type 00 et de 41,0 ± 2,3 % dans les tourteaux de canola. Il est toutefois moins riche en lysine (LYS ; 5,3 % de la PB), mais contient davantage d'acides aminés soufrés, méthionine (MET) et cystine (CYS), qui représentent ensemble 4,4 % de la PB. Il est également plus riche en cellulose brute (CB ; 14,3 ± 1,2 % de la matière sèche, MS) et surtout en lignine (9,7 ± 1,2 % de la MS, contre moins de 1 % pour le TS) (INRAE *et al.*, 2026). Sa moindre teneur en LYS, sa richesse en fibres et la présence de facteurs antinutritionnels limitent son utilisation en alimentation avicole (Heuzé *et al.*, 2020).

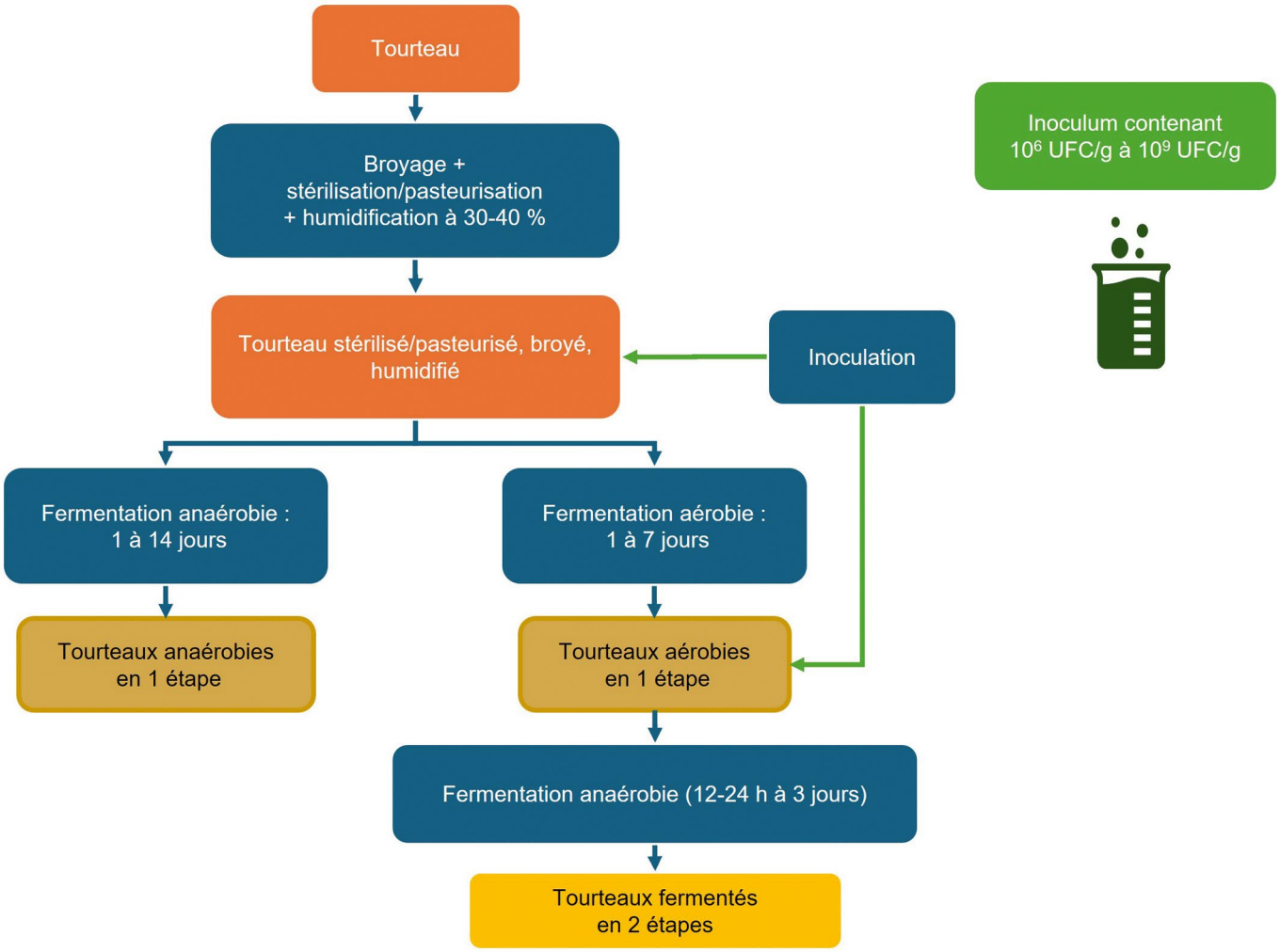
3. La fermentation

La majorité des articles étudiés décrivent des fermentations en milieu solide (figure 1). Dans ce type de procédé, le tourteau est humidifié, inoculé avec une ou plusieurs espèces microbiennes, puis incubé pendant une durée variable selon les protocoles. Les conditions rapportées dans les études reposent le plus souvent sur un taux d'humidité de l'ordre de 30 à 40 %, une température d'incubation autour de 37 °C et une durée de fermentation comprise entre 1 et 14 jours.

Les microorganismes utilisés sont divers. Les essais recensés mobilisent dix genres microbiens : quatre genres de champignons filamenteux (*Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Neurospora* et *Rhizopus*), un genre de levure (*Saccharomyces*) et cinq genres bactériens (*Bacillus*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Enterococcus* et *Erwinia*). Les bactéries, en particulier *Bacillus* spp. et *Lactobacillus* spp., sont les plus fréquemment représentées dans les essais conduits chez les volailles.

Certains protocoles associent la fermentation à des étapes préalables ou complémentaires, comme le trempage, l'ajout d'enzymes ou des traitements thermiques. Ces étapes peuvent participer aux modifications observées du tourteau, notamment sur la réduction de certains facteurs antinutritionnels ou sur la disponibilité des nutriments. Il est donc parfois difficile d'attribuer les effets observés à la seule fermentation lorsque plusieurs traitements sont combinés.

Figure 1. ***Diagramme de fermentation.***



La fermentation a lieu à 30-40 % d'humidité, avec une inoculation d'une à quatre espèces bactériennes, fongiques ou des levures et une incubation à 37 °C pendant 1 à 14 jours.

Après fermentation, les tourteaux sont généralement séchés afin de stabiliser le produit, de limiter les risques de dégradation et de permettre son incorporation dans les aliments. Cette étape est toutefois délicate. Pour préserver la viabilité microbienne ou certaines propriétés probiotiques, on peut recourir à un séchage à température modérée, généralement inférieure à 60 °C, ce qui peut augmenter la durée et le coût du procédé (Broeckx *et al.*, 2016 ; Huang *et al.*, 2017).

La fermentation en milieu solide présente aussi des contraintes pratiques. Les étapes de pasteurisation ou de stérilisation, l'humidification, le contrôle de la température, le séchage et le broyage peuvent être coûteux en énergie et en main-d'œuvre (Couto & Sanromán, 2006 ; Mitchell *et al.*, 2006 ; Pandey *et al.*, 2008). Les tourteaux fermentés peuvent former des grumeaux difficiles à sécher et à manipuler, tandis que le broyage peut générer des particules fines, avec des risques accrus de pertes et de contamination (Schutyser *et al.*, 2004 ; Chen *et al.*, 2013). Enfin, le métabolisme microbien entraîne généralement une perte de matière sèche, ce qui constitue un point important pour l'évaluation économique du procédé (Pandey *et al.*, 2008).

Ces contraintes expliquent l'importance d'évaluer le procédé dans sa globalité, mais elles ne doivent pas masquer l'intérêt potentiel du TCF. Après fermentation, le TCF présente des propriétés différentes de celles du tourteau brut. Ces modifications peuvent concerner la fraction protéique, avec une hydrolyse partielle en peptides ou en composés de plus faible poids moléculaire, la teneur en facteurs antinutritionnels, la disponibilité de certains nutriments, ou encore la présence d'acides organiques et de composés bioactifs. Ces nouvelles caractéristiques peuvent contribuer à expliquer certains effets observés chez l'animal, notamment sur la digestibilité, l'environnement digestif, le microbiote intestinal ou le statut antioxydant. Les sections suivantes examinent donc dans quelle mesure ces propriétés se traduisent par des bénéfices mesurables sur la composition du tourteau et son utilisation en alimentation avicole.

4. Effets de la fermentation sur la composition chimique des tourteaux

■ 4.1. Analyse de la composition proximale

Les données de composition chimique analysées ici proviennent d'articles publiés entre 2020 et 2025 rapportant

Tableau 1. ***Variations de la composition proximale du TCF exprimée en % : (TCF – TC) × 100 / TC.***

Tourteau de départ	Microorganismes utilisés	MS	PB	MG	CB	MM	LYS	MET	Source
TC (canola)	*Aspergillus niger*		8,1		–6,0		–6,3	–11,4	Alhomodi *et al.* (2022)
	Aureobasidium pullulans		3,1		12,7		1,8	1,3	
	A. pullulans + *A. niger*		4,8		17,9		–3,1	–5,1	
	A. pullulans + *Neurospora crassa*		12,9		–9,7		2,7	3,8	
	N. crassa		9,0		–1,5		3,6	5,1	
	N. crassa + *A. niger*		9,5		6,7		1,3	2,5	
TC	*Lactobacillus acidophilus* PTCC 1643 + *Bacillus subtilis* PTCC 1156 + *A. niger* PTCC 5010	–2,2	7,3	–20,4	–47,3	23,3			Dastar *et al.* (2025)
TC (canola)	*L. fermentum* + *B. subtilis* + *A. oryzae*	0,2	6,5	3,0	2,1				Davodifar *et al.* (2020)
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *Pichia pastoris*	2,5	7,4		5,8				Drażbo *et al.* (2020)
TC	*Lactococcus lactis* ACCC10637 + *Bacillus natto* CGMCC1.1086 + *Saccharomyces cerevisiae* CICC31011		2,1		–5,7				Feng *et al.* (2025)
	Erwinia tasmaniensis B3 + *Enterococcus gallinarum* B16 + *B. subtilis* + *L. plantarum*		46,4	–62,1	–58,7	11,5			Hong *et al.* (2025)
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *P. pastoris*	6,4	4,5		–14,0				Kopacz *et al.* (2021)
TC	*B. subtilis* strain CGMCC 13131 + PROMAX® Protease	–0,3	9,4					14,0	Li *et al.* (2022)
	B. subtilis strain CGMCC 13131	–0,3	5,8					14,0	
	S. cerevisiae	–2,5	4,7	–30,9	41,9	–3,8			Taranu *et al.* (2022)
	Enterococcus faecium + *L. plantarum*	–1,0	3,5	95,3	–24,7				Vasavi *et al.* (2025)
	S. boulardii	0,2	11,7	4,6	16,5	–0,1			Vlassa *et al.* (2022)
		–2,4	10,0	–9,2	20,4	2,0			
	S. cerevisiae	–3,3	13,1	–31,5	22,2	7,5			
		–2,4	11,2	–13,1	20,1	2,4			
	L. acidophilus + *B. subtilis* + *S. cerevisiae*		10,4	1,9	–4,3				Wu *et al.* (2020)
	B. subtilis GYB6 + *S. cerevisiae* NJ1 + *B. amyloliquefaciens* Y8		16,3		–27,2				Zhu *et al.* (2023)
Moyenne		**–0,4**	**9,9**	**–6,2**	**–1,6**	**6,1**	**0,0**	**3,0**	

Abréviations : TC = tourteau de colza ; MS = matière sèche ; PB = protéines brutes ; MG = matières grasses ; CB = cellulose brute ; MM = matières minérales ; LYS = lysine ; MET = méthionine.

une comparaison directe entre un TC et le produit obtenu après fermentation de ce même substrat : le TCF. Quinze articles répondaient à ce critère, représentant au total 23 échantillons fermentés distincts. Les TC ont été regroupés dans une même analyse. Le nombre d'observations varie toutefois selon les paramètres considérés, toutes les études ne renseignant pas systématiquement l'ensemble des variables de composition.

L'analyse des 23 échantillons fermentés ne met pas en évidence d'effet moyen significatif de la fermentation sur la plupart des paramètres de composition proximale du TC (tableau 1, tableau 2).

Seule la teneur en PB montre une augmentation statistiquement significative, avec +9,9 % en moyenne. Cette hausse doit toutefois être relativisée, car elle peut refléter en partie un effet de concentration lié aux modifications de la matière sèche au cours de la fermentation. Pour les autres paramètres, les variations moyennes restent non significatives, avec une dispersion importante des valeurs observées. Cette dispersion traduit la forte hétérogénéité des études, liée à la diversité des substrats et des modalités de fermentation, et limite la mise en évidence de tendances générales.

Les teneurs en cellulose brute (CB) et en matières grasses (MG) illustrent cette absence de tendance moyenne nette. En moyenne, les variations observées sont respectivement de –1,7 % pour la CB et de –6,2 % pour la MG, des diminutions non significatives dans les deux cas (tableau 2). L'amplitude des réponses observées entre études reste importante et traduit une forte variabilité selon les types de fermentation (microorganismes, substrats et conditions de fermentation). Par exemple, les fermentations mettant en œuvre des levures seules, notamment *Saccharomyces cerevisiae* ou *S. boulardii*, semblent plus souvent associées à une hausse de la CB tandis que plusieurs fermentations bactériennes ou mixtes sont associées à une diminution de ce paramètre. Toutefois, le faible nombre d'observations par groupe et l'hétérogénéité des procédés ne permettent pas d'attribuer formellement ces différences au seul type de microorganismes. Les variations de teneur en MG ne font pas apparaître de relation claire avec la nature du microorganisme fermentaire.

Tableau 2. ***Analyse statistique des variations de composition proximale liées à la fermentation du tourteau de colza/canola.***

Paramètre	MS	PB	MG	CB	MM	LYS	MET
N	12	22	10	20	7	6	8
Moyenne variation (%)	–0,4	9,9	–6,2	–1,6	6,1	0,0	3,0
SD	2,7	8,9	41,1	24,3	9,1	3,9	8,6
Min (%)	–3,3	2,1	–62,1	–58,7	–3,8	–6,3	–11,4
Max (%)	6,4	46,4	95,3	41,9	23,3	3,6	14,0
p-value	0,59	< 0,01	0,64	0,77	0,13	1,00	0,35
Signification	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non

Abréviations : N = nombre de comparaisons ; MS = matière sèche ; PB = protéines brutes ; MG = matières grasses ; CB = cellulose brute ; MM = matières minérales ; LYS = lysine ; MET = méthionine.

L'augmentation de la teneur en protéines brutes est fréquemment observée après fermentation (Alhomodi *et al.*, 2022 ; Vlassa *et al.*, 2022 ; Zhu *et al.*, 2023). Elle peut refléter à la fois un effet de concentration lié aux pertes de matière sèche et, selon le procédé utilisé, la contribution de la biomasse microbienne formée au cours de la fermentation (Wu *et al.*, 2020 ; Alhomodi *et al.*, 2022). L'activité microbienne peut également hydrolyser partiellement les protéines en peptides et en acides aminés de plus faible poids moléculaire (Li *et al.*, 2022 ; Zhu *et al.*, 2023). Cette hydrolyse modifie la forme de la fraction azotée, mais n'augmente pas à elle seule l'azote total mesuré. En l'absence de bilan matière et d'azote, les données disponibles ne permettent ni de quantifier la part respective de ces mécanismes ni de réellement conclure à un enrichissement net en protéines du produit initial.

Les effets de la fermentation sur les principaux acides aminés étudiés, à savoir LYS et MET, apparaissent encore plus hétérogènes. Pour la LYS comme pour la MET, les variations observées d'une étude à l'autre sont tantôt positives, tantôt négatives, sans qu'une tendance globale moyenne significative ne puisse être mise en évidence (tableau 2). Les données disponibles suggèrent toutefois que la lysine est le plus souvent préservée, alors que la méthionine paraît plus sensible aux conditions de fermentation et peut, dans certains cas, diminuer nettement (Davodifar *et al.*, 2020 ; Alhomodi *et al.*, 2022). Cette différence pourrait s'expliquer par une plus grande sensibilité des AA soufrés aux transformations induites par la fermentation. Dans l'étude de Li *et al.* (2022), la teneur en méthionine augmente numériquement après fermentation, (+14 %), ainsi que la digestibilité des AA soufrés si la fermentation est complétée d'une protéase.

■ 4.2. Analyse de la composition minérale

L'analyse des variations de la composition minérale ne met pas en évidence d'effet statistiquement significatif de la fermentation sur la teneur en phosphore phytique (tableau 3, tableau 4 ; quatre comparaisons). La diminution moyenne observée pourrait être liée à une activité phytase associée à certains procédés ou enzymes ajoutées, mais cette activité n'est pas toujours mesurée directement. Des hausses moyennes significatives sont également observées pour les teneurs en

Tableau 3. ***Variations en minéraux liées à la fermentation en %.***

Tourteau de départ	Microorganismes	Ca	P	P phytique	Mg	Fe	Cu	Source
TC (canola)	*Lactobacillus fermentum* + *Bacillus subtilis* + *Aspergillus oryzae*	18,4	12,7					Davodifar *et al.* (2020)
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *Pichia pastoris*			–94,8				Drażbo *et al.* (2020)
TC	*B. subtilis* strain CGMCC 13131			–19,2				Li *et al.* (2022)
	B. subtilis strain CGMCC 13131 + PROMAX® Protease			–25,6				
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *Pichia pastoris*			–48,2				Orlich *et al.* (2023)
TC	*Enterococcus faecium* + *Lactobacillus plantarum*	–3,2	–12,8					Vasavi *et al.* (2025)
	Saccharomyces boulardii	1,8	0,7		23,3	–4,1	138,8	
		0,0	0,7		24,7	6,1	135,2	
	Saccharomyces cerevisiae	5,5	4,3		12,3	0,9	125,5	
		0,0	4,3		20,5	6,0	130,3	
Moyenne		**3,7**	**1,7**	**–47,0**	**20,2**	**2,2**	**132,4**	

Abréviations : TC = tourteau de colza ; Ca = calcium ; P = phosphore ; P phytique = phosphore phytique ; Mg = magnésium ; Fe = fer ; Cu = cuivre.

Tableau 4. ***Analyse statistique des variations en minéraux.***

	Ca	P	P phytique	Mg	Fe	Cu
N	6	6	4	4	4	4
Moyenne (%)	3,7	1,7	-47,0	20,2	2,2	132,4
Écart-type	7,7	8,3	34,2	5,5	4,8	5,8
Min (%)	-3,2	-12,8	-94,8	12,3	-4,1	125,5
Max (%)	18,4	12,7	-19,2	24,7	6,1	138,8
p-value	0,29	0,65	0,07	< 0,01	0,42	< 0,01
Signification	Non	Non	Non	**Oui****	Non	**Oui*****

Abréviations : N = nombre de comparaisons ; Ca = calcium ; P = phosphore ; P phytique = phosphore phytique ; Mg = magnésium ; Fe = fer ; Cu = cuivre.
Test utilisé : test du t de Student. Signification : ns $p \geq 0,05$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

magnésium et en cuivre, alors que les variations (à la hausse) des teneurs en calcium, phosphore total et fer ne sont pas significatives. Le très faible nombre d'observations disponibles pour plusieurs minéraux appelle à la prudence dans l'interprétation de ces valeurs. Par exemple, l'ampleur de la hausse observée pour le cuivre pourrait dépendre des conditions expérimentales puisque les données ne viennent que d'un seul article (Vasavi *et al.*, 2025).

En conclusion, la fermentation modifie la composition chimique du tourteau de colza/canola de manière sélective plutôt que globale. Les effets les plus robustes concernent l'augmentation apparente de la teneur en protéines brutes et la réduction des glucosinolates. Une diminution moyenne du phosphore phytique est observée, sans être statistiquement significative dans l'analyse globale. En revanche, les autres paramètres proximaux, les acides aminés et la plupart des minéraux présentent des réponses hétérogènes, dépendantes du substrat initial, des microorganismes utilisés et des conditions de fermentation.

Tableau 5. ***Analyse des variations de facteurs antinutritionnels.***

Tourteau de départ	Microorganismes utilisés	Glucosinolates (%)	Acide phytique (%)	Tannins (%)	Source
TC (canola)	*Aureobasidium pullulans*	–44,0	3,8		Alhomodi *et al.* (2022)
	Neurospora crassa	0,0	–7,7		
	Aspergillus niger	24,0	–46,2		
	A. pullulans + *N. crassa*	–28,0	–7,7		
	A. pullulans + *A. niger*	–52,0	3,8		
	N. crassa + *A. niger*	16,0	–11,5		
TC	*Lactobacillus acidophilus* PTCC 1643 + *Bacillus subtilis* PTCC 1156 + *A. niger* PTCC 5010	–67,8	–82,8	–58,5	Dastar *et al.* (2025)
TC (canola)	*Lactobacillus fermentum* + *B. subtilis* + *A. oryzae*	–51,4			Davodifar *et al.* (2020)
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *Pichia pastoris*	–89,8			Drażbo *et al.* (2020)
TC	*Lactococcus lactis* ACCC10637 + *Bacillus natto* CGMCC1.1086 + *Saccharomyces cerevisiae* CICC31011	–54,4			Feng *et al.* (2025)
	B. subtilis 67	–81,2			Konkol *et al.* (2024)
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *Pichia pastoris*	–94,0			Kopacz *et al.* (2021)
TC	*B. subtilis* strain CGMCC 13131	–49,0			Li *et al.* (2022)
	B. subtilis strain CGMCC 13131 + PROMAX® Protease	–71,6			
TC gras	Fermentation spontanée + 6-phytase exprimée dans *Pichia pastoris*	–94,0			Orlich *et al.* (2023)
TC	*L. acidophilus* + *B. subtilis* + *S. cerevisiae*	–52,6			Wu *et al.* (2020)
	Lactobacillus + *Bacillus subtilis*	–11,2		–35,8	Zhou *et al.* (2020)
	B. subtilis GYB6 + *S. cerevisiae* NJ1 + *B. amyloliquefaciens* Y8	–99,5	–42,4	–34,1	Zhu *et al.* (2023)
	Erwinia tasmaniensis B3 + *Enterococcus gallinarum* B16 + *B. subtilis* + *L. plantarum*			–82,1	Hong *et al.* (2025)
Moyenne		**–50,0**	**–23,8**	**–52,6**	

Abréviations : TC = tourteau de colza.

5. Effets de la fermentation sur les facteurs antinutritionnels des tourteaux

Si certaines études rapportent des diminutions marquées de facteurs antinutritionnels après fermentation, ces effets ne sont pas observés avec la même constance pour l'ensemble des composés étudiés (tableau 5, tableau 6). L'analyse statistique montre une réduction significative des glucosinolates (18 observations) et des tannins (4 observations). En revanche, l'effet de la fermentation sur l'acide phytique n'apparaît pas statistiquement significatif, malgré huit comparaisons disponibles. Il en est de même pour les autres facteurs antinutritionnels : les données restent trop limitées pour permettre de conclure, avec seulement trois observations pour les polysaccharides non amylacés (NSP)

Tableau 6. ***Analyse statistique des variations de facteurs antinutritionnels.***

Indicateur	Glucosinolates (%)	Acide phytique (%)	Tannins (%)
N	18	8	4
Moyenne (%)	–50,0	–23,8	–52,6
Écart-type	37,6	30,5	22,6
Min (%)	–99,5	–82,8	–82,1
Max (%)	24,0	3,8	–34,1
p-value	< 0,01	0,06	0,02
Signification	**Oui****	Non	**Oui***

Abréviations : N = nombre de comparaisons.
Test utilisé : test du t de Student. Signification : ns p ≥ 0,05 ; * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001.

(Drażbo *et al.*, 2020 ; Goodarzi Boroojeni *et al.*, 2022 ; Orlich *et al.*, 2023) et une seule pour la goitrine (Zhou *et al.*, 2020).

Les réductions les plus nettes et les plus cohérentes de facteurs antinutritionnels liées à la fermentation concernent les glucosinolates, et sont généralement attribuées à des phénomènes d'hydrolyse enzymatique au cours du procédé (Vlassa *et al.*, 2022 ; Zhu *et al.*, 2023). Pour l'acide phytique et les NSP, leur réduction semble davantage dépendre des conditions de fermentation, plusieurs auteurs reliant leur diminution à l'action d'enzymes spécifiques, qu'elles soient d'origine microbienne ou parfois ajoutées au procédé (Goodarzi Boroojeni *et al.*, 2022 ; Li *et al.*, 2022 ; Zhu *et al.*, 2023). La diminution des tannins est également observée, mais elle reste moins discutée et semble constituer un enjeu nutritionnel moins crucial que celui des glucosinolates (Vlassa *et al.*, 2022 ; Zhu *et al.*, 2023).

En conclusion, la fermentation du TC réduit les glucosinolates de manière nette et régulière. La baisse des tannins est également observée, mais sur un nombre limité d'études. La baisse moyenne de l'acide phytique n'est pas statistiquement significative. Pour les NSP et les autres composés, les données restent trop limitées pour conclure. La réduction des facteurs antinutritionnels constitue donc un bénéfice important du TCF, mais d'ampleur variable selon les composés et les conditions de fermentation.

6. Effets de la fermentation sur la valeur nutritionnelle du tourteau de colza

Les variations des valeurs nutritionnelles liées à la fermentation du tourteau de colza ont été calculées pour tous les cas de la littérature où une comparaison TC (tourteau non traité) *vs* TCF (tourteau fermenté) était disponible, soit sept articles correspondant à 11 échantillons (dispositifs expérimentaux). Les variations d'EMA (énergie métabolisable apparente), EMAn (énergie métabolisable apparente corrigée pour l'azote), et des digestibilités (MS, PB, MG et FB) sont en moyenne positives (tableau 7). Néanmoins, l'analyse statistique (tableau 8) montre qu'aucune de ces variations ne peut être considérée dans son ensemble comme significative.

Bien que plusieurs études aient rapporté, à l'échelle intra-expérimentale, des effets significatifs de la fermentation sur certains paramètres nutritionnels, l'analyse globale des comparaisons entre TC et TCF ne met pas en évidence d'effet général statistiquement significatif. Les variations moyennes observées après fermentation restent néanmoins positives pour l'ensemble des critères retenus, avec des hausses de ~3,4 % pour l'EMA et l'EMAn et de 1,4 %, 6,9 %, 4,7 % et 1,1 % pour les digestibilités de la MS, des PB, des MG et des fibres, respectivement. L'augmentation de la digestibilité des protéines brutes est celle qui s'approche le plus du seuil de significativité (p = 0,06). Cependant en raison de l'hétérogénéité des dispositifs expérimentaux et du faible nombre d'observations, seules des tendances générales peuvent être dégagées et non un effet caractérisé de la fermentation sur la digestibilité du tourteau de colza.

Les données disponibles suggèrent une amélioration de la valeur nutritionnelle du TCF, notamment pour l'énergie métabolisable et la digestibilité des protéines. Toutefois, aucune variation n'est statistiquement significative dans l'analyse globale. Cette absence de significativité doit être interprétée avec prudence, car elle résulte d'une synthèse de traitements fermentaires très différents et d'un nombre limité d'observations. Elle n'exclut donc pas l'existence de procédés efficaces pour certains critères, mais indique que les données disponibles restent insuffisantes pour conclure à un effet général et robuste de la fermentation.

7. Effets de la fermentation sur les performances zootechniques

Note de lecture en préambule à tous les tableaux comportant une partie B : dans les comparaisons avec un témoin à base de tourteau de soja, un effet neutre (=) est à considérer comme favorable, car il indique que l'incorporation de TCF ne pénalise pas le paramètre étudié malgré les contraintes propres au tourteau de colza.

■ 7.1. Remplacement du TC par du TCF

Les comparaisons directes entre TCF et TC brut (tableau 9A) montrent globalement un effet favorable de la fermentation sur les performances

Tableau 7. ***Variations de la valeur nutritionnelle du TCF pour les volailles, exprimées en % : (TCF – TC) × 100 / TC.***

Traitement	EMA	EMAn	Dig. MS	Dig. PB	Dig. MG	Dig. FB	Source
Lactobacillus acidophilus PTCC 1643 + *Bacillus subtilis* PTCC 1156 + *Aspergillus niger* PTCC 5010 (TCF100) | témoin : TC			6,2 ns	23,5*	13,1*		Dastar *et al.* (2025)
L. acidophilus + *B.subtilis* + *Saccharomyces cerevisiae* (TCF) | témoin : TC	14,4*	15,2*					Wu *et al.* (2020)
L. fermentum + *B. subtilis* + *Aspergillus oryzae* (TCF (canola) 5) | témoin : TC (canola)	–13,3 ns		–3,1 ns	–2,2 ns		–5,5 ns	Davodifar *et al.* (2020)
L. fermentum + *B. subtilis* + *A. oryzae* (TCF (canola) 10) | témoin : TC (canola) 10	1,2		0,6	–3,0		0,2	
L. fermentum + *B. subtilis* + *A. oryzae* (TCF (canola) 15) | témoin : TC (canola) 15	11,3		0,6	13,3		3,0	
L. fermentum + *Bacillus subtilis* (TCF (canola)) | témoin : TC (canola)			5,7*	8,5*	14,0*		Elbaz *et al.* (2023)
Lactobacillus fermentum + *B. subtilis* (TCF (canola) + enzymes) | témoin : TC (canola) + enzymes			2,0	4,8	2,2		
B. subtilis PB6 (TCF (canola)) | témoin : TC (canola)			1,4 ns	9,1*		6,6*	Hafeez *et al.* (2025)
Fermentation avec phytase (TCF gras) | témoin : TC gras		–4,0 ns	–0,5 ns		0,1 ns		Orlich *et al.* (2023)
Fermentation avec phytase (TCF gras) | témoin : TC gras hydrobarothermique		–0,8	–0,4		–0,7		
Fermentation spontanée (TCF gras spontané) | témoin : TC gras				1,3 ns	–0,2 ns		Goodarzi Boroojeni *et al.* (2022)
Moyenne des variations	**3,4**	**3,5**	**1,4**	**6,9**	**4,7**	**1,1**	

Les valeurs nutritionnelles absolues sont consignées dans le Document supplémentaire S1.
Abréviations : EMA = énergie métabolisable apparente ; EMAn = énergie métabolisable apparente corrigée pour l'azote ; Dig = digestibilité ; MS = matière sèche ; PB = protéines brutes ; MG = matières grasses ; FB = fibres brutes ; TC = tourteau de colza non fermenté ; TCF = tourteau de colza fermenté ; TC (canola)/TCF (canola) = tourteau de canola non fermenté/fermenté ; TC gras/TCF gras = tourteau de colza gras non fermenté/fermenté.
* : différence significative entre TCF et témoin non fermenté ; ns : différence non significative.

zootechniques, particulièrement chez les volailles en croissance (Drażbo *et al.*, 2020 ; Elbaz *et al.*, 2023 ; Zaworska-Zakrzewska *et al.*, 2023). Chez le poulet de chair et la dinde, le TCF améliore surtout le gain de poids et/ou l'efficience alimentaire par rapport au TC brut, tandis que chez les poules pondeuses et les reproductrices, ses effets positifs portent davantage sur la production d'œufs que sur l'ensemble des critères zootechniques (Kopacz *et al.*, 2021 ; Taheri *et al.*, 2023 ; Konkol *et al.*, 2024).

L'intérêt du TCF par rapport au TC brut apparaît donc réel, mais son ampleur varie selon l'espèce, le type de production, le stade physiologique et le niveau d'incorporation dans la ration (Taheri *et al.*, 2023 ; Zaworska-Zakrzewska *et al.*, 2023).

Les comparaisons directes entre TCF et TC montrent globalement des effets

Tableau 8. ***Analyse statistique des variations de valeurs nutritionnelles liées à la fermentation.***

Paramètre	n	Moyenne variation (%)	Écart-type	Erreur standard	t	ddl	p bilatérale	Significatif (p < 0,05)
EMA	4	3,4	12,5	6,2	0,54	3	0,62	Non
EMAn	3	3,5	10,3	6,0	0,58	2	0,62	Non
Dig. MS	9	1,4	3,0	1,0	1,39	8	0,20	Non
Dig. PB	8	6,9	8,8	3,1	2,23	7	0,06	Non
Dig. MG	6	4,7	6,9	2,8	1,68	5	0,15	Non
Dig. FB	4	1,1	5,1	2,5	0,42	3	0,70	Non

Abréviations : EMA = énergie métabolisable apparente ; EMAn = énergie métabolisable apparente corrigée pour l'azote ; Dig. = digestibilité ; MS = matière sèche ; PB = protéines brutes ; MG = matières grasses ; FB = fibres brutes ; ddl = degrés de liberté.
Test utilisé : test du t de Student (*à un échantillon vs 0 sur les comparaisons non fermenté vs fermenté).* Signification : ns $p \geq 0,05$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Tableau 9. ***Effets de la fermentation du TC sur les performances zootechniques.***

Animal	Comparaison	Taux de TCF	Effets significatifs	Source
A. Comparaisons TCF *vs* TC				
Poulet de chair	TCF *vs* TC	12–22 %	Gain de poids augmenté en phase de croissance ; ingéré diminué en phase de finition ; efficience alimentaire améliorée en phase de croissance, en phase de finition et sur l'ensemble de l'essai.	Zaworska-Zakrzewska *et al.* (2023)
		20 %	Gain de poids augmenté ; ingéré augmenté ; efficience alimentaire améliorée ; mortalité réduite.	Elbaz *et al.* (2023)
Dinde en croissance		15 %	Poids vif final augmenté ; aucun effet significatif sur l'ingéré ou l'efficience alimentaire.	Drażbo *et al.* (2020)
Poules pondeuses		20 %	Production d'œufs supérieure au TC brut ; aucun effet significatif sur l'ingéré ; pas d'effet significatif démontré sur l'efficience alimentaire.	Kopacz *et al.* (2021)
		3 %	Aucun effet significatif sur la production d'œufs ; ingéré augmenté à 30 j *vs* TC brut ; aucun effet significatif sur l'efficience alimentaire ; poids de l'œuf augmenté à 60 j *vs* TC brut.	Konkol *et al.* (2024)
Reproductrices		6–22 %	Production d'œufs augmentée et masse d'œufs augmentée avec le TCF *vs* TC ; taux d'éclosion et poids des poussins diminuent quand le niveau de remplacement augmente.	Taheri *et al.* (2023)
B. Comparaisons TCF *vs* Témoin				
Poulet de chair	TCF *vs* témoin : ration sans TC, à base de céréales et de TS	15 %	Aucun effet significatif sur le gain de poids, l'ingéré ou l'efficience alimentaire.	Gao *et al.* (2020)
Canard en croissance	TCF *vs* témoin : ration de base sans TCF	5–20 %	Aucun effet significatif sur le gain de poids ; ingéré augmenté de 15-20 % ; efficience alimentaire dégradée de 15-20 %.	Feng *et al.* (2025)

Abréviations : TCF = tourteau de colza/canola fermenté ; TC = tourteau de colza/canola brut ; TS = tourteau de soja.

favorables de la fermentation sur les performances zootechniques, surtout chez les volailles en croissance. Chez le poulet de chair, les essais de Zaworska-Zakrzewska *et al.* (2023) et d'Elbaz *et al.* (2023) rapportent notamment une amélioration du gain de poids et/ou de l'efficience alimentaire avec le TCF par rapport au TC. Dans l'étude de Gao *et al.* (2020), l'incorporation de 15 % de TCF n'a pas dégradé les performances par rapport au régime témoin. Chez les poules pondeuses, Kopacz *et al.* (2021) observent avec 20 % de TCF gras une production d'œufs supérieure à celle obtenue avec le TC gras, tandis que Konkol *et al.* (2024) ne rapportent pas d'effet significatif sur la production d'œufs ou l'efficience alimentaire avec 3 % de TCF.

L'interprétation de ces résultats doit toutefois tenir compte des modalités de formulation des régimes. Dans les trois essais conduits chez le poulet de chair, le TCF et le TC étaient comparés à taux d'incorporation identiques : 12, 17 ou 22 % dans l'étude de Zaworska-Zakrzewska *et al.* (2023), 20 % dans celle d'Elbaz *et al.* (2023) et 15 % dans celle de Gao *et al.* (2020). Les régimes comparés reposaient sur une même formule de base ; ils étaient formulés avec une énergie métabolisable calculée identique ou proche, et comportaient des apports d'acides aminés libres dans certaines études. Les auteurs ne renseignent cependant pas systématiquement un équilibre strict en acides aminés digestibles après fermentation. Chez les poules pondeuses, Kopacz *et al.* (2021) ont comparé 20 % de TCF gras à 20 % de TC gras dans des régimes explicitement isoénergétiques et isoprotéiques. Dans l'étude de Konkol *et al.* (2024), les régimes contenant 3 % de TCF ou de TC étaient très proches dans leur composition analysée, sans être présentés comme strictement isoénergétiques ou isoprotéiques. Les effets observés doivent donc être interprétés comme ceux des régimes expérimentaux comparés ; ils ne permettent pas, à eux seuls, de définir un niveau optimal d'incorporation du TCF.

■ 7.2. Remplacement du TS par du TCF

En poulet de chair, l'incorporation de TCF à 15 % dans la ration peut maintenir des performances comparables à celles d'une ration de référence à base de tourteau de soja, sans effet défavorable significatif sur le gain de poids, l'ingéré ou l'efficience alimentaire (Gao *et al.*, 2020).

En revanche, chez le canard, l'incorporation de TCF à 15-20 % augmente l'ingéré et dégrade l'efficience alimentaire sans bénéfice sur le gain de poids, ce qui suggère une marge de substitution plus limitée dans cette espèce ; les auteurs proposent d'ailleurs explicitement de ne pas dépasser 10 % d'incorporation (Feng *et al.*, 2025).

L'analyse montre que le TCF peut améliorer les performances zootechniques lorsqu'il remplace le TC, avec des effets particulièrement favorables chez les volailles en croissance et, dans une moindre mesure, sur la production d'œufs. En revanche, son utilisation comme substitut au TS apparaît plus dépendante de l'espèce, du taux d'incorporation et des modalités de formulation des régimes. Les résultats suggèrent que les effets peuvent devenir moins favorables aux taux d'incorporation les plus élevés dans certains dispositifs, sans permettre de définir un seuil commun à l'ensemble des espèces. Le TCF constitue donc une voie intéressante de valorisation du TC en alimentation avicole, mais son intérêt pratique doit être confirmé dans des essais comparant des régimes formulés de manière nutritionnellement équivalente.

8. Effets de la fermentation sur la santé des animaux

■ 8.1. Tolérance générale, paramètres sanguins et endocriniens

a. Remplacement du TC par du TCF

La partie A du tableau 10 montre que la fermentation améliore globalement la tolérance métabolique du tourteau de colza par rapport à sa forme brute. Chez le poulet de chair, le TCF réduit plusieurs marqueurs lipidiques sanguins, notamment le cholestérol total, les triglycérides, le VLDL-C et le LDL-C, tandis que le HDL-C, les protéines totales et le glucose restent inchangés (Dastar *et al.*, 2025). Des effets proches sont rapportés par Hafeez *et al.* (2025), avec une baisse des triglycérides sans modification nette du cholestérol ni du glucose.

Chez les reproductrices et les poules pondeuses, les résultats vont également dans le sens d'une meilleure tolérance du TCF *vs* TC. La fermentation est associée à une amélioration de plusieurs paramètres sanguins chez les reproductrices, avec une hausse du glucose et du HDL et une baisse des triglycérides, du cholestérol et du LDL (Jafari & Gharahveysi, 2021). Chez les poules pondeuses, le TCF gras se distingue du TC gras brut par une baisse de la phosphatase alcaline (ALP), pouvant suggérer une amélioration du métabolisme hépatique ou osseux, ainsi que par des effets favorables sur la T3, hormone thyroïdienne liée au métabolisme énergétique, et sur le phosphore (Orlich *et al.*, 2023).

Dans l'ensemble, ces réponses suggèrent que la fermentation peut atténuer certaines contraintes métaboliques associées au tourteau de colza, probablement en lien avec la réduction des glucosinolates et, selon le procédé, du phosphore phytique. Cette interprétation doit toutefois rester prudente. D'une part, les marqueurs sanguins ne renseignent pas directement tous les mécanismes en jeu ; d'autre part, les paramètres osseux rapportés par Hafeez *et al.* (2025) sont mixtes, ce qui montre que l'amélioration de certains indicateurs métaboliques ne se traduit pas nécessairement par une amélioration homogène de tous les critères de tolérance. La fermentation améliore donc l'intérêt du tourteau de colza, sans effacer entièrement les contraintes propres à cette matière première.

b. Remplacement du TS par du TCF

La partie B du tableau 10 montre que le TCF est globalement bien toléré en comparaison à des régimes témoins contenant du tourteau de soja, mais sans équivalence systématique avec celui-ci. Chez le poulet de chair, les incorporations modérées apparaissent

Tableau 10. ***Effets du remplacement du TC ou du TS par du TCF sur la tolérance générale et les paramètres sanguins, métaboliques et endocriniens.***

Animal	Taux de tourteau dans la ration	Comparaison/ nature du témoin	Paramètre(s)	Effet	Référence
Partie A – Remplacement du TC brut ou non-fermenté par TCF ou TCF gras					
Poulet de chair	Ration sans TS : le TCF remplace 33,3 à 100 % du TC	TCF *vs* TC	Cholestérol total, triglycérides, VLDL-C, LDL-C	Favorable (+)	Dastar *et al.* (2025)
			HDL-C, protéines totales, glucose	Neutre (=)	
	6–18 %	TCF *vs* TC / régime canola non supplémenté	Triglycérides sanguins	Favorable (+)	Hafeez *et al.* (2025)
			Cholestérol, glucose	Neutre (=)	
			Paramètres osseux : poids osseux, indice de robustesse, tibio-tarsal index	Mixte (+/–)	
Poule pondeuse	20 %	TCF gras *vs* TC gras brut	ALP	Favorable (+)	Orlich *et al.* (2023)
			T3, P		
Poules reproductrices	NC	TCF (modalités fermentaires : L. plantarum, B. subtilis, A. oryzae ou N. cytophilla) *vs* TC brut	Glucose, HDL	Favorable (+)	Jafari & Gharahveysi (2021)
			Triglycérides, cholestérol, LDL		
			ALT, ALP		
			Protéines totales, albumine, acide urique	Neutre (=)	
Partie B – Remplacement du TS par TCF ou TCF gras					
Poulet de chair	5–15 %	TCF *vs* témoin : ration standard maïs-soja	Mortalité	Neutre (=)	Davodifar *et al.* (2020)
			Poids relatifs des principaux organes internes et digestifs		
			Ca, P, Na, K, Cl, urée, T4		
			TSH, ACTH	Défavorable (–)	
			Protéines totales, albumine, globuline, créatinine, rapport AST/ALT	Mixte (+/=)	Vasavi *et al.* (2025)
	TCF substituant 33,3–100 % du TC dans la ration sans TS	TCF *vs* témoin maïs-TS et *vs* TC brut	Cholestérol total, triglycérides, VLDL-C, LDL-C	Favorable (+)	Dastar *et al.* (2025)
			HDL-C, protéines totales, glucose	Neutre (=)	
Canard Sansui	15–20 %	TCF *vs* témoin 0 % TCF : ration maïs-soja	ADFI et FCR augmentés ; efficacité alimentaire diminuée	Défavorable (–)	Feng *et al.* (2025)
Poule pondeuse	20 %	Régime avec 20 % de TCF gras *vs* régime témoin sans colza, contenant du tourteau de soja	TP, ALB, GLB	Favorable (+)	Orlich *et al.* (2023)
			ALP		
			T3, P		
			Créatinine		
			Cholestérol total, ALT, LDH, urée, T4, Zn, Cu	Neutre (=)	

Abréviations : TS = tourteau de soja ; TC = tourteau de colza non fermenté ; TCF = tourteau de colza fermenté ; TCF gras = tourteau de colza gras fermenté ; Ca = calcium ; P = phosphore ; Na = sodium ; K = potassium ; Cl = chlore ; T4 = thyroxine ; TSH = thyréostimuline ; ACTH = hormone corticotrope ; ADFI = consommation moyenne quotidienne ; FCR = indice de consommation ; VLDL-C = cholestérol VLDL ; LDL-C = cholestérol LDL ; HDL-C/HDL = lipoprotéines de haute densité ; LDL = lipoprotéines de basse densité ; AST = aspartate aminotransférase ; ALT = alanine aminotransférase ; TP = protéines totales ; ALB = albumine ; GLB = globulines ; ALP = phosphatase alcaline ; LDH = lactate déshydrogénase ; T3 = triiodothyronine ; Zn = zinc ; Cu = cuivre ; NC = taux non communiqué dans l'article.

peu perturbatrices : Davodifar *et al.* (2020) n'observent pas d'altération majeure de la mortalité, des poids d'organes ou de plusieurs paramètres sanguins jusqu'à 15 % de TCF, malgré une hausse de la TSH et de l'ACTH, tandis que Vasavi *et al.* (2025) rapportent surtout une hausse des protéines totales à 10 % de TCF, sans modification de l'albumine, des globulines, de la créatinine ni du rapport AST/ALT.

Les essais à niveaux plus élevés invitent à davantage de prudence. Chez Dastar *et al.* (2025), le soja est entièrement retiré et remplacé par un TC contenant jusqu'à 100 % de TCF dans la fraction colza : certains paramètres lipidiques s'améliorent, mais les performances ne rejoignent pas toujours celles du régime à base de TS. De même, Hafeez *et al.* (2025) observent une baisse des triglycérides, mais des effets défavorables sur le gain de poids et l'indice de consommation à 18 % de TCF.

Chez les poules pondeuses, Orlich *et al.* (2023) rapportent un profil métabolique globalement favorable à 20 % de TCF gras, notamment sur les protéines plasmatiques, le phosphore, la T3 et l'ALP.

Le TCF et le TCF gras apparaissent donc comme des alternatives partielles au tourteau de soja, globalement bien tolérées, mais dont l'intérêt dépend du taux d'incorporation, de l'espèce, du procédé de fermentation et du type de tourteau utilisé.

■ 8.2. Immunité et statut antioxydant

a. Remplacement du TC par du TCF

La partie A du tableau 11 montre que la fermentation du TC peut améliorer plusieurs indicateurs de l'immunité et de la balance redox par rapport au TC non fermenté. Chez le poulet de chair, Li *et al.* (2022) rapportent une augmentation des IgA et IgG, deux immunoglobulines impliquées dans les réponses immunitaires humorales, ainsi qu'une amélioration de plusieurs enzymes antioxydantes : la SOD (superoxyde dismutase), qui participe à la neutralisation des radicaux libres, la glutathion-peroxydase (GSH-Px), et la CAT (catalase), qui contribuent à la détoxification des peroxydes.

Les résultats d'Elbaz *et al.* (2023) vont dans le même sens, avec une hausse de l'activité de la SOD (neutralisation des radicaux libres) et une baisse de la teneur en MDA (malondialdéhyde), marqueur de peroxydation lipidique, traduisant une réduction des dommages oxydatifs cellulaires. L'augmentation du poids relatif de la bourse de Fabricius et de la concentration plasmatique des anticorps anti-NDV (virus de la maladie de Newcastle) suggère également un effet favorable sur certains marqueurs de l'immunité (Elbaz *et al.*, 2023).

Ces résultats montrent que la fermentation peut réduire les facteurs antinutritionnels du colza et libérer des composés bioactifs susceptibles de soutenir les défenses antioxydantes et immunitaires. La réponse n'est toutefois pas systématique : Konkol *et al.* (2023) ne rapportent pas d'effet net du TCF sur le statut antioxydant de la viande, indicateur plus indirect de l'équilibre oxydatif de l'animal, ce qui montre que l'effet de la fermentation dépend du type de produit, du taux d'incorporation, des marqueurs étudiés et du contexte expérimental.

b. Remplacement du TS par du TCF

La partie B du tableau 11 montre que, face à des régimes témoins contenant du TS, le TCF donne des réponses globalement neutres à favorables sur l'immunité et le statut antioxydant. Chez le poulet de chair, Elbaz *et al.* (2023) observent une augmentation du poids relatif de la bourse de Fabricius, de la concentration plasmatique des anticorps anti-NDV et de l'activité de la SOD, ainsi qu'une diminution de la concentration en MDA, ce qui suggère que le TCF peut soutenir certains marqueurs immunitaires et limiter la peroxydation lipidique malgré le remplacement du TS par un TC plus contraignant d'un point de vue nutritionnel.

Les résultats de Wu *et al.* (2022) sont plus nuancés : la SOD et la T-AOC, c'est-à-dire la capacité antioxydante totale de l'organisme, augmentent selon les niveaux d'incorporation, mais le MDA ne diminue pas de manière homogène. Cela suggère une amélioration partielle ou dose-dépendante du statut antioxydant plutôt qu'un effet systématique. À l'inverse, Vasavi *et al.* (2025) ne rapportent pas d'effet significatif sur les anticorps anti-NDV ni sur la réponse cellulaire mesurée par le test à la phytohémagglutinine-P (PHA-P), ce qui peut être lu comme une neutralité immunitaire ; dans une comparaison avec un témoin maïs-soja, cette absence de dégradation reste néanmoins favorable.

Chez le canard, Feng *et al.* (2025) observent une hausse des IgA au niveau du jéjunum (immunoglobuline A sécrétoire), mais aussi des réponses antioxydantes contrastées aux niveaux élevés de TCF, ce qui confirme que l'effet dépend fortement du taux d'incorporation.

Ainsi, le tableau 11 indique que le TCF peut favoriser certains paramètres immunitaires et antioxydants, mais ces effets restent dépendants de l'espèce, du tissu, du niveau d'incorporation et du marqueur considéré.

■ 8.3. Fonction digestive et morphologie intestinale

a. Remplacement du TC par du TCF

La partie A du tableau 12 montre que, par rapport au TC, le TCF est souvent associé à de meilleures réponses digestives chez l'animal. Chez le poulet de chair, Dastar *et al.* (2025) rapportent une amélioration de la digestibilité iléale des protéines et de l'extrait éthéré, ainsi qu'une modification favorable de la morphologie jéjunale, notamment pour la hauteur des villosités et le rapport villosités/cryptes (Dastar *et al.*, 2025). Hafeez *et al.* (2025) observent également une meilleure digestibilité des protéines et des fibres avec le TCF, surtout aux niveaux modérés d'incorporation.

Ces effets sont cohérents avec le rôle attendu de la fermentation, qui peut réduire certains facteurs antinutritionnels du colza, dégrader une partie des fibres ou des phytates, et rendre les nutriments plus accessibles aux

Tableau 11. ***Effets du remplacement du TS ou du TC par du TCF sur l'immunité et le statut antioxydant.***

Animal	Taux de tourteau dans la ration	Comparaison/ nature du témoin	Paramètre(s)	Effet	Référence
Partie A — TCF / TCF gras *vs* TC brut ou non fermenté					
Poulet de chair	25 %	TCF *vs* TC brut	IgA, IgG	Favorable (+)	Li *et al.* (2022)
			SOD, glutathion peroxydase, catalase		
	20 % + 0,02 % multi-enzymes	TCF + multi-enzymes *vs* TC non fermenté + multi-enzymes/TC non fermenté	SOD augmentée ; MDA diminuée ; bourse de Fabricius et anticorps anti-NDV améliorés surtout avec enzymes	Favorable (+)	Elbaz *et al.* (2023)
	3 %	TCF *vs* TC	Statut antioxydant de la viande ; composition en dipeptides	Neutre (=)	Konkol *et al.* (2023)
Partie B — TCF / TCF gras *vs* régimes témoins contenant du tourteau de soja					
Poulet de chair	20 %	TCF *vs* témoin : ration basale maïs-tourteau de soja	Poids relatif de la bourse de Fabricius ; anticorps anti-NDV	Favorable (+)	Elbaz *et al.* (2023)
	20 % + 0,02 % multi-enzymes	TCF + multi-enzymes *vs* témoin : ration basale maïs-tourteau de soja			
	20 %	TCF *vs* témoin : ration basale maïs-tourteau de soja	SOD augmentée ; MDA diminuée		
	20 % + 0,02 % multi-enzymes	TCF + multi-enzymes *vs* témoin : ration basale maïs-tourteau de soja			
	5–15 %	TCF *vs* témoin : ration maïs-tourteau de soja	SOD et T-AOC augmentées selon le niveau ; MDA non uniformément diminuée	Mixte / favorable dose-dépendant (+/=)	Wu *et al.* (2022)
		TCF *vs* témoin : ration standard maïs-soja	Titres d'anticorps anti-NDV ; réponse cellulaire au PHA-P	Neutre (=)	Vasavi *et al.* (2025)
Canard Sansui	5–20 %	TCF *vs* témoin 0 % TCF : ration maïs-soja	sIgA jéjunale	Favorable (+)	Feng *et al.* (2025)
	≥ 15 %		CAT et AOC hépatiques/jéjunales diminuées ; SOD jéjunale augmentée ; MDA non affectée	Mixte / défavorable dose-dépendant (–/=)	Feng *et al.* (2025)

Abréviations : TC = tourteau de colza non fermenté ; TCF = tourteau de colza fermenté ; TCF gras = tourteau de colza gras fermenté ; NDV = virus de la maladie de Newcastle ; PHA-P = phytohémagglutinine-P ; IgA = immunoglobuline A ; IgG = immunoglobuline G ; sIgA = immunoglobuline A sécrétoire ; SOD = superoxyde dismutase ; T-AOC/AOC = capacité antioxydante totale ; MDA = malondialdéhyde ; CAT = catalase.

Tableau 12. ***Effets du remplacement du TS ou du TC par du TCF sur la fonction digestive et la morphologie intestinale.***

Animal	Taux de tourteau dans la ration	Comparaison/ nature du témoin	Paramètre(s)	Effet	Référence
Partie A — TCF / TCF gras *vs* TC brut ou non fermenté					
Poulet de chair	3 %	TCF *vs* TC	Indices morphométriques quantitatifs du cæcum (hauteur, largeur, espacement et nombre des villosités)	Neutre (=)	Szmigiel *et al.* (2021)
			Structure histologique du cæcum/intégrité de la muqueuse cæcale	Favorable (+)	
	20 % + 0,02 % multi-enzymes	TCF + multi-enzymes *vs* TC non fermenté + multi-enzymes/TC non fermenté	Activité de la lipase et de l'amylase ; hauteur villositaire	Favorable (+)	Elbaz *et al.* (2023)
	TCF = 9,0–33,9 % selon la phase (33,3–100 % de la fraction colza)	TCF *vs* TC dans une ration où le TS est retiré	Digestibilité iléale apparente de la protéine brute et de l'extrait éthéré	Favorable (+)	Dastar *et al.* (2025)
			Hauteur villositaire et rapport villosité/ crypte jéjunal		
	6–18 %	TCF *vs* canola non fermenté/ régime canola non supplémenté	Digestibilité des protéines brutes, de la cellulose brute et des extraits non azotés améliorée ; matière sèche et cendres non modifiées ; meilleurs résultats à 6–12 %	Mixte à dominante favorable (+/=)	Hafeez *et al.* (2025)
Poule pondeuse	3 %	TCF *vs* TC	Viscosité du contenu intestinal ; disponibilité du phosphore total	Favorable (+)	Konkol *et al.* (2024)
			Épaisseur de la paroi duodénale	Mixte (+/=)	
	20 %	TCF gras *vs* TC gras brut	Activités cæcales α-glucosidase et α-arabinopyranosidase les plus élevées ; activité β-glucuronidase la plus basse	Mixte / favorable (+/=)	Orlich *et al.* (2023)
			Digestibilité de l'extrait éthéré augmentée ; digestibilité de la matière sèche et rétention du calcium diminuées : effets surtout liés à l'inclusion de RC, pas toujours spécifiques à la fermentation	Mixte (+/-)	
Poules reproductrices	NC	TCF (modalités fermentaires : L. plantarum, B. subtilis, A. oryzae ou N. cytophilla) *vs* TC brut	Poids duodénal et jéjunal augmentés ; poids cæcal diminué	Mixte / favorable (+/=)	Jafari & Gharahveysi (2021)
			Longueur des villosités jéjunales augmentée ; profondeur des cryptes diminuée	Favorable (+)	
			Activités digestives amylase, lipase et protéase modifiées/améliorées selon le procédé		
Partie B — TCF / TCF gras *vs* régimes témoins contenant du tourteau de soja					
Poulet de chair	5–15 %	TCF *vs* témoin : ration maïs-tourteau de soja	Viscosité du contenu intestinal	Défavorable (–)	Davodifar *et al.* (2020)
			Morphologie jéjunale, pH de l'iléon	Neutre (=)	
	15 %	TCF (fermenté par Bacillus subtilis) *vs* témoin : ration maïs-tourteau de soja	Longueur intestinale ; hauteur des villosités ; diamètre du diverticule de Meckel	Favorable (+)	Hosseinpoor *et al.* (2023)
	20 % + 0,02 % multi-enzymes	TCF + multi-enzymes *vs* témoin : ration basale maïs-tourteau de soja	Activité de la lipase et de l'amylase ; hauteur des villosités	Favorable (+)	Elbaz *et al.* (2023)
	TS retiré ; TCF = 9,0–33,9 % selon la phase (33,3–100 % de la fraction colza)	TCF *vs* témoin maïs-TS ; comparaison aussi avec TC brut	Digestibilité iléale apparente des protéines brutes et de l'extrait éthéré	Favorable, mais pas toujours supérieur au témoin soja (+/=)	Dastar *et al.* (2025)
			Hauteur villositaire et rapport villosité/ crypte jéjunal	Favorable (+)	
Canard Sansui	20 %	TCF *vs* témoin 0 % TCF : ration maïs-soja	Hauteur des villosités, profondeur des cryptes, épaisseur musculaire et cellules caliciformes jéjunales/iléales diminuées	Défavorable (–)	Feng *et al.* (2025)
Poule pondeuse	20 %	Régime avec 20 % de TCF gras *vs* régime témoin sans colza, contenant du tourteau de soja	Digestibilité de l'extrait éthéré augmentée ; digestibilité de la matière sèche et rétention du Ca diminuées	Mixte (+/–)	Orlich *et al.* (2023)
			Poids du digesta cæcal diminué ; activités cæcales glycolytiques modifiées ; activité β-glucuronidase diminuée	Mixte / favorable (+/=)	

Abréviations : TS = tourteau de soja ; TC = tourteau de colza non fermenté ; TCF = tourteau de colza fermenté ; TCF gras = tourteau de colza gras fermenté ; RC = tourteau de colza gras ; pH = potentiel hydrogène ; Ca = calcium ; NC = taux non communiqué dans l'article.

enzymes digestives. Les résultats de Jafari et Gharahveysi (2021) vont dans le même sens, avec une amélioration de la morphologie intestinale et de certaines activités enzymatiques digestives.

Chez la poule pondeuse, les résultats d'Orlich *et al.* (2023) sont plus nuancés : le TCF gras améliore certains indicateurs cæcaux, notamment des activités enzymatiques bactériennes, mais ses effets sur la digestibilité globale ne sont pas uniformément favorables.

La fermentation semble donc améliorer les fonctions digestives des animaux, mais avec une ampleur variable selon le type de tourteau, le type d'animal et les paramètres considérés.

b. Remplacement du TS par du TCF

La partie B du tableau 12 montre que le TCF peut être incorporé dans des régimes comparés à des témoins contenant du tourteau de soja sans altération systématique de la fonction digestive. Chez le poulet de chair, Davodifar *et al.* (2020) n'observent pas de modification majeure de la morphologie jéjunale ni du pH iléal jusqu'à 15 % de TCF, mais signalent une hausse de la viscosité intestinale, point de vigilance car elle peut limiter la digestion et l'absorption des nutriments.

Plusieurs essais rapportent toutefois des réponses favorables : amélioration de certains paramètres intestinaux avec un TCF fermenté par *Bacillus subtilis*, augmentation de la hauteur des villosités et de l'activité lipasique avec 20 % de TCF, surtout associé à des enzymes, et amélioration de la digestibilité iléale ou de la morphologie intestinale lorsque la fraction colza est davantage fermentée (Elbaz *et al.*, 2023 ; Hosseinpoor *et al.*, 2023 ; Dastar *et al.*, 2025).

Les résultats restent néanmoins dépendants du taux d'incorporation et de l'espèce. Chez le canard, 20 % de TCF dégradent plusieurs paramètres de morphologie intestinale, tandis que chez la poule pondeuse, 20 % de TCF gras modifient plusieurs paramètres digestifs et cæcaux avec des effets mixtes sur la digestibilité (Orlich *et al.*, 2023 ; Feng *et al.*, 2025).

Le TCF peut soutenir la fonction digestive et certains indicateurs de morphologie intestinale, mais ses effets ne sont pas systématiques : ils dépendent du niveau d'incorporation, du type de TC, de l'espèce animale et du procédé de fermentation.

Pour conclure, le TCF présente des effets globalement favorables sur la santé des volailles, en particulier lorsqu'il est comparé au TC. Comparés aux régimes à base de TS, les résultats obtenus avec du TCF restent majoritairement rassurants : l'absence de dégradation de nombreux paramètres constitue déjà un résultat positif pour un TC. Ces effets doivent toutefois être nuancés selon le taux d'incorporation, le type d'animal et le procédé de fermentation.

9. Effets de la fermentation sur l'écosystème microbien intestinal

Les effets observés sur la santé suggèrent que le TCF n'agit pas seulement comme un ingrédient protéique, mais aussi comme une matrice fermentée capable de modifier l'environnement intestinal. Ces effets concernent les populations microbiennes, le pH digestif, la production d'acides organiques et l'activité fermentaire cæcale.

■ 9.1. Populations microbiennes

Chez le poulet, plusieurs études indiquent que le TCF peut orienter l'écosystème microbien intestinal vers un profil plus favorable, avec une augmentation des bactéries lactiques ou des *Lactobacillus* et une diminution de groupes potentiellement indésirables comme les coliformes, *E. coli*, *Enterobacter cloacae*, *Klebsiella pneumoniae* ou *Blastocystis hominis* (Szmigiel *et al.*, 2021 ; Elbaz *et al.*, 2023 ; Hosseinpoor *et al.*, 2023). Gao *et al.* (2020) rapportent également une réduction des méthanogènes et une modulation de la flore cæcale, suggérant un effet plus large du TCF sur l'écosystème intestinal.

■ 9.2. Environnement fermentaire intestinal

Au-delà des populations bactériennes, le TCF peut aussi modifier l'environnement physicochimique intestinal, notamment le pH digestif et la production d'acides organiques ou d'acides gras volatils comme l'acide lactique et l'acide butyrique. Ces métabolites participent à l'acidification du milieu intestinal, au soutien de l'épithélium et à la limitation de certaines bactéries indésirables. Chez la poule pondeuse, Orlich *et al.* (2023) montrent aussi que le TCF gras modifie l'activité enzymatique bactérienne cæcale, ce qui confirme un effet plus large sur le fonctionnement de l'écosystème intestinal.

Ces résultats suggèrent donc une modulation de l'écosystème microbien intestinal par le TCF, avec des effets généralement favorables mais variables selon les auteurs.

10. Effets sur la qualité des produits

Les effets du TCF sur la qualité des produits animaux sont assez peu renseignés et semblent globalement limités. Ils varient toutefois selon l'espèce et le critère considéré. Chez le poulet de chair, le TCF incorporé en substitution partielle au tourteau de soja peut améliorer certains critères de conservation de la carcasse et réduire l'indice thrombogénique de la viande. Il peut toutefois augmenter la teneur en acide myristique, ce qui nuance le bénéfice attendu sur le profil lipidique des produits (Davodifar *et al.*, 2020 ; Gao *et al.*, 2020 ; Wu *et al.*, 2022).

Chez la pondeuse, le TCF ne modifie pas fortement l'apparence des œufs, mais peut affecter leur profil lipidique ou certains critères internes, comme l'intensité du jaune et les unités Haugh (Kopacz *et al.*, 2021 ; Konkol *et al.*, 2023). Chez la caille, il améliore la coloration de la coquille sans dégrader les autres critères de qualité, tandis que chez les reproductrices, la ponte et la qualité des poussins semblent peu affectées (Wengerska *et al.*, 2022 ; Taheri *et al.*, 2023).

Le TCF apparaît donc compatible avec la qualité des produits animaux, sous réserve d'effets à surveiller sur le profil lipidique et certains critères de qualité de l'œuf.

11. Effets sur l'économie et l'environnement

Les dimensions économiques et environnementales du TCF restent très peu documentées. Aucune étude du corpus ne propose d'analyse économique intégrant le coût de fermentation, le coût d'incorporation dans les aliments ou l'effet sur le coût de production par kg de gain de poids ou par œuf.

12. Repères pour une évaluation dans le contexte français

En complément des données issues de la bibliographie, un ordre de grandeur indicatif peut être proposé pour les conditions françaises. Sur la base d'un prix du TC de 250 à 260 €/t et d'un coût de fermentation estimé à 90 €/t, le procédé représenterait une majoration d'environ 35 % de la valeur de la matière première. À ce coût de fermentation s'ajoute l'incidence économique de la perte de matière sèche liée au procédé, qui diminue la quantité de TCF obtenue par tonne de TC traitée. Les données disponibles ne permettent toutefois pas de la chiffrer de manière homogène. Ces éléments de contexte ne constituent pas une analyse économique issue des études recensées, mais soulignent la nécessité d'évaluer le coût complet du procédé avant toute application.

Les données environnementales sont également limitées. Chez le poulet de chair, le TCF a été associé à une réduction de la production de méthane et d'ammoniac à un stade précoce, ainsi qu'à une diminution de l'excrétion de phosphore (Gao *et al.*, 2020 ; Olukomaiya *et al.*, 2021).

Ces résultats suggèrent un intérêt environnemental potentiel, mais ils restent insuffisants pour conclure à un bénéfice global sans analyses complémentaires sur l'ensemble du cycle de production.

Conclusion

La fermentation du TC modifie l'intérêt nutritionnel et zootechnique de cette matière première de manière sélective plutôt que globale. Sur le produit lui-même, les résultats les plus cohérents concernent une hausse apparente de la teneur en PB, sans qu'un enrichissement net du produit initial puisse être établi faute de bilan matière et d'azote, ainsi que la réduction des glucosinolates. Une diminution moyenne du phosphore phytique est observée, sans être statistiquement significative dans l'analyse globale. En revanche, les autres paramètres de composition, les acides aminés, les NSP et plusieurs minéraux présentent des réponses plus hétérogènes, dépendantes du substrat initial, des microorganismes utilisés et des conditions de fermentation.

Les données disponibles suggèrent une amélioration possible de la valeur nutritionnelle du TC après fermentation, notamment pour l'énergie métabolisable et la digestibilité des protéines, mais sans effet statistiquement significatif dans l'analyse globale. Cette absence de significativité ne doit pas être assimilée à une absence d'efficacité de tous les procédés fermentaires : elle reflète aussi l'hétérogénéité des souches, des substrats et des conditions de fermentation incluses dans l'analyse. Les effets zootechniques sont plus favorables lorsque le TCF remplace le TC, en particulier chez les volailles en croissance. En comparaison avec des régimes à base de TS, les résultats sont plus variables et dépendent davantage du type d'animal, du taux d'incorporation et du type de production.

Les effets sur la santé des volailles sont globalement rassurants. Le TCF peut améliorer certains indicateurs de tolérance métabolique, de statut antioxydant, de fonction digestive et de morphologie intestinale, par comparaison avec le TC. Il peut également moduler l'écosystème microbien intestinal, avec des effets généralement favorables sur les populations bactériennes et l'environnement physico-chimique intestinal, mais variables selon les études. Les effets sur la qualité des produits animaux semblent plus limités, même si certains paramètres, notamment le profil lipidique et certains critères de qualité de l'œuf, doivent être surveillés.

Les dimensions économiques et environnementales restent les moins documentées. Les rares résultats disponibles suggèrent un intérêt potentiel sur certaines émissions ou excrétions, mais ne permettent pas de conclure à un bénéfice environnemental global. La faisabilité économique du procédé reste également à démontrer ; les repères proposés dans le contexte français soulignent la nécessité d'une évaluation intégrant le coût complet de la fermentation, y compris les pertes de matière sèche.

Des essais conduits dans des conditions françaises, avec des tourteaux caractérisés, des procédés de fermentation décrits et des critères technico-économiques intégrés, sont nécessaires pour préciser les conditions de valorisation du TCF dans les filières avicoles.

Contribution des auteurs

Rédaction générale : V. H. ; Rédaction de la partie « procédés », relecture, et supervision générale : P. C. ; Définition des objectifs et supervision : I. DLB. ; Définition des objectifs : E. T. ; Relecture : G. T.

Remerciements

Les auteurs remercient Terres Univia et Terres Inovia pour le financement des travaux de veille ayant permis la rédaction de cet article.

Liste des principales abréviations

AA	Acides aminés	**IgG**	Immunoglobuline G	**P phytique**	Phosphore phytique
ALP	Phosphatase alcaline	**LYS**	Lysine	**PHA-P**	Phytohémagglutinine-P
Ca	Calcium	**MDA**	Malondialdéhyde	**sIgA**	Immunoglobuline A sécrétoire
CAT	Catalase	**MET**	Méthionine	**SOD**	Superoxyde dismutase
CB	Cellulose brute	**MG**	Matières grasses	**T-AOC/AOC**	Capacité antioxydante totale
Cu	Cuivre	**Mg**	Magnésium	**T3**	Triiodothyronine
EMA	Énergie métabolisable apparente	**MM**	Matières minérales	**TC**	Tourteau de colza/canola
EMAn	Énergie métabolisable apparente corrigée pour l'azote	**MS**	Matière sèche	**TCF**	Tourteau de colza/canola fermenté
		NDV	Virus de la maladie de Newcastle	**TCF gras**	Tourteau de colza/canola fermenté gras
Fe	Fer	**NSP**	Polysaccharides non amylacés	**TS**	Tourteau de soja
GSH-Px	Glutathion peroxydase	**P**	Phosphore		
IgA	Immunoglobuline A	**PB**	Protéines brutes		

Références

Alhomodi, A. F., Kasiga, T., Berhow, M., Brown, M. L., Gibbons, W. R., & Karki, B. (2022). Combined effect of mild pretreatment and fungal fermentation on nutritional characteristics of canola meal and nutrient digestibility of processed canola meal in rainbow trout. *Food and Bioproducts Processing*, *133*, 57-66. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.03.002

Broeckx, G., Vandenheuvel, D., Claes, I. J. J., Lebeer, S., & Kiekens, F. (2016). Drying techniques of probiotic bacteria as an important step towards the development of novel pharmabiotics. *International Journal of Pharmaceutics*, *505*(1-2), 303-318. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.04.002

Chen, L., Madl, R. L., & Vadlani, P. V. (2013). Nutritional enhancement of soy meal via Aspergillus oryzae solid-state fermentation. *Cereal Chemistry*, *90*(6), 529-534. https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-13-0007-R

Couto, S. R., & Sanromán, M. Á. (2006). Application of solid-state fermentation to food industry—A review. *Journal of Food Engineering*, *76*(3), 291-302. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.022

Dastar, B., Ashayerizadeh, A., Sharifi, F., & Jazi, V. (2025). Replacement of soybean meal with fermented rapeseed meal in broiler diets: Impacts on growth performance, gut health, and nutrient digestibility. *Poultry Science*, *104*(11), 105616. https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105616

Davodifar, M., Rezaei, M., & Hashemi, N. (2020). The effect of fermented canola meal on performance, nutrient digestibility, blood parameters, tibia mineralization and intestinal characteristics of broiler chickens. *Iranian Journal of Animal Science*, *51*(1), 57-68. https://doi.org/10.22059/IJAS.2020.291281.653748

Drażbo, A. A., Juśkiewicz, J., Józefiak, A., & Konieczka, P. (2020). The fermentation process improves the nutritional value of rapeseed cake for turkeys-effects on performance, gut bacterial population and its fermentative activity. *Animals*, *10*(9), 1711. https://doi.org/10.3390/ani10091711

Elbaz, A. M., El-Sheikh, S. E., & Abdel-Maksoud, A. (2023). Growth performance, nutrient digestibility, antioxidant state, ileal histomorphometry, and cecal ecology of broilers fed on fermented canola meal with and without exogenous enzymes. *Tropical Animal Health & Production*, *55*, 46. https://doi.org/10.1007/s11250-023-03476-9

Feng, Y., Li, M., Lu, Y., Tian, C., Zhao, Y., Li, J., Wen, Z., & Zhu, Y. (2025). Dietary fermented rapeseed meal during the grower period affects growth performance, intestinal health, and antioxidant status in Sansui ducks. *Animals*, *15*(14), 2078. https://doi.org/10.3390/ani15142078

Gao, M., Cieślak, A., Kierończyk, B., Huang, H., Yanza, Y. R., Zaworska-Zakrzewska, A., Józefiak, D., & Szumacher-Strabel, M. (2020). Effects of raw and fermented rapeseed cake on growth performance, methane production, and breast meat fatty acid composition in broiler chickens. *Animals*, *10*(12), 2250. https://doi.org/10.3390/ani10122250

Goodarzi Boroojeni, F., Männer, K., Boros, D., Wisniewska, M., Kühnel, S., Beckmann, K., Lukaszczuk, M., & Zentek, J. (2022). Spontaneous and enzymatic fermentation of rapeseed cake for broiler nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, *284*, 115135. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115135

Hafeez, A., Akram, W., Al-Khalaifah, H., Naz, S., Khan, R. U., Tufarelli, V., & Alhidary, I. A. (2025). Enzyme inclusion or fermentation of canola-based diets generate different responses in growth indicators, carcass quality, nutrient digestibility, bone strength, and blood biochemical parameters in broiler chickens. *Archives Animal Breeding*, *68*(3), 485-495. https://doi.org/10.5194/aab-68-485-2025

Heuzé, V., Tran, G., Sauvant, D., Lessire, M., & Lebas, F. (2020). Rapeseed meal. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. https://www.feedipedia.org/node/52

Hong, K., Zhang, H., Han, M., Nie, X., Fu, X., Lei, F., & He, D. (2025). A novel four-species microbial consortium for nutritional value improvement of rapeseed meal. *Food Chemistry*, *478*, 143712. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143712

Hosseinpoor, L., Navidshad, B., Faseleh Jahromi, M., Karimzadeh, S., Kalantari Hesari, A., Mirzaei Aghjehgheshlagh, F., Lotfollahian, H., Oskoueian, E., & Heydari, A. (2023). The antioxidant properties of bioactive peptides derived from enzymatic hydrolyzed or fermented canola meal and its effects on broiler chickens. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, *29*(3), 40. https://doi.org/10.1007/s10989-023-10509-2

Huang, S., Vignolles, M.-L., Chen, X. D., Le Loir, Y., Jan, G., Schuck, P., & Jeantet, R. (2017). Spray drying of probiotics and other food-grade bacteria: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *63*, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.007

INRAE, CIRAD, & AFZ. (2026). *Tables INRAE-CIRAD-AFZ : Composition et valeurs nutritionnelles des matières premières pour bovins, ovins, caprins, porcs, volailles, chevaux, lapins et salmonidés*. AFZ. https://www.feedtables.com

Jafari, M. A., & Gharahveysi, S. (2021). Canola processing effects on the intestine, blood and kidney of broiler breeder hens. *Revista MVZ Cordoba*, *26*(1), e1878. https://doi.org/10.21897/rmvz.1878

Konkol, D., Jonuzi, E., Popiela, E., Sierżant, K., Korzeniowska, M., Leicht, K., Gumowski, M., Krasowska, A., Łukaszewicz, M., & Korczyński, M. (2023). Influence of solid state fermentation with Bacillus subtilis 67 strain on the nutritional value of rapeseed meal and its effects on performance and meat quality of broiler chickens. *Poultry Science*, *102*(7), 102742. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102742

Konkol, D., Popiela, E., Opaliński, S., Lipińska, A., Tymoszewski, A., Krasowska, A., Łukaszewicz, M., & Korczyński, M. (2024). Effects of fermented rapeseed meal on performance, intestinal morphology, the viscosity of intestinal content, phosphorus availability, and egg quality of laying hens. *Poultry Science*, *103*(1), 103256. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103256

Kopacz, M., Drażbo, A. A., Śmiecińska, K., & Ognik, K. (2021). Performance and egg quality of laying hens fed diets containing raw, hydrobarothermally-treated and fermented rapeseed cake. *Animals*, *11*(11), 3083. https://doi.org/10.3390/ani11113083

Li, P., Ji, X., Deng, X., Hu, S., Wang, J., Ding, K., & Liu, N. (2022). Effect of rapeseed meal degraded by enzymolysis and fermentation on the growth performance, nutrient digestibility and health status of broilers. *Archives of Animal Nutrition*, *76*(3-6), 221-232. https://doi.org/10.1080/1745039X.2022.2162801

Mitchell, D. A., Berovič, M., & Krieger, N. (2006). *Solid-state fermentation bioreactors: fundamentals of design and operation*. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-31286-2

Olukomaiya, O. O., Pan, L., Zhang, D., Mereddy, R., Sultanbawa, Y., & Li, X. (2021). Performance and ileal amino acid digestibility in broilers fed diets containing solid-state fermented and enzyme-supplemented canola meals. *Animal Feed Science and Technology*, *275*, 114876. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114876

Oriflaam. (2024). *Oriflaam – Observatoire des ressources incorporées dans les flux de l'alimentation animale*. https://oriflaam.fr

Orlich, M., Drażbo, A., Ognik, K., Rogiewicz, A., & Juśkiewicz, J. (2023). The effect of raw, hydrobarothermally treated and fermented rapeseed cake on plasma biochemical parameters, total tract digestibility and gut function in laying hens. *Annals of Animal Science*, *23*(3), 765-776. https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0040

Pandey, A., Soccol, C. R., & Larroche, C. (2008). *Current developments in solid-state fermentation*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-75213-6

Schutyser, M. A. I., Briels, W. J., Boom, R. M., & Rinzema, A. (2004). Combined discrete particle and continuum model predicting solid-state fermentation in a drum fermentor. *Biotechnology and Bioengineering*, *86*(4), 405-413. https://doi.org/10.1002/bit.20076

Szmigiel, I., Konkol, D., Korczyński, M., Łukaszewicz, M., & Krasowska, A. (2021). Changes in the microbial composition of the cecum and histomorphometric analysis of its epithelium in broilers fed with feed mixture containing fermented rapeseed meal. *Microorganisms*, *9*(2), 360. https://doi.org/10.3390/microorganisms9020360

Taheri, M., Dastar, B., Ashayerizadeh, O., & Mirshekar, R. (2023). The effect of fermented rapeseed meal on production performance, egg quality and hatchability in broiler breeders after peak production. *British Poultry Science*, *64*(2), 259-267. https://doi.org/10.1080/00071668.2022.2144712

Taranu, I., Marin, D., Pistol, G. C., Untea, A., Vlassa, M., Filip, M., Gras, M., Rotar, C., & Anghel, A. C. (2022). Assessment of the ability of dietary yeast-fermented rapeseed meal to modulate inflammatory and oxidative stress in piglets after weaning. *Journal of Animal and Feed Sciences*, *31*(2), 109-122. https://doi.org/10.22358/jafs/148055/2022

Vasavi, M. R., Nagalakshmi, D., Vidya, B., Srilatha, T., & Raju, S. (2025). Effect of feeding fermented rapeseed meal on the serum biochemical constituents and immune response of commercial broiler chicken. *Indian Journal of Animal Nutrition*, *42*(2). https://doi.org/10.56093/ijan.v42i2

Vlassa, M., Filip, M., Țăranu, I., Marin, D., Untea, A. E., Ropotă, M., Dragomir, C., & Sărăcilă, M. (2022). The yeast fermentation effect on content of bioactive, nutritional and anti-nutritional factors in rapeseed meal. *Foods*, *11*(19), 2972. https://doi.org/10.3390/foods11192972

Wengerska, K., Czech, A., Knaga, S., Drabik, K., Próchniak, T., Bagrowski, R., Gryta, A., & Batkowska, J. (2022). The quality of eggs derived from Japanese quail fed with the fermented and non-fermented rapeseed meal. *Foods*, *11*(16), 2492. https://doi.org/10.3390/foods11162492

Wu, Z., Liu, J., Chen, J., Pirzado, S. A., Li, Y., Cai, H., & Liu, G. (2020). Effects of fermentation on standardized ileal digestibility of amino acids and apparent metabolizable energy in rapeseed meal fed to broiler chickens. *Animals*, *10*(10), 1774. https://doi.org/10.3390/ani10101774

Wu, Z., Chen, J., Ahmed Pirzado, S., Haile, T. H., Cai, H., & Liu, G. (2022). The effect of fermented and raw rapeseed meal on the growth performance, immune status and intestinal morphology of broiler chickens. *Journal of Animal Physiology & Animal Nutrition*, *106*(2), 296-307. https://doi.org/10.1111/jpn.13593

Zaworska-Zakrzewska, A., Kasprowicz-Potocka, M., Kierończyk, B., & Józefiak, D. (2023). The effect of solid-state fermentation on the nutritive value of rapeseed cakes and performance of broiler chickens. *Fermentation*, *9*(5), 435. https://doi.org/10.3390/fermentation9050435

Zhou, X. R., Sun, P. P., Liu, Z. Y., Zhong, X. X., Liu, Z. H., & Yang, F. Y. (2020). Evaluation of nutritional value of fermented rapeseed meal in growing-finishing pigs. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, *51*(3), 524-533. https://doi.org/10.11843/j.issn.0366-6964.2020.03.012

Zhu, X., Chen, Y., Hao, S., Jin, S., & Li, X. (2023). Improvement of the Nutritional Quality of Rapeseed Meal through Solid-State Fermentation with B. subtilis, S. cerevisiae, and B. amyloliquefaciens. *Fermentation*, *9*(5), 492. https://doi.org/10.3390/fermentation9050492

Résumé

Le tourteau de colza/canola constitue une source protéique disponible pour l'alimentation des volailles, mais son utilisation, comparée à celle du tourteau de soja, reste limitée par sa teneur en fibres, certains déséquilibres en acides aminés et la présence de facteurs antinutritionnels, notamment les glucosinolates. Cette revue analyse les travaux publiés entre 2020 et 2025 sur la fermentation du tourteau de colza/canola et ses effets sur la composition du tourteau, sa valeur nutritionnelle et son utilisation en alimentation avicole. Les résultats montrent que la fermentation modifie le tourteau de manière inégale, avec une augmentation apparente de la teneur en protéines brutes, une diminution moyenne, non statistiquement significative, du phosphore phytique et une réduction marquée des glucosinolates. En revanche, les effets sur les autres paramètres de composition, les acides aminés, les polysaccharides non amylacés et plusieurs minéraux restent hétérogènes. La valeur nutritionnelle tend à s'améliorer, notamment pour l'énergie métabolisable et la digestibilité des protéines, mais sans effet statistiquement significatif dans l'analyse globale. Chez les volailles, les effets du tourteau de colza fermenté sont généralement favorables lorsqu'il remplace le tourteau de colza non fermenté. Les réponses positives concernent surtout les performances des animaux en croissance, avec des améliorations du gain de poids ou de l'efficience alimentaire selon les études. Plusieurs indicateurs de santé sont également améliorés ou maintenus, notamment la tolérance métabolique, le statut antioxydant, certains paramètres immunitaires, la fonction digestive et la morphologie intestinale. Le tourteau de colza fermenté peut aussi moduler l'écosystème microbien intestinal, avec des effets favorables sur certaines populations bactériennes et sur l'environnement physico-chimique intestinal. En comparaison avec des régimes à base de tourteau de soja, les résultats sont plus variables et dépendent du type d'animal, du taux d'incorporation et du procédé de fermentation. Toutefois, l'absence de dégradation de nombreux paramètres par rapport aux régimes à base de tourteau de soja reste encourageante pour un coproduit du colza. Les effets sur la qualité des produits animaux semblent globalement limités. Les dimensions économiques et environnementales restent peu documentées. Le coût estimé du procédé représente cependant un surcoût important rapporté au prix du tourteau de colza. La capacité des gains nutritionnels ou zootechniques observés à compenser le coût complet du procédé reste à évaluer. Des essais locaux sont nécessaires pour préciser les niveaux d'incorporation, les bénéfices zootechniques, les impacts environnementaux et le coût complet du procédé dans les conditions françaises.

Mots clés : facteurs antinutritionnels ; glucosinolates ; valeur nutritionnelle ; digestibilité ; santé intestinale ; substitution du tourteau de soja

Abstract

Rapeseed meal fermentation: a promising technology for poultry feeding in France?

Rapeseed meal is an available protein source for poultry feeding, but its use, compared with soybean meal, remains limited by its fibre content, some amino acid imbalances, and the presence of antinutritional factors, particularly glucosinolates. This review analyses studies published between 2020 and 2025 on the fermentation of rapeseed/canola meal and its effects on meal composition, nutritional value, and use in poultry diets. The results show that fermentation modifies the meal unevenly, with an apparent increase in crude protein content, a non-significant mean decrease in phytate phosphorus, and a marked decrease in glucosinolates. In contrast, effects on other compositional parameters, amino acids, non-starch polysaccharides and several minerals remain heterogeneous between studies. Nutritional value tends to be improved, particularly metabolizable energy and protein digestibility, but no statistically significant effect was detected in the overall analysis. In poultry, the effects of fermented rapeseed meal are generally favourable when it replaces raw rapeseed meal. Positive responses mainly concern the performance of growing birds, with improvements in body weight gain or feed efficiency depending on the study. Several health indicators are also improved or maintained, including metabolic tolerance, antioxidant status, some immune parameters, digestive function and intestinal morphology. Fermented rapeseed meal may also modulate the intestinal microbial ecosystem, with favourable effects on some bacterial populations and on the intestinal physico-chemical environment. Compared with soybean-meal-based diets, results are more variable and depend on the type of bird, inclusion level and fermentation process. However, the absence of deterioration in many parameters compared with soybean-meal-based diets remains encouraging for a rapeseed co-product. Effects on animal product quality appear limited overall. Economic and environmental aspects remain poorly documented. Whether these gains can offset the full process cost remains to be assessed. Local trials are needed to clarify inclusion levels, zootechnical benefits, environmental impacts and the full cost of the process under French conditions.

Keywords: *Antinutritional factors, Glucosinolates; Nutritional value; Digestibility; Gut health; Soybean meal substitution*

HEUZÉ, V., CARRÉ, P., DE LA BORDE, I., TORMO, É., & TRAN, G. (2026). Fermentation du tourteau de colza : une technologie d'avenir pour l'alimentation des volailles françaises ? *INRAE Productions Animales*, *39*(3), 9510.
https://doi.org/10.20870/productions-animales.2026.39.3.9510

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr
La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.