



Prediction of cow diet composition and authentication of feeding specifications of Protected Designation of Origin cheese using mid-infrared spectroscopy on bulk milk

A. Coppa, Bruno Martin, Hulin S., Guillemain J., J.V. Gauzentes, Pecou A.,
Donato Andueza

► To cite this version:

A. Coppa, Bruno Martin, Hulin S., Guillemain J., J.V. Gauzentes, et al.. Prediction of cow diet composition and authentication of feeding specifications of Protected Designation of Origin cheese using mid-infrared spectroscopy on bulk milk. 25. Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Institut de l'Élevage; INRAE, Dec 2020, En ligne, France. pp.456-459. hal-03384892

HAL Id: hal-03384892

<https://hal.inrae.fr/hal-03384892>

Submitted on 19 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Prédiction de la composition de la ration des vaches et authentification des pratiques des cahiers des charges des fromages AOP par spectroscopie dans le moyen infrarouge sur des échantillons de lait de tank

COPPA M. (1), MARTIN B. (1), HULIN S. (2), GUILLEMIN J. (3), GAUZENTES J.V. (4), PECOU A. (5), ANDUEZA D. (1)

(1) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

(2) Pôle Fromager AOP Massif Central, 20 côte de Reyne, F-15000 Aurillac, France

(3) Cantal Conseil Elevage, 26 rue du 139ème Régiment d'Infanterie - BP 239, F-15002 Aurillac

(4) Agrolab's, 38 Rue de Salers F-15000 Aurillac, France

(5) CNIEL, 42 rue de Châteaudun, F-75314 Paris, France

RESUME

L'aptitude de la spectroscopie dans le moyen infrarouge (MIR) appliquée sur des laits de mélange pour 1) prédire la composition de la ration des troupeaux laitiers et 2) authentifier des pratiques des cahiers des charges des fromages AOP Cantal et Laguiole, a été testée. Les spectres MIR de 7607 laits de mélange AOP et non AOP de la région ont été associés aux données d'enquêtes sur l'alimentation correspondantes (obtenues entre avril 2018 et mars 2019), afin de constituer la base des données. La composition de la ration était très variable, allant de rations 100% pâturage, à des rations à base d'ensilage de maïs (jusqu'à 74%). La base de données a été divisée en deux pour l'étalonnage (n = 6107) et la validation (n = 1500). Des modèles de régression « partial least squares » et des analyses discriminantes ont été utilisés pour prédire la composition de la ration en pourcentage de matière sèche (MS) et pour authentifier les critères d'alimentation inclus dans les cahiers des charges des deux AOP, respectivement. La proportion d'herbe pâturée dans la ration a été prédite avec un modèle caractérisé par un coefficient de détermination en validation externe (R^2V) de 0,81 et une erreur standard de prédiction (SEP) de 11,7 %. Les proportions de pâturage + foin, d'ensilage de maïs, d'herbe conservée, de fourrages fermentés et d'herbe totale ont été prédites par des modèles ayant des $R^2V > 0,61$ et SEP $< 14,8\%$. Les modèles d'analyses discriminantes pour la présence du pâturage, la proportion de pâturage $\geq 50\%$ et $\geq 57\%$ ont montré des valeurs d'exactitude et de spécificité $\geq 90\%$. Des valeurs de sensibilité et de précision $\geq 80\%$ ont été observées pour tous les modèles discriminants concernant la proportion du pâturage dans la ration. Les modèles discriminants pour la proportion de pâturage + foin $\geq 72\%$, herbe totale (fraîche et conservée) $\geq 50\%$, le pâturage + foin $\geq 25\%$, absence d'herbe fermentée, absence d'ensilage de maïs et ensilage de maïs $\leq 30\%$ dans la ration ont montré des valeurs d'exactitude $\geq 80\%$, mais pour ces modèles soit la sensibilité, soit la précision ont été moins performantes. Les modèles construits pour tester le respect de l'ensemble des critères des cahiers des charges de chaque AOP ont montré des valeurs d'exactitude, spécificité, sensibilité et précision $> 90\%$. Les modèles pour la prédiction du % des aliments dans la ration tout comme les modèles discriminants peuvent permettre de fournir, via la MIR, des indicateurs sur la composition de la ration des troupeaux laitiers utiles aux éleveurs, filières et aux consommateurs.

Prediction of cow diet composition and authentication of feeding specifications of Protected Designation of Origin cheese using mid-infrared spectroscopy on bulk milk

COPPA M. (1), MARTIN B. (1), HULIN S. (2), GUILLEMIN J. (3), GAUZENTES J.V. (4), PECOU A. (5), ANDUEZA D. (1)

(1) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

SUMMARY

The ability of mid-infrared spectroscopy (MIR) to predict indicators (i) of diet composition in dairy herds and (ii) for the authentication of the cow-feeding restrictions included in the specification of two Protected Designation of Origin (PDO) cheeses (Cantal and Laguiole) was tested on 7607 bulk milk spectra from 1355 farms located in the French Massif Central. For each milk sample, the corresponding cow diet composition was obtained through on-farm surveys between April 2018 and March 2019. Cow diet composition varied largely (from full grazing for extensive farming systems to corn silage-based diets). The database was divided into a calibration (n = 6107) and validation (n = 1500) sets. Partial least square regression and discriminant analysis were used to predict the proportion of different feedstuffs in the cows' diets and to authenticate the cow-feeding restrictions for the PDO cheese specifications, respectively. The pasture proportion in the cows' diets was predicted by MIR with an R^2 in external validation (R^2V) = 0.81 and a standard error of prediction (SEP) of 11.7% dry matter. Pasture + hay, corn silage, conserved herbage, fermented forage and total herbage proportions were predicted with a $R^2V > 0.61$ and a SEP $< 14.8\%$. The discrimination models for pasture presence, pasture $\geq 50\%$ and pasture $\geq 57\%$ in the cows' diets achieved an accuracy and specificity $\geq 90\%$. A sensitivity and precision $> 80\%$ were observed for all models including pasture proportion in cow diet. An accuracy $\geq 80\%$ was also observed for pasture + hay $\geq 72\%$, herbage $\geq 50\%$, pasture + hay $\geq 25\%$, absence of fermented herbage, absence of corn silage and corn silage $\leq 30\%$ in the cows' diets, but for several models, either the sensitivity or precision was lower than the accuracy. Models built with respect to all the criteria of the feeding restrictions of PDO cheese specifications achieved an accuracy, specificity, sensitivity and precision $> 90\%$. Both the regression and discriminant MIR models for bulk milk can provide useful indicators of cow diet composition and PDO cheese specifications to producers and consumers.

INTRODUCTION

Authentifier et certifier les pratiques d'élevage inscrites dans les cahiers des charges constitue un enjeu récurrent pour les filières fromagères, notamment pour les produits sous Appellation d'Origine Protégée (AOP). En pratique, les contrôles mis en place reposent sur des visites dans les élevages. Ces contrôles étant très coûteux et chronophages, il serait intéressant de disposer d'outils analytiques permettant, si ce n'est de les remplacer, au moins de mieux les cibler. Parmi les techniques d'authentification des pratiques d'alimentation des troupeaux applicables sur les produits laitiers, la spectroscopie dans le moyen infrarouge (MIR) est prometteuse du fait de son coût limité et de sa rapidité de mise en œuvre. Plusieurs auteurs ont validé l'intérêt de la MIR pour discriminer des laits ou des fromages issus de troupeaux de vaches laitières recevant des rations alimentaires très contrastées (Coppa *et al.*, 2012 ; Andueza *et al.*, 2013 ; Valenti *et al.*, 2013), mais les techniques proposées n'ont jamais été testées à grande échelle pour discriminer des situations moins contrastées. L'intérêt de l'application de la MIR pour les filières fromagères AOP réside également dans la capacité de cette technique à discriminer des laits selon une grande diversité de critères alimentaires précisés dans les cahiers des charges, dans un objectif d'authentification et d'appui au contrôle. L'étude présentée avait pour objectif de tester l'aptitude de la MIR appliquée sur des laits de tank pour 1) prédire la composition de la ration alimentaire des troupeaux laitiers et 2) authentifier le respect des critères du cahier des charges relatifs à l'alimentation du troupeau dans deux fromages AOP : le Cantal et le Laguiole.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. ECHANTILLONNAGE DES LAITS ET ENQUETES EN FERME

Les spectres MIR ont été obtenus sur 7607 laits de mélange issus des départements du Cantal et de l'Aveyron (partie Nord). Les spectres étaient issus d'un seul appareil (FT-Plus équipement, Foss, Hillerød, Danemark), du laboratoire Agrolab's à Aurillac. Les échantillons utilisés étaient ceux analysés en routine pour le paiement du lait. Ils ont été associés aux données des constats d'alimentation correspondants, relevées entre avril 2018 et mars 2019 par les services de Conseil Elevage dans 1355 fermes. Les données utilisées étaient uniformément réparties au cours des mois de l'année, afin de correctement détecter les changements saisonniers dans l'alimentation du troupeau au sein de chaque ferme.

1.2. REGROUPEMENT DES LAITS SELON LES CRITERES DES CAHIERS DE CHARGES

Afin de développer des indicateurs pour authentifier le respect des différents critères d'alimentation des cahiers des charges des deux fromages AOP, des seuils ont été définis pour chaque aliment et ont été utilisés pour classer les échantillons de laits en différents groupes. Compte tenu du fait que les critères des cahiers de charges sont exprimés en % de la ration de base par saison (concentrés exclus) et que les quantités maximales autorisées de concentrés sont précisées sur une base annuelle, une conversion en % de matière sèche (MS) de la ration totale a été établie pour chaque type d'aliment. Pour cela la quantité de concentrés maximale sur l'année (rapportée en MS) a été divisée par une lactation de durée standard (305 jours) et rapportée à l'ingestion moyenne en kg de MS, renseignée dans les enquêtes. Pour chaque aliment composant la ration, les laits ont ensuite été classés en deux groupes selon le seuil imposé par les cahiers des charges (« > à » et « < à ») (Tableau 1). L'effectif des échantillons de chaque groupe pour les différents critères des cahiers des charges est

reporté dans le Tableau 2 pour le fromage AOP Cantal et dans le Tableau 3 pour le fromage AOP Laguiole. Deux autres groupes avec, pour l'un, les échantillons respectant l'ensemble des critères de chaque cahier des charges en même temps, et pour l'autre, les échantillons n'en respectant aucun, ont également été créés.

Aliment (% de MS / ration totale)	Fromage AOP	
	Cantal	Laguiole
Pâturage	> 50%	> 57%
Concentrés	< 28%	
Pâturage + foin	> 25%	> 72%
Ensilage de maïs	< 30%	0
Herbe totale	> 50%	> 72%
Herbe fermentée	-	0
Fourrages fermentés	-	0

Tableau 1 Valeurs seuils pour chaque type d'aliment, exprimée en % de MS sur la ration totale, respectant les cahiers des charges des AOP Cantal et Laguiole.

Critères (% de MS / ration totale)	Groupe	N calibration	N validation
Présence de Pâturage	Oui	2531	620
	Non	3577	880
Pâturage ≥ 50%	≥ 50	1029	256
	< 50	5078	1255
Concentrés < 28%	< 28	4119	1009
	≥ 28	1989	491
Pâturage + foin ≥ 25%	≥ 25	3211	799
	< 25	2897	701
Ensilage de maïs < 30%	< 30	4091	1021
	≥ 30	2016	479
Herbe totale ≥ 50%	≥ 50	3614	917
	< 50	2493	583
Respect simultané de tous les critères	Tous	1905	650
	Aucun	1683	482

Tableau 2 Effectifs des différents groupes pour tester les critères du cahier des charges pour l'AOP Cantal.

Critères (% de MS / ration totale)	Groupe	N calibration	N validation
Pâturage ≥ 57%	≥ 57	815	197
	< 57	5292	1303
Pâturage + foin ≥ 72%	≥ 72	1021	234
	< 72	5086	1266
Absence de fourrages fermentés	Oui	1303	308
	Non	4804	1192
Absence d'herbe fermentée	Oui	2005	484
	Non	4102	1016
Absence d'ensilage de maïs	Oui	2577	680
	Non	3531	820
Respect simultané de tous les critères	Tous	488	134
	Aucun	1666	477

Tableau 3 Effectifs des différents groupes pour tester les critères du cahier des charges de l'AOP Laguiole.

1.3. ANALYSES STATISTIQUES

La base de données a été séparée pour l'étalonnage (n = 6107) d'une part, et la validation (n = 1500) d'autre part, en utilisant l'algorithme Kennard-Stone (1969). Des modèles de régression PLS (partial least squares) et des analyses discriminantes ont été utilisés pour prédire le pourcentage de MS des différents aliments dans la ration et pour authentifier les critères d'alimentation des cahiers des charges des deux AOP, respectivement. Plusieurs prétraitements mathématiques ont été testés sur les spectres MIR, mais les meilleurs performances de calibration et validation ont été obtenues en utilisant les spectres bruts des laits dans les intervalles de longueurs d'onde suivants : 2989-2561 cm⁻¹,

1809-1712 cm^{-1} et 1600-926 cm^{-1} . Nous avons évalué les modèles de prédictions des proportions d'aliments dans la ration, par le coefficient de détermination en validation externe (R^2V) et l'erreur standard de prédiction (SEP). Les modèles de discrimination ont été évalués en calculant la sensibilité, la spécificité, la précision et l'exactitude. La sensibilité et la spécificité expriment le taux d'erreur au sein d'un groupe à discriminer (l'adhésion ou non à un critère, respectivement), tandis que la précision exprime la capacité du modèle à détecter les échantillons, en respectant un critère sur l'ensemble des échantillons, et l'exactitude exprime la fiabilité générale du modèle.

2. RESULTATS

2.1. VARIABILITE DES CONDITIONS DE PRODUCTION

La composition de la ration était très variable, allant de rations 100% pâturage, à des rations à base d'ensilage de maïs (Figure 1). La grande variabilité observée pour la taille du troupeau (4 à 192 vaches traites) et le niveau de production laitière (4,2 à 40,0 kg/vache/J) témoigne d'une grande diversité de types d'élevage qui s'échelonnent le long d'un gradient qui va d'exploitations utilisant des double-troupeaux (lait et viande) de petite taille avec des races locales assez fréquentes au sein du Massif central, aux grands troupeaux de races laitières spécialisées à haut rendement caractéristiques d'exploitations laitières plus intensives. Les parts moyennes de pâturage, de foin, d'ensilage d'herbe, d'ensilage de maïs et de concentrés étaient respectivement de 18, 17, 12, 19 et 25% de l'apport quotidien en MS. Ces valeurs moyennes (similaires pour le groupe de calibration et de validation) masquent une variabilité très importante en cohérence avec la disponibilité fourragère et l'adaptation saisonnière du régime alimentaire des troupeaux.

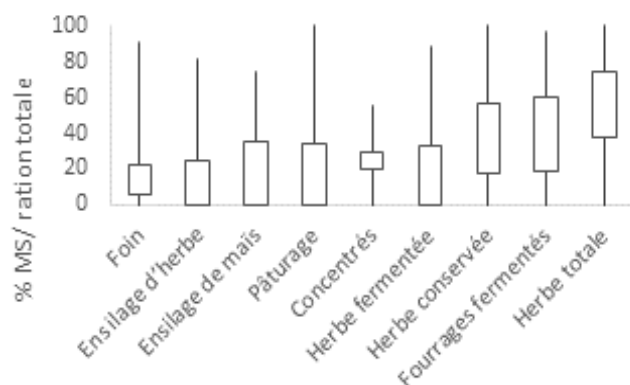


Figure 1 Variation du % des aliments dans la ration des troupeaux.

Aliment (%MS/ ration totale)	Validation	
	SEP	R^2V
Foin	13,3	0,42
Ensilage d'herbe	15,1	0,26
Ensilage de maïs	12,2	0,61
Pâturage	11,7	0,81
Concentrés	6,2	0,26
Herbe fermentée	14,6	0,37
Herbe conservée	14,8	0,61
Fourrages fermentés	14,0	0,67
Herbe totale	12,3	0,68

Tableau 5 Résultats des modèles de prédiction du % des aliments dans la ration.

2.1. PREDICTION DE LA PROPORTION DES ALIMENTS CONSTITUANT LA RATION

La proportion d'herbe pâturée dans la ration, exprimée en % de MS a été prédite avec un modèle ayant un coefficient de

détermination en validation externe (R^2V) de 0,81 et une erreur standard de prédiction (SEP) de 11,7% (Tableau 5). Les proportions de pâturage + foin, d'ensilage de maïs, d'herbe conservée, de fourrages fermentés et d'herbe totale ont été prédites par des modèles ayant des $R^2V > 0,61$ et des SEP < 14,8%. Les coefficients de détermination des modèles pour la prédiction de la proportion d'herbe fermentée et d'ensilage dans la ration sont inférieurs à 0,4.

2.2. AUTHENTIFICATION DES CRITERES ALIMENTAIRES DES CAHIERS DES CHARGES

Les modèles proposés pour certifier le respect des critères des cahiers des charges relatifs à la proportion de pâturage dans la ration ont été de bonne qualité (Tableau 6). Pour les critères « présence de pâturage » et « proportion de pâturage $\geq 50\%$ et $\geq 57\%$ » les proportions de laits bien classés et la spécificité des modèles sont $\geq 90\%$. Leur sensibilité et leur précision sont $\geq 80\%$. Les modèles discriminants pour les critères « proportion de pâturage + foin $\geq 72\%$ », « herbe totale (fraîche + conservée) $\geq 50\%$ », « pâturage + foin $\geq 25\%$ », « absence d'herbe fermentée », « absence d'ensilage de maïs » et « ensilage de maïs $\leq 30\%$ » sont de moins bonne qualité. La proportion d'individus bien classés est $\geq 80\%$, mais soit la sensibilité, soit la précision sont < à 80%. Les modèles obtenus n'ont pas permis de discriminer correctement les exploitations respectant le critère « concentrés < 28% ». Les modèles proposés pour tester le respect de l'ensemble des critères du cahier des charges de chacune des AOP ont une exactitude, une spécificité, une sensibilité et une précision > 90%.

3. DISCUSSION

La qualité des modèles obtenus pour prédire la proportion des fourrages dans la ration est équivalente à celle des modèles utilisés en routine pour prédire la composition du lait (en minéraux ou en acides gras par exemple) ou son aptitude fromagère (paramètres de coagulation, rendements fromagers). Ces modèles ont été considérés comme fiables pour une application en sélection génétique ou pour identifier des laits ayant des caractéristiques spécifiques (De Marchi et al., 2014 ; Coppa et al., 2017). Les erreurs de prédiction de ces modèles sont comprises entre 11 et 15%. Lorsque l'on compare les SEP des modèles ici présentés à ceux de constituants déterminés analytiquement, l'incertitude de la méthode de référence doit être prise en compte. En effet, les données issues des enquêtes (considérées ici comme méthode de référence) peuvent être parfois approximatives. Par exemple, les concentrés ne sont pas toujours pesés, le foin est donné en balles de poids variable, la teneur en MS de l'ensilage peut varier entre différentes séries de balles enrubannées ou d'une coupe à l'autre au sein d'un même silo, etc. Les erreurs d'estimation de la consommation d'herbe au pâturage sont encore plus importantes. Une erreur d'estimation de 10 à 15% pour les différents constituants de la ration peut être considérée comme intrinsèque aux données de référence et cohérente avec le SEP de nos modèles. Les principales longueurs d'onde associées dans nos modèles aux prédictions et discriminations des types de rations étaient : i) celles comprises entre 900 et 1 500 cm^{-1} , qui sont liées à les liaisons C-H et C-O; ii) celles comprises entre 1550 et 1570 cm^{-1} , qui sont liées aux protéines iii) et enfin celles de 2 855 à 2 928 cm^{-1} et de 1 805 à 1 736 cm^{-1} , qui sont liées à l'absorption des lipides. Ces résultats semblent confirmer que les modèles de prédiction et de discrimination des types de rations s'appuient majoritairement sur les différences de profil en acides gras (AG) du lait induites par la composition des rations (Coppa et al., 2017). Les meilleurs modèles ont d'ailleurs été obtenus pour prédire ou discriminer la proportion d'herbe pâturée dans la ration. Cette dernière est connue pour être le facteur de variation le plus important du

profil en acides gras (AG) du lait (Coppa et al., 2019; Prache et al., 2020). Ces résultats confirment l'empreinte unique que le pâturage est capable de conférer aux produits laitiers. La sensibilité et la précision des modèles discriminant les différentes proportions de pâturage dans l'alimentation des vaches diminuent lorsque le seuil d'herbe pâturée augmente de 0 à 50 puis 57% de la ration. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que, en considérant un taux d'erreur constant dans les données de référence (discuté précédemment), la probabilité d'une estimation incorrecte sur les données de référence apparaît plus élevée dans le groupe ayant la plus faible amplitude de variation de la proportion d'herbe dans la ration. De plus, les erreurs de discrimination les plus élevées ont été observées pour le petit groupe. Enfin, les faibles valeurs obtenues pour la sensibilité (comme dans les modèles « absence de fourrage fermenté » et « absence d'herbe fermentée ») ou de spécificité (comme dans le modèle « concentré <28% ») ne sont pas surprenants lorsque l'on essaye de discriminer les aliments de la ration considérés un par un. En effet, ces critères offrent *in fine* de nombreuses possibilités, qui font que des rations complexes et variées coexistent dans les groupes respectant ou non, le critère du cahier des charges ce qui rend la discrimination plus complexe. Les résultats de discrimination des modèles qui regroupent la totalité des critères (tous respectés / aucun respecté) sont très performants pour les deux fromages AOP. Ils sont meilleurs que les modèles discriminant les critères considérés un par un. Ce résultat met l'accent sur l'importance de considérer la ration dans son ensemble pour caractériser les laits correspondants. Plus les rations permises sont simples (avec un nombre restreint d'aliments autorisés) plus les performances de discrimination s'améliorent, comme le montrent les meilleurs résultats obtenus pour le Laguiole comparativement au Cantal. Même si les résultats des modèles obtenus sont prometteurs, il est nécessaire de rappeler qu'il s'agit là d'indicateurs et non pas de mesures. Une interprétation très prudente des résultats est donc toujours requise, notamment si l'on ne considère qu'un échantillon. En revanche, l'incertitude des modèles pourrait être en partie compensée par des mesures sur un grand nombre d'échantillons. Cela pourrait être le cas lors d'une utilisation en routine qui permettrait de prédire la composition de la ration lors de chaque prélèvement de lait de tank réalisé pour le paiement du lait (> 3 échantillons par semaine /ferme). Au-delà de l'incertitude de la mesure de référence et de l'erreur du modèle, il est nécessaire de rappeler également que les critères et les seuils ont été calculés sur une moyenne annuelle. Cette simplification oblige à ne pas considérer une prédiction sur un seul échantillon de lait pour

vérifier ou non le respect du cahier de charge, mais plutôt de se focaliser sur un bilan sur une durée plus longue (par exemple à l'échelle de la saison pour le pâturage ou sur l'année pour les concentrés). Ce principe est d'autant plus important en considérant les variations saisonnières de la composition de la ration selon la disponibilité des fourrages. Enfin, les indicateurs développés avec les modèles décrits n'ont pas pour vocation de se substituer aux contrôles actuellement mis en œuvre pour vérifier les promesses faites aux consommateurs par les cahiers des charges. Ils constituent plutôt un outil pour mieux orienter et cibler les contrôles. Ils permettront également de consolider le système d'authentification et de contrôle, en renforçant l'image et la crédibilité des filières vis-à-vis des consommateurs.

CONCLUSION

Les modèles de prédiction de la proportion des aliments dans la ration, tout comme les modèles de discrimination, peuvent permettre de fournir via les analyses de routine réalisées sur les laits de tank, des indicateurs sur la composition de la ration des troupeaux laitiers. Ces indicateurs, obtenus à faible coût, seront utiles aux éleveurs, aux filières et aux consommateurs pour vérifier et consolider les promesses faites par les filières en terme d'alimentation des animaux via leurs cahiers de charges.

Ce projet « Alimir » a été financé par le CNIEL. Les auteurs remercient également le Comité Interprofessionnel des fromages du Cantal (CIF) et le syndicat du fromage de Laguiole, tous deux fortement impliqués dans le projet. Enfin, les auteurs remercient Y. Goudron et F. Picard de l'INRAE pour leur appui technique.

Andueza D., Agabriel C., Constant I., Lucas A., Martin B. 2013. Food Chem., 14, 209–214.
Coppa M., Chassaing C. Sibra C., Cornu A., Verbič J., Golecký J., Engel E., Ratel J., Ferlay A., Martin B. 2019. J. Dairy Sci. 102:10483–10499.
Coppa M., Martin B., Agabriel C., Chassaing C., Sibra C., Constant I., Graulet B., Andueza D., 2012. J. Dairy Sci., 95, 5544–5551.
Coppa M., Revello-Chion A., Giaccone D., Tabacco E., Borreani G., 2017. J. Dairy Sci., 100 ,8705–8721.
De Marchi, M., Toffanin V., Cassandro M., Penasa M.. 2014. J. Dairy Sci., 97, 1171–1186.
Kennard R.W., Stone L.A., 1969. Technometrics, 11:137-148.
Prache S., Martin B., Coppa M., 2020. Animal. 14:854–863.
Valenti, B., Martin B., Andueza D., Leroux C., Labonne C., Lahalle F., Larroque H., Brunschwig P., Lecomte C., Brochard M., Ferlay A., 2013. Int. Dairy J. 32, 26–32.

Fromage AOP	Critères	Sensibilité (%)	Spécificité (%)	Précision (%)	Exactitude (%)
Cantal	Présence de Pâturage	87,6	92,4	89,0	90,4
	Pâturage ≥ 50%	78,5	96,7	82,8	93,7
	Concentrés < 28%	88,8	34,2	73,6	71,0
	Pâturage + foin ≥ 25%	82,5	84,7	86,0	83,5
	Ensilage de maïs < 30%	88,3	74,7	87,8	83,9
	Herbe totale ≥ 50%	87,9	84,3	89,2	86,5
	Respect simultané de tous les critères	91,1	89,2	92,6	90,3
Laguiole ¹	Pâturage ≥ 57%	66,5	97,6	81,1	93,5
	Pâturage + foin ≥ 72%	44,5	97,8	80,3	89,1
	Absence de fourrages fermentés	54,4	96,1	79,0	87,3
	Absence d'herbe fermentée	61,1	89,7	74,3	80,3
	Absence d'ensilage de maïs	80,0	85,9	80,9	83,4
	Respect simultané de tous les critères	100,0	99,4	97,8	99,5

Tableau 6 Résultats de validation des modèles de discrimination pour authentifier les critères alimentaires indiqués dans les cahiers des charges des fromages AOP Cantal et Laguiole.

¹ le modèle pour le critère des concentrés (< 28 %) est commun aux 2 fromages AOP.