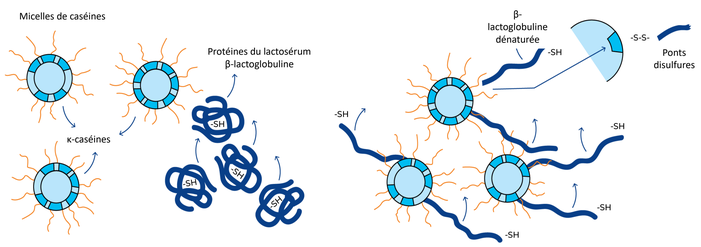
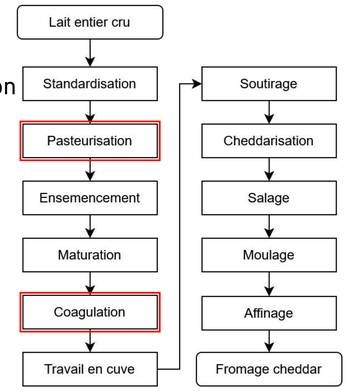
Lait et infrarouge : Prédire pour mieux transformer

Jules Larouche et Julien Chamberland
STELA - Centre de recherche en sciences et technologie du lait, Université Laval

Contexte de la recherche

La qualité des protéines a un impact majeur sur la transformation du lait en fromagerie.





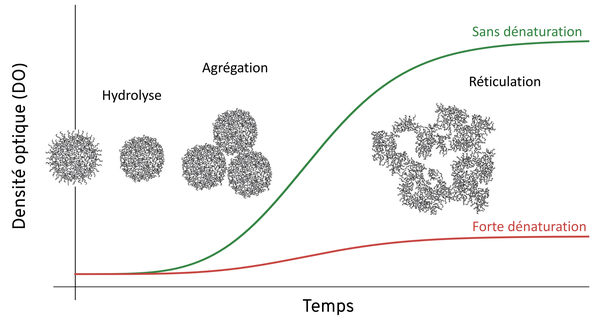
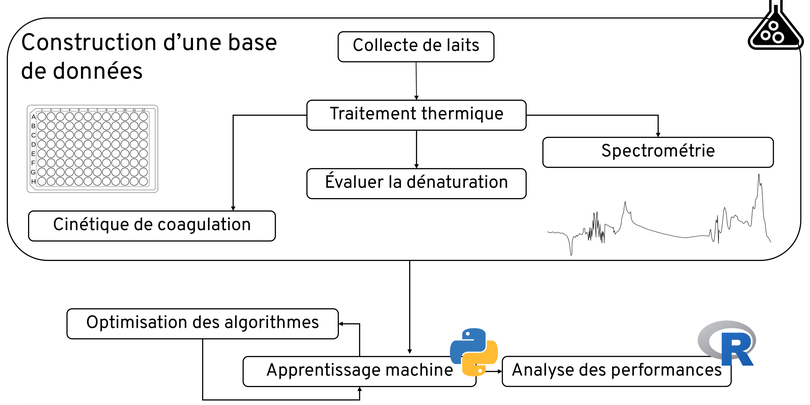


Figure 1 : Processus de coagulation selon le taux de dénaturation des protéines sériques et modification des micelles de caséines

- Pasteurisation → Qualité du lait et propriétés de coagulation
- Spectrométrie infrarouge proche (NIR) et moyen (Mid-IR)
  - Industrie ⇒ lactose, caséines, protéines sériques, matière grasse et autres constituants mineurs.
  - Recherche ⇒ Structure des protéines soumises à différents traitements physiques et chimiques.

Objectif : Utiliser des approches d'apprentissage machine afin de prédire les propriétés de coagulation de laits ayant subi un traitement thermique.

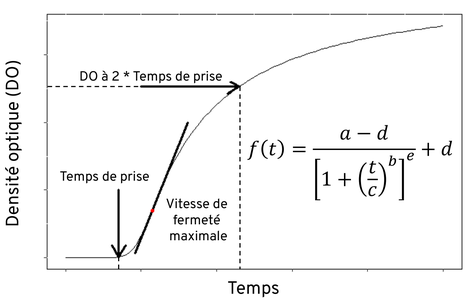
Approche de la recherche



Collecte des laits

- Contrôle laitier :
  - Septembre 2024
  - Octobre 2024
  - Février 2025
- 82 laits de 50 vaches

Propriétés de coagulation



$$f(t) = \frac{a-d}{\left[1+\left(\frac{t}{c}\right)^{b}\right]^{e}} + d$$

Traitements thermiques

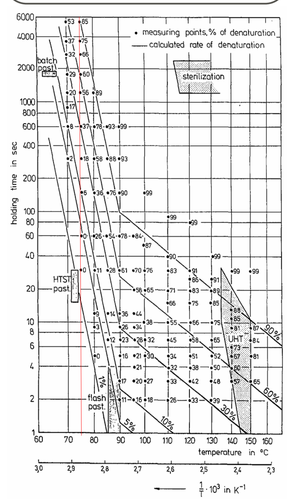


Figure 2 : Choix des temps de traitement à une température de 75°C selon le taux de dénaturation de la β-lactoglobuline (Dannenberg & Kessler, 1988)

Résultats et applications

Base de données réalisée

Tableau 1 : Variation de la composition et des propriétés de coagulation selon le temps de traitement

Composante	0 min N = 81[1]	1 min N = 53[1]	6 min N = 52[1]	10 min N = 76[1]	15 min N = 26[1]	20 min N = 26[1]	Valeur p[2]
Matière grasse (%m/m)	1,10 (0,52)	1,32 (0,42)	1,23 (0,46)	0,94 (0,40)	0,65 (0,30)	0,59 (0,21)	<0,001
Protéine brute (%m/m)	3,81 (0,39)	3,81 (0,38)	3,79 (0,40)	3,81 (0,41)	3,86 (0,41)	3,85 (0,41)	>0,09
Protéines vraie (%m/m)	3,50 (0,36)	3,49 (0,35)	3,48 (0,37)	3,48 (0,37)	3,52 (0,37)	3,50 (0,37)	>0,09
Caséine (%m/m)	2,92 (0,30)	2,92 (0,30)	2,90 (0,31)	2,90 (0,31)	2,93 (0,31)	2,92 (0,31)	>0,09
Lactose (%m/m)	4,90 (0,22)	4,87 (0,23)	4,88 (0,24)	4,91 (0,22)	4,97 (0,18)	4,96 (0,18)	0,2
Solides (%m/m)	10,81 (0,67)	11,00 (0,59)	10,90 (0,60)	10,65 (0,59)	10,46 (0,59)	10,38 (0,52)	<0,001
Urée calculée par NPN (mg/100 mL)	20,7 (5,7)	22,7 (6,4)	22,9 (6,0)	23,0 (5,6)	22,5 (3,3)	22,6 (3,3)	0,13
Temps pour atteindre la vitesse max (min)	31 (10)	36 (11)	39 (13)	38 (9)	40 (11)	44 (15)	<0,001
Vitesse maximale (DO / min)	0,035 (0,016)	0,029 (0,007)	0,030 (0,008)	0,033 (0,012)	0,033 (0,015)	0,032 (0,012)	0,049
Temps de prise (min)	0,95 (0,08)	0,96 (0,03)	0,96 (0,03)	0,96 (0,03)	0,96 (0,02)	0,96 (0,03)	0,7

[1]Moyenne (ET)

[2]Analyse de la variance à un facteur

Quelle est la meilleure approche ? – À venir

Données d'entrée	Traitements	Algorithmes	Prédictions
FTIR et/ou NIR	Aucun	PLSDA	Temps de traitement
Composition +Spectre NIR	PCA / ICA	SVM	Dénaturation
Composition + Spectre FTIR	Sélection de régions	XGBoost	Propriétés de coagulation
Composition + NIR + FTIR	Savitzky–Golay + dérivée	KNN	
	Retrait des bandes corrélées		

Bénéfices potentiels

Économiques

- Améliore la maturité technologique d'outils développés précédemment :
  - Fanélie Dormenval (2024) dans le cadre de la CLE en technologie fromagère.

Composition lait ⇅ + Procédé ⇅ = Produit =

Tableau 2 : Résultats de prédiction l'aide d'un modèle de régression linéaire multiple avec la température comme facteur variable (Dormenval, 2024)

Composition du lait				Paramètres de coagulation recommandés			Fermeté prédite (Pa)
Concentration en caséines (%)	Ratio caséine sur gras	Ratio protéines sériques microparticulées sur gras	Température de traitement[1] (°C)	Température de coagulation (°C)	Dose de $CaCl_2$[2] (%)	Dose de coagulant[3] (%)	
2,8	0,5	0,1	74,5	21,75	0	0,0030	48,5
2,8	0,5	0,1	75,0	30,75	0	0,0033	49,7
2,8	0,5	0,1	75,5	31,25	0,019	0,0090	49,9
2,8	0,5	0,1	77,5	32,25	0,018	0,0078	50,0

[1]Traitement thermique de 15 secondes

[2]Dosage avec une solution de CaCl2 32% (m/m)

[3]Concentration finale de 1000 IMCU/ml de chymosine

(Dormenval, 2024)

Sociaux

- Faciliter la formation de la relève
- Aider au contrôle et à l'adaptation des procédés
- Aider à la prise de décisions : plus faciles et rapides.

Références

Bylund, G. (2003). Dairy processing handbook.
Croguennec, Jeantet & Brulé. (2008). Fondements physicochimiques de la technologie laitière.
Dannenberg & Kessler (1988). Journal of Food Science, 53, 258–263.
Dormenval (2024). Développement d'un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des paramètres de coagulation du lait defromagerie.

Merci à nos partenaires !