

# PREDICTION DU TAUX DE FONTE DU FOIE GRAS DE CANARD PAR MESURES NON DESTRUCTIVES

**Cordier, G.<sup>1</sup>, Zuber, F.<sup>2</sup>, Vautier, A.<sup>3</sup>, Lhommeau, T.<sup>3</sup>, Bourin, M.<sup>4</sup>,  
Bouvarel, I.<sup>4</sup> et Litt, J.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> CTCPA, ZAC du Mouliot, 2 allée Dominique Serres, 32000 AUCH

<sup>2</sup> CTCPA, 449 Avenue Clément Ader, 84911 AVIGNON cedex

<sup>3</sup> IFIP, La motte au Vicomte 35651 LE RHEU cedex

<sup>4</sup> ITAVI, INRAE Centre Val de Loire, UMR BOA - Unité 4, 37380 NOUZILLY

<sup>5</sup> ITAVI, Palmipôle, Maison de Agriculture, Cité Galliane, 40005 MONT DE MARSAN cedex  
[fzuber@ctcpa.org](mailto:fzuber@ctcpa.org)

## RÉSUMÉ

La sélection des matières premières foies gras crus, vis-à-vis des destinations de transformation (classement des foies gras) se fait suivant de multiples critères dont le principal est la capacité d'un foie à présenter une fonte limitée pendant le traitement thermique. Le critère principal de tri des foies gras crus est actuellement leur poids, critère qui reste toutefois insuffisant pour opérer un classement prédictif de fonte. Notre projet visait à la mise au point d'outils de mesures physiques rapides non destructives pouvant contribuer à classer les foies gras crus post abattage, puis à la mise au point de modèle permettant une prédiction du taux de fonte. Deux techniques ont été testées : (i) Mesure spectrométrique dans le proche infra-rouge NIRS, par réflectance de surface ; (ii) Mesure spectrométrique par imagerie hyperspectrale. Des corrélations robustes ont été recherchées pour la prédiction de la fonte des foies gras, en relation avec leur itinéraire amont agricole (élevage, gavage) et la mesure spectrométrique par NIRS et imagerie hyperspectrale. La phase de faisabilité achevée montre que les deux technologies sont utilisables pour la prédiction du taux de fonte du foie gras de canard, ce qui apporte la preuve de concept d'un possible tri des foies gras crus, avant ou après prérefroidissement, selon leur taux de fonte prédictif : fortes corrélations en validation externe pour le NIRS ( $r > 0,70$ ) ; fortes corrélations en validation croisée pour l'imagerie hyperspectrale ( $r > 0,70$ ). L'imagerie semble plus adaptée en industrie : fragilité du foie à chaud ; ne nécessite aucun contact direct. Il est nécessaire d'augmenter la robustesse du modèle avec de nouvelles séries de mesures. Ces résultats très encourageants permettent d'envisager une suite avec la construction d'un outil adapté à une utilisation effective sur site industriel. Le Projet PRESTIGE a reçu le soutien de FranceAgriMer - Casdar et du CIFOG.

## ABSTRACT

**Prediction of duck fatty liver melting rate through nondestructive measurements, for improvement of sensory quality.**

Selection of raw Foie Gras (duck fatty liver) according to further transformation is performed using several criteria, the most important being the ability to display reduced melting rate during thermal treatment. Usual criterion for sorting is the weight of the liver; however, it doesn't reflect properly the predictive melting rate. Our projects aimed to design predictive, non-destructive tools, likely to help sorting through prediction of the melting rate of raw Foies Gras after slaughtering. Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) and Hyperspectral Image Analysis were tested on whole raw foie gras samples in relationship with their melting behavior. Reliable correlations were observed for the melting prediction with both techniques, indicating the proof of concept for possible assisted sorting of raw foie gras. Strong correlation through external validation was measured for NIRS ( $r > 0,70$ ) ; strong correlation also for hyperspectral imaging ( $r > 0,70$ ). Imaging seems more suitable for industrial sorting, due to liver fragility : measurement is performed contactless. More trials are needed to enhance the robustness of the predictive model. Those encouraging results allow to go further with the construction of an industrial prototype of sorter. The PRESTIGE project received FranceAgriMer – Casdar and CIFOG financial supports

## INTRODUCTION

Le classement des matières premières foies gras crus, pour les orienter vers leurs procédés de transformation, se fait suivant de multiples critères dont un majeur qui est l'estimation de la capacité d'un foie à conserver sa graisse et à présenter une fonte limitée pendant l'opération de traitement thermique (cuisson, pasteurisation, stérilisation). En outre, la conformité réglementaire des produits transformés implique un niveau de fonte inférieur à 30%. Les déclassements entraînés par un niveau de fonte supérieur à ce seuil engendrent des pertes financières importantes chez les industriels et transformateurs de foie gras.

Aussi, le taux de fonte influe de façon prépondérante sur la qualité organoleptique du produit transformé : un produit avec un faible taux de fonte lipidique présente une texture plus souple, plus fondante en bouche, non friable ; il est plus savoureux et est préféré des consommateurs. Un faible taux de fonte est donc un des critères majeurs de qualité sensorielle pour le consommateur.

Aujourd'hui, le critère principal de tri retenu par les professionnels est le poids, en relation directe avec l'engraissement du foie (Théron *et al.* 2013). Or le seul critère «poids», jugé peu précis, est toutefois insuffisant pour opérer un classement prédictif du comportement de fonte lors du traitement thermique. Une solution de prédiction plus fiable et précise pouvant être mise à disposition des acteurs de la filière foie gras, est bien identifiée comme un enjeu qualitatif et financier important.

Le projet PRESTIGE mis en œuvre par le CTCPA, l'IFIP et l'ITAVI avait pour objectifs :

- (i) La mise au point d'outils de mesures physiques rapides non destructives pouvant contribuer à classer les foies gras crus post abattage,
- (ii) La mise au point de modèle permettant une prédiction du comportement technologique lors d'un traitement thermique, c'est-à-dire une estimation du taux de fonte prévisionnel.

*Le Projet PRESTIGE a reçu le soutien de FranceAgriMer - Casdar et du CIFOG.*

## 1. MATERIELS ET METHODES

### 1.1. Expérimentations et mesures

Le projet consiste à établir des corrélations prédictives entre : (i) Les résultats de différentes mesures physiques non destructives des foies gras crus de canard, et (ii) Le taux de fonte mesuré expérimentalement sur ces mêmes foies.

Les trois techniques qui ont été sélectionnées pour l'étude sont les suivantes :

1) Mesure non ou peu invasive de conductivité électrique des foies gras (conductimètre portable de laboratoire)

2) Mesure spectrométrique dans le proche l'infrarouge, par réflectance de surface (Near Infra Red Spectroscopy – NIRS). L'outil utilisé est un spectromètre ASDI Labspec4 (350-2500nm) équipé d'une sonde de réflexion ref. A111206 de 2 cm de diamètre mise en contact du foie sur trois zones (haut, milieu et bas du grand lobe, notées 1, 2 et 3) ; 1 sec. d'acquisition, 10 spectres moyennés par échantillon.

3) Mesure spectrométrique par imagerie hyperspectrale (HSI). L'outil de collecte pour l'imagerie hyperspectrale est un prototype fermé à l'éclairage indirect et équipé de deux caméras hyperspectrales couplées. La mesure se fait sans contact en examinant une ROI (Region Of Interest) dans l'image. Les mesures non destructives sont réalisées sur place (abattoir), sur chaque foie, avant (32°C) et après (13°C) refroidissement.

Après mesures, les foies gras crus sont transformés en foies gras entiers pasteurisés ou stérilisés suivant un process similaire aux usages industriels (assaisonnement, température, barèmes, etc.). Les prélèvements correspondent à deux carottes de 90g, chacune réalisée dans le grand lobe pour estimer un taux de fonte à 2 températures de cuisson : 80°C et 105°C. S'ensuit un stockage minimum de 2 semaines à +4°C, puis mesure du taux de fonte au démoulage, des foies gras pasteurisés ou stérilisés.

Des expérimentations en 2018 ont permis d'évaluer la faisabilité technique (preuve de concept) d'une estimation du taux de fonte des foies gras par la combinaison de plusieurs mesures non destructives sur le foie gras cru. Les 109 foies gras utilisés étaient issus d'itinéraires amont variés, et préalablement répartis sur le critère de leur poids : [petits < 400g], [moyens 450-550g] et [gros > 600g].

En 2019, la suite des essais avait pour objet d'établir des corrélations robustes pour la prédiction du comportement technologique de 213 foies gras, en relation avec leur itinéraire amont agricole (élevage, gavage) et les mesures non destructives après abattage. Les canards ont alors été élevés et gavés en conditions tracées et contrôlées par l'ITAVI (Palmipôle).

### 1.2. Construction d'un modèle prédictif

L'exploitation statistique des résultats a été réalisée par l'IFIP : construction de modèles PLS (Partial Least Square) et estimation des performances de prédiction par validation croisée avec le suivi des deux paramètres suivants :

- $R^2_{cv}$  = coefficient de détermination des modèles reliant les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle lors de la validation croisée. Plus le  $R^2$  est élevé, meilleur est le modèle
- RMSE<sub>cv</sub> = Root Mean Squared Error of cross-validation, qui représente l'erreur de prédiction moyenne du modèle lors de la validation croisée. Plus le RMSE est bas, meilleur est le modèle.

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION

À l'issue de la campagne de 2018, les résultats des mesures de conductivité électrique n'ont pas été pertinents, après comparaison aux taux de fonte des foies par corrélations en validation croisée.

Autrement dit, la mesure de conductivité, seule, corrélée au taux de fonte ou au poids du foie n'a pas donné d'équation satisfaisante. Cette méthode pourrait éventuellement être couplée à d'autres paramètres afin de parvenir à une corrélation.

Les résultats de la spectrométrie NIRS obtenus en 2018 (Tableaux 1 et 2) ont été plus concluants et ont permis d'obtenir des  $R^2_{cv}$  supérieurs à 0,50 avec les taux de fonte. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour le taux de fonte après stérilisation ( $R^2_{cv}=0,58$  versus  $R^2_{cv}=0,48$  pour la pasteurisation).

La précision était équivalente entre les mesures sur les foies à 32°C et 13°C. Enfin, les meilleurs résultats ont systématiquement été obtenus en zone 1 de mesure, dans la partie la plus haute du foie. Ces résultats encourageants ont rendu possible l'organisation des essais en 2019 avec notamment la spectrométrie par HSI.

Les tableaux 3 et 4 présentent les résultats obtenus en 2019. Les résultats de la spectrométrie NIRS mettent en avant la robustesse des modèles NIRS de l'action 2018 en validation externe (croisement avec les données de l'action 2019, corrélation rendement prédit/observé  $r=0,70$ ).

Cependant, il existe des différences importantes entre les moyennes et les dispersions des taux de fonte entre 2018 et 2019 (moins de variabilité sur 2019), ce qui nuit à la précision des modèles et peut induire un biais. Ces éléments mettent en évidence l'importance d'inclure une forte variabilité dans la population de calibration.

Tant en pasteurisation qu'en stérilisation, la meilleure précision revient à l'imagerie hyperspectrale sur ce jeu de données. En effet, la calibration présente un modèle mieux ajusté ( $R^2_c$  supérieur) et une erreur plus faible et la corrélation est supérieure en validation croisée  $r=0,73$  (contre  $r=0,60$ , obtenu à la suite de la pasteurisation en zone 1 et avec la méthode NIRS et  $r=0,62$  sur les foies stérilisés, mesures réalisées en zone 1 avec la méthode NIRS).

## CONCLUSION

La phase de faisabilité achevée met en lumière l'intérêt de deux des trois méthodes à l'épreuve, à savoir le NIRS et l'imagerie hyperspectrale, pour la prédiction sur matière première crue, du taux de fonte du foie gras de canard pasteurisé ou stérilisé.

Les technologies NIRS (spectrométrie dans le proche l'infrarouge) et d'imagerie hyperspectrale sont toutes les deux utilisables pour le tri des foies selon leur taux

de fonte : Les résultats montrent un pourcentage de la variation de taux de fonte expliqué proche de 70% soient :

- De fortes corrélations en validation externe pour le NIRS ( $r > 0,70$ )

- De fortes corrélations en validation croisée pour l'imagerie hyperspectrale ( $r > 0,70$ )

Les modèles NIRS et imagerie hyperspectrale montrent, en outre, des similitudes, bien que l'imagerie hyperspectrale présente une précision supérieure à celle du NIRS en validation croisée, probablement du fait de la meilleure représentativité des spectres HSI.

Les résultats (modèles prédictifs obtenus) sont dépendants de la température, aussi un modèle devra être développé pour une température de mesure donnée. Il serait préférable de mesurer à chaud immédiatement après abattage, à 32°C (mesure plus universelle car praticable dans tous les abattoirs).

Finalement, en prenant en compte la fragilité du foie à chaud, l'imagerie hyperspectrale, qui ne nécessite aucun contact direct, semble toutefois plus adaptée en industrie. De plus, cette technique est potentiellement plus précise que le NIRS (à confirmer sur des essais de validation externe) et le développement d'une machine industrielle serait possible sur la base de l'équipement déjà développé par l'IFIP « CSB-jamboflash » - un outil visionique de tri des défauts de structure de la viande de porc.

Aussi, une suite du projet est envisagée :

La conception et la construction d'un prototype industriel en imagerie hyperspectrale pour la prédiction du taux de fonte du foie gras, capable de prédire en ligne à une vitesse de convoyeur de 0,15 m/sec.

En d'autres termes, nous proposons de donner suite à l'étude avec une valorisation à réaliser en partenariat avec plusieurs acteurs, dont l'IFIP pour le développement des modèles de prédiction, un second partenaire pour la conception du logiciel, et un équipementier serait choisi pour concevoir l'outil de collecte selon le cahier des charges rédigé.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andrés, S. *et al.* 2007. Meat Science, 76, 509–516.
- Bastianelli D. *et al.* 2009. Journées de la Recherche Avicole.
- Baudonnet, C. 1993. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 182p.
- Cazeils, J. *et al.* 1999. *Lipids*. 34 (9) : 937-942.
- Craigie, C. *et al.* 2017. Meat Science, 132, 19-28.
- Gaitan-Jurado A. *et al.* 2008. Meat Science 78 (2008) 391–399.
- Marie-Etancelin C. *et al.* 2010. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras.
- Marie-Etancelin C. *et al.* 2014. *Genetics Selection Evolution* 2014, 46:38.
- Molette *et al.* 2013, INRA Productions Animales, 26(5) 415-424
- Molette C. *et al.* 2001. Poultry Science: 80(11):1625.
- Sobczak, Estelle. 2003. Information Technique CTCPA n° 215
- Théron L., 2011. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse,
- Théron, L, *et al.* 2013 . Inra Productions Animales, 26(5) : 415-424
- Togersen G. *et al.* 1999. Meat Science 51: 97-102.
- Wold J. *et al.* 2011. Meat Science 89:317–324.

**Tableau 1.** Résultats du taux de fonte en 2018 après traitement thermique.

| Taux de fonte (g/100g)                 | 13/09/2018    |      | 14/09/2018   |      |
|----------------------------------------|---------------|------|--------------|------|
|                                        | TFA           | TFB  | TFA          | TFB  |
| moyenne                                | 15,7          | 34,7 | 14,7         | 32,7 |
| écart type                             | 8,9           | 11,0 | 7,9          | 10,7 |
| <i>Poids foies (g) (et écart-type)</i> | 630,2 (130,7) |      | 630,6 (99,4) |      |

TFA : pasteurisation à 80°C, Valeur Pasteurisatrice = 40 à 50 minutes à cœur ;  
TFB : stérilisation à 105°C, Valeur Stérilisatrice = 0,6 minute à cœur

**Tableau 2.** Caractéristiques des étalonnages NIRS des taux de fonte obtenus en 2018.

| Traitement thermique | T°C de mesure | Site de mesure | R <sup>2</sup> c | R <sup>2</sup> cv | rmsecv |
|----------------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|--------|
| Pasteurisation       | 32°C          | S1             | 0,54             | 0,48              | 6,04   |
| Pasteurisation       | 13°C          | S1             | 0,54             | 0,47              | 6,13   |
| Stérilisation        | 32°C          | S1             | 0,65             | 0,58              | 6,95   |
| Stérilisation        | 13°C          | S1             | 0,63             | 0,54              | 7,45   |
| Stérilisation        | 13°C          | S2             | 0,63             | 0,52              | 7,47   |

**Tableau 3.** Résultats du taux de fonte en 2019 après traitement thermique.

| Taux de fonte (g/100g)                 | 29/03/2019    |      | 16/04/2019   |     |
|----------------------------------------|---------------|------|--------------|-----|
|                                        | TFA           | TFB  | TFA          | TFB |
| moyenne                                | 9,6           | 10,3 | 6,6          | 6,2 |
| Écart type                             | 5,9           | 6,1  | 4,6          | 4,0 |
| <i>Poids foies (g) (et écart-type)</i> | 610,2 (111,7) |      | 508,6 (89,9) |     |

TFA : pasteurisation à 80°C, Valeur Pasteurisatrice = 40 à 50 minutes à cœur ;  
TFB : stérilisation à 105°C, Valeur Stérilisatrice = 0,6 minute à cœur

**Tableau 4.** Caractéristiques des étalonnages NIRS et HSI des taux de fonte obtenus en 2019.

| Traitement thermique | T°C de mesure | Site de mesure | R <sup>2</sup> c | R <sup>2</sup> cv | rmsecv |
|----------------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|--------|
| Pasteurisation       | 32°C          | ROI            | 0,58             | 0,53              | 3,83   |
| Pasteurisation       | 32°C          | NIRS S1        | 0,41             | 0,36              | 4,47   |
| Stérilisation        | 32°C          | ROI            | 0,58             | 0,53              | 3,87   |
| Stérilisation        | 32°C          | NIRS S1        | 0,43             | 0,38              | 4,50   |