



# **Les protéines du lait de vache : composition, impacts santé, facteurs de variation et liens avec la fromageabilité**

*Atelier – Assises FNPL- 3 décembre 2025*

Cécile Laithier - Idele

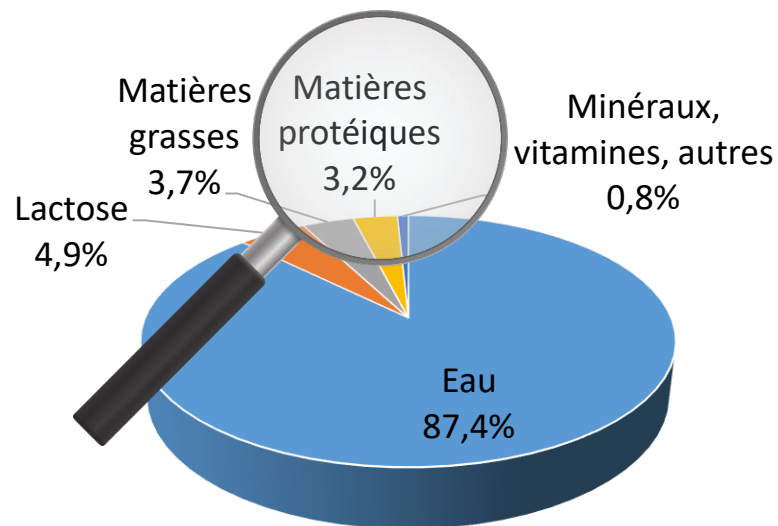
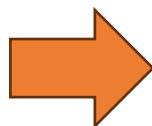


- Les protéines du lait de vache : rappel de la composition du lait, présentation des différentes protéines et de leur part relative
- Liens avec la fromageabilité du lait
- Leur synthèse dans le lait
- Bénéfices/risques pour la nutrition et santé humaine
- Les facteurs de variation de la composition du lait en protéines :
  - Importance de la génétique : héritabilité
  - Facteurs génétiques : polymorphisme, effet race
  - Facteurs physiologiques : stade de lactation, âge, numération cellulaire
  - Facteurs alimentaires : régime fourrager, niveau et nature des apports azotés et énergétiques
- Synthèse



# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE

## Leur place dans la composition du lait



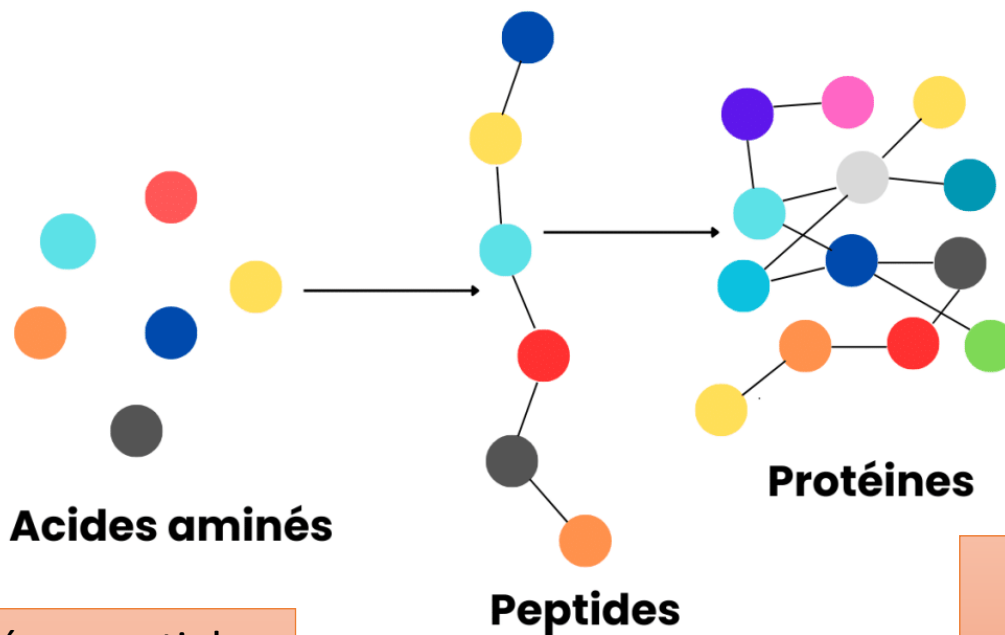
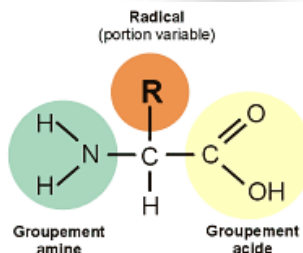
Source : Sibra et al., 2014

**Les matières protéiques représentent 95% de la matière azotée totale du lait, qui comprend aussi notamment l'urée**



# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE

## Les acides aminés, éléments constitutifs des protéines



- Acides aminés essentiels (9) : non fabriqués par notre organisme
- Acides aminés semi-essentiels
- Acides aminés non essentiels

Séquence d'acides aminés reliés par des liaisons

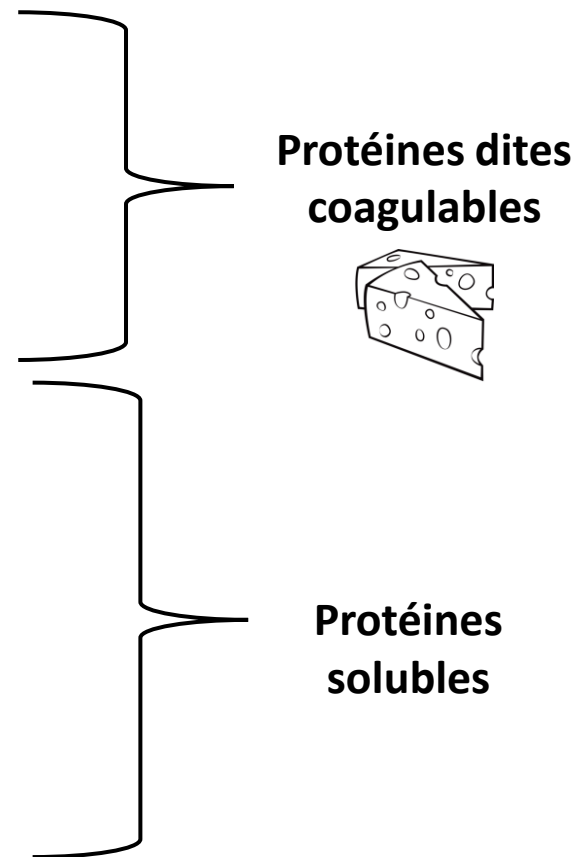
Forme (configuration) spécifique à chaque protéine



# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE

## Nature et importance des différentes protéines

|  |                        |
|--|------------------------|
| <b>Caséines totales</b>  | <b>≈ 80 % (26 g/l)</b> |
| Caséine $\alpha$ 1 et $\alpha$ 2   | 12,0 (46)              |
| Caséine $\beta$  | 9,0 (36)               |
| Caséine K  | 3,5 (13)               |
| Caséine $\gamma$   | 1,5 (6)                |
| <b>Protéines sériques totales</b>  | <b>≈ 20 % (6 g/l)</b>  |
| $\beta$ -Lactoglobuline  | 2,7 (45)               |
| $\alpha$ -Lactalbumine   | 1,5 (25)               |
| Albumine sérique bovine  | 0,3 (5)                |
| Immunoglobulines   | 0,7 (12)               |
| Protéose peptone, lactoferrine, transferrine, membrane des globules gras | 0,8 (13)               |



Source : Sibra et al., 2014 ; Gillis et al., 2018

# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE : DEVENIR DANS LES FROMAGES



## Organisation dans le lait frais : micelles dispersées

### Micelle de caséine

caséine  $\kappa$

● Calcium, phosphore

caséines  $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$  et  $\beta$

Charge nette  $<0$  au pH du lait

Petite micelle

Taille des micelles = f[caséine  $\kappa$ ]

## FABRICATION FROMAGERE

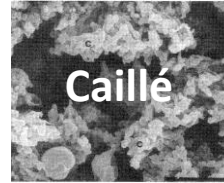
## AFFINAGE / STOCKAGE



+

Présure  
Bactéries lactiques

=



+

Sel  
+ Ambiance des caves

=



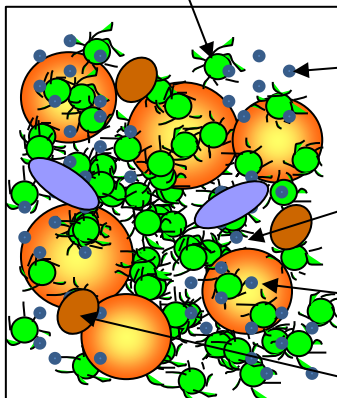
Micelles de caséines

± Coagulation  
± Acidification  
± Égouttage

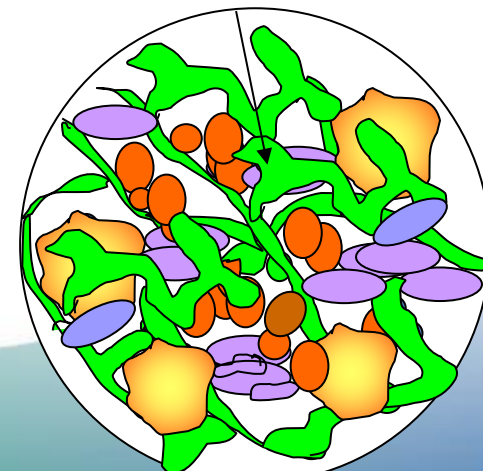
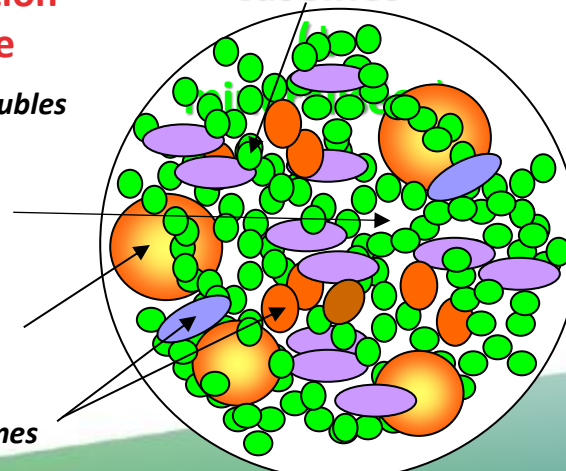
Réseau de caséines

Aspect  
Texture  
Flaveur

Réseau de caséines (± protéolysées)



Micro-organismes

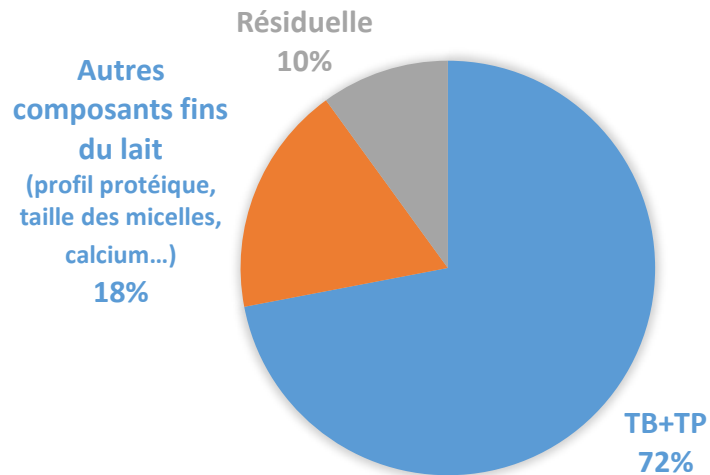


# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE

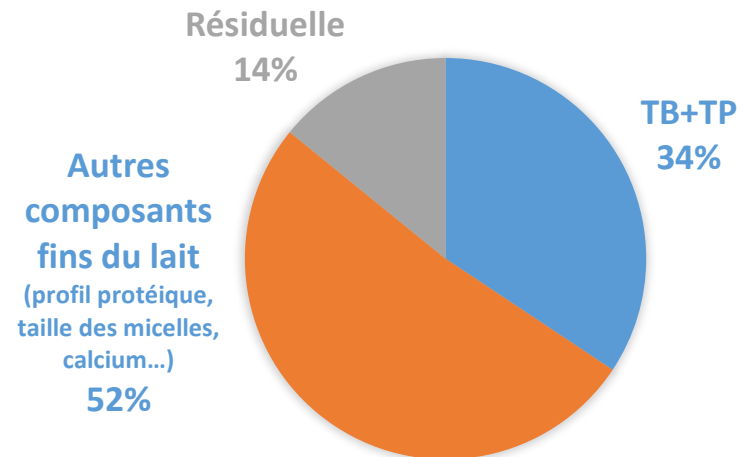


## La fromageabilité ne dépend pas que des taux du lait !

*Explication de la variabilité du rendement Extrait Sec labo (laits individuels)*



*Explication de la variabilité de la fermeté du gel pâtes pressées cuites (laits individuels)*



Autres composants influents, quelle que soit l'échelle et les paramètres de coagulation :

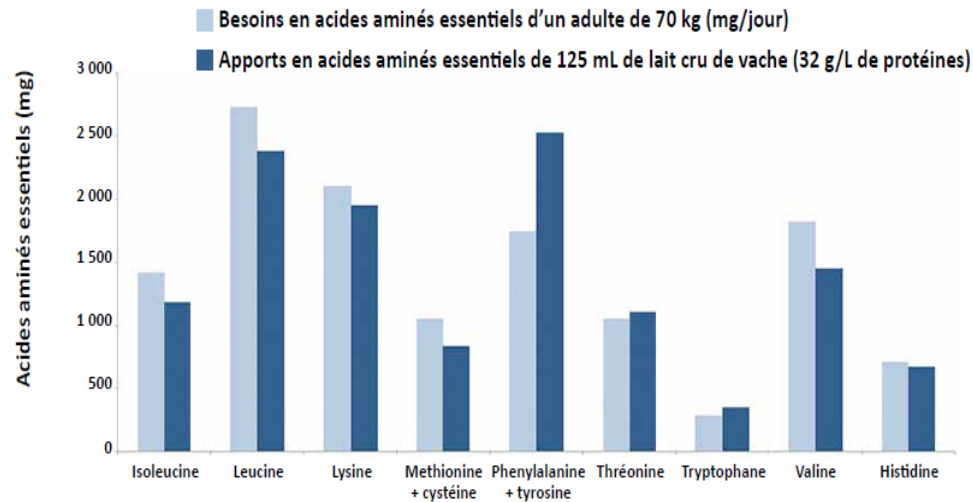
- Calcium
- Taille des micelles (en lien avec le profil des protéines)





# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE

## Bénéfices/risques pour la santé humaine



Source : FAO, 2011

- Digestibles à 95%
- Apport AA essentiels
- Protection contre les agressions (Immunoglobulines, lactoferrine, enzymes)
- Prévention de nombreuses pathologies
- Source de peptides bioactifs/ impact microbiote intestinal/régulation fonctions essentielles de l'organisme
- Protection contre l'oxydation par certains acides aminés
- Peuvent être responsables d'allergies alimentaires (la transformation en fromage réduit de moitié cette sensibilité)

### Variant A2



- Variant A1 de la caséine  $\beta$  causerait une intolérance au lait (symptômes intestinaux dont ballonnements...et d'autres pathologies?) : nombreuses études mais parfois contradictoires, plus d'études cliniques à réaliser pour apporter des preuves (Cieslinska et al., 2022)
- Un seul acide aminé différent
- Des différences selon la race de vache



## Les protéines sous différentes formes

Le type de protéines retrouvées dans le lait est dépendant :

- des gènes de chaque animal codant pour chacune des protéines. Des différences au niveau des gènes (modifications subtiles (mutations)) peuvent impacter la structure de la protéine et donc ses propriétés, mais aussi son niveau d'expression. On parle alors de **variants génétiques**. Un animal produira un lait qui sera toujours composé des mêmes variants génétiques mais des différences pourront être observées entre individus.
- de modifications plus profondes intervenant spécifiquement à certaines étapes de la synthèse des protéines (**variants d'épissage, isoformes de glycosylation et de phosphorylation**).
- de facteurs dégradant les protéines (protéolyse) et conduisant à des formes dérivées telles que les **caséines gamma**, issues de la dégradation de la caséine b.



## LES FACTEURS DE VARIATION : GENETIQUE

### Une héritabilité forte (Sanchez et al., 2017)

|                      | Race      | TP   | $\alpha$ La | B-LG | $\alpha$ s1-CN | $\alpha$ s2-CN | $\beta$ -CN | K-CN |
|----------------------|-----------|------|-------------|------|----------------|----------------|-------------|------|
| g/100 g de lait      | <b>MO</b> | 0,57 | 0,57        | 0,86 | 0,54           | 0,54           | 0,66        | 0,48 |
|                      | <b>NO</b> | 0,41 | 0,42        | 0,61 | 0,42           | 0,38           | 0,43        | 0,42 |
|                      | <b>HO</b> | 0,27 | 0,31        | 0,61 | 0,30           | 0,29           | 0,27        | 0,32 |
| g/100 g de protéines | <b>MO</b> |      | 0,72        | 0,79 | 0,67           | 0,58           | 0,42        | 0,61 |
|                      | <b>NO</b> |      | 0,53        | 0,72 | 0,57           | 0,25           | 0,39        | 0,55 |
|                      | <b>HO</b> |      | 0,44        | 0,71 | 0,53           | 0,31           | 0,39        | 0,54 |



# LES FACTEURS DE VARIATION : GENETIQUE

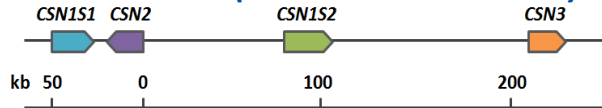
## Le polymorphisme génétique

- Des variants génétiques pour toutes les protéines, les plus courants :
  - B et C pour la caséine alphas1 (as1-Cn)
  - A<sup>1</sup>, A<sup>2</sup> pour la caséine bêta (b-Cn); B et I; à noter le variant C en race Tarentaise
  - A et B pour la caséine kappa (k-Cn);
  - A et B pour la bêta-lactoglobuline (b-Ig).

Impacts sur le taux de la protéine concernée, proportion dans caséines ou protéines totales, composition du lait

- Transmission génétique non aléatoire pour les variants de caséines (haplotype)

### *Locus caséines (chromosome 6 bovin)*



Combinaisons d'allèles au locus des caséines (= haplotypes)  
**Transmission 'en bloc' des combinaisons de variants caséines**



## Le polymorphisme génétique : effets importants et consensuels

### **b-lactoglobuline B (vs blg A) :**

- ↘ teneur en blg (-30%) et de celle en protéines sériques(-10 à 15%)
- ↗ taux de caséines (jusqu'à 2g/L)
- ↗ ratio caséines/protéines (+ 2,5 à 3%)
- ↗ taux butyreux

### **K-caséine BB (vs AA)**

- ↗ teneur en caséine K
- ↗ taux de caséines et de protéines
- ↗ ratio caséines/protéines (+ 2%)
- ↗ rapport calcium/protéines
- ↘ diamètre micelles

# LES FACTEURS DE VARIATION : GENETIQUE



## Le polymorphisme génétique : résultats en race Montbéliarde (2018)

| Haplotype $\alpha_{s1}$ $\beta$ $\alpha_{s2}$ $\kappa$ | Fréquence | Pourcentage |
|--|-----------|-------------|
| B A1 A A   | 57        | 5.0         |
| B A1 A B   | 40        | 3.5         |
| B A1 A E   | 5         | 0.4         |
| B A2 A A   | 71        | 6.2         |
| B A2 A B   | 314       | 27.6        |
| B B A A  | 398       | 34.9        |
| B B A B  | 3         | 0.3         |
| B B D A  | 1         | 0.1         |
| B I A A  | 3         | 0.3         |
| B I A B  | 174       | 15.3        |
| C A2 A A   | 74        | 6.5         |

# LES FACTEURS DE VARIATION : GÉNÉTIQUE



## Principaux variants dans 12 races bovines françaises (Sanchez et al., 2020)

| Protéine | Variant <sup>1</sup> | BLA <sup>2</sup> | CHA   | LIM   | ABO   | BSW   | HOL   | JER   | MON   | TAR   | NOR   | SIM   | VOS   |
|----------|----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β-LG     | A                    | 71.6             | 60.5  | 61.8  | 46.2  | 31.2  | 58.5  | 55.0  | 54.3  | 31.8  | 43.0  | 59.2  | 31.2  |
|          | B                    | 28.4             | 39.5  | 38.2  | 53.5  | 68.8  | 41.5  | 45.0  | 45.7  | 68.2  | 57.0  | 38.4  | 68.8  |
|          | D                    | < 0.1            | 0     | 0     | 0.31  | 0     | < 0.1 | 0     | < 0.1 | 0     | < 0.1 | 2.3   | 0     |
| αs1-CN   | B                    | 93.7             | 86.2  | 86.8  | 55.9  | 88.9  | 99.7  | 40.9  | 97.5  | 66.7  | 73.4  | 94.1  | 94.1  |
|          | C                    | 6.2              | 13.8  | 12.5  | 44.1  | 11.1  | 0.34  | 59.1  | 2.5   | 33.3  | 26.6  | 5.9   | 5.9   |
|          | D                    | < 0.1            | < 0.1 | 0.69  | 0     | 0     | < 0.1 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| β-CN     | A1                   | 13.9             | 19.7  | 22.3  | 15.7  | 6.5   | 30.0  | 4.4   | 7.7   | 49.7  | 9.1   | 35.8  | 38.4  |
|          | A2                   | 68.4             | 63.2  | 66.4  | 82.8  | 78.7  | 59.2  | 76.6  | 46.4  | 45.5  | 39.7  | 55.6  | 48.5  |
|          | A3                   | 0                | < 0.1 | < 0.1 | < 0.1 | < 0.1 | < 0.1 | 0.26  | 0     | < 0.1 | 0     | 1.64  | < 0.1 |
|          | B                    | 7.0              | 13.4  | 8.2   | < 0.1 | 14.6  | 2.1   | 13.0  | 29.1  | 0     | 18.6  | 3.8   | 0.20  |
|          | C                    | 0.21             | 1.10  | 0.39  | 0.31  | < 0.1 | < 0.1 | < 0.1 | 0     | < 0.1 | 4.8   | < 0.1 | 0     |
|          | I                    | 10.5             | 2.4   | 2.8   | 1.1   | 0.16  | 8.4   | 6.0   | 16.7  | 0     | 30.9  | 4.7   | 12.4  |
| κ-CN     | A                    | 53.8             | 34.4  | 46.9  | 64.8  | 25.6  | 56.9  | 16.9  | 38.2  | 30.5  | 14.5  | 71.8  | 65.5  |
|          | B                    | 46.2             | 65.6  | 53.1  | 35.2  | 74.4  | 33.6  | 82.6  | 61.6  | 56.7  | 85.5  | 28.2  | 34.5  |
|          | C                    | 0                | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | < 0.1 | 12.7  | 0     | 0     | 0     |
|          | D                    | 0                | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.12  | 0     | 0     | 0     |
|          | E                    | 0                | < 0.1 | 0     | < 0.1 | < 0.1 | < 0.1 | 9.50  | 0.50  | 0.19  | 0     | < 0.1 | 0     |

Blonde d'Aquitaine (BLA), Charolaise (CHA), Limousine (LIM), Abondance (ABO), Brown Swiss (BSW), Holstein (HOL), Jersiaise (JER), Montbéliarde (MON), Tarentaise (TAR), Normande (NOR), Simmental (SIM) et Vosgienne (VOS); en gras, le variant le plus fréquent pour chaque race.



## FACTEURS DE VARIATION : GÉNÉTIQUE

La race de vache : des écarts de TP, des profils de protéines très proches sur les 3 races principales (Gelé et al., 2014)

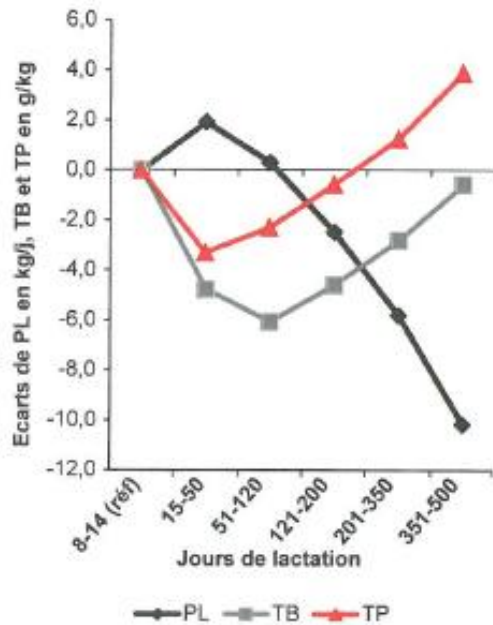
|                   | Caractère        | Montbéliarde      | Normande          | Prim'Holstein     |
|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| kg                | PL               | 24,7 ± 6,5        | 20,7 ± 6,1        | <b>27,5 ± 7,2</b> |
| g/kg              | TB               | 39,1 ± 5,2        | <b>43,1 ± 6,3</b> | 39,8 ± 6,4        |
|                   | TP               | 33,2 ± 2,9        | <b>35,1 ± 3,2</b> | 32,2 ± 3,2        |
| % de la MP totale | Cas. αs1         | 28,0 ± 0,5        | 27,8 ± 0,7        | 27,9 ± 0,7        |
|                   | Cas. αs2         | 9,6 ± 0,3         | 9,9 ± 0,3         | 9,7 ± 0,4         |
|                   | Cas. β           | 36,3 ± 0,8        | 36,2 ± 1,2        | 36,3 ± 1,1        |
|                   | Cas. κ           | <b>10,0 ± 0,5</b> | 9,9 ± 0,4         | 9,4 ± 0,5         |
|                   | β-lactoglobuline | 8,1 ± 1,1         | 7,9 ± 1,0         | 8,3 ± 1,1         |

### Normande et Montbéliarde/Holstein :

- Ratio caséines/protéines totales un peu plus élevé
- Un peu plus riches en caséines κ



## Stade de lactation



*Race Holstein, n=125514*  
*Source : résultats Phénofinlait*  
*(données 2009-2011)*

*Source : Coulon et al., 1998 et 2005*

| Stade lactation                 | Début<br>(15-45 j) | Milieu<br>(150-230 j) | Fin<br>300 |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| Lait produit (kg/j)             | 27,0               | 18,3                  | 7,7        |
| TP (g/kg)                       | 31,0               | 33,2                  | 38,1       |
| Caséines/protéines (%)          | 83                 | 83                    | 82         |
| Protéines solubles (g/kg)       | 5,4                | 5,6                   | 6,8        |
| Cellules somatiques<br>(log/ml) | 4,77               | 5,1                   | 5,42       |



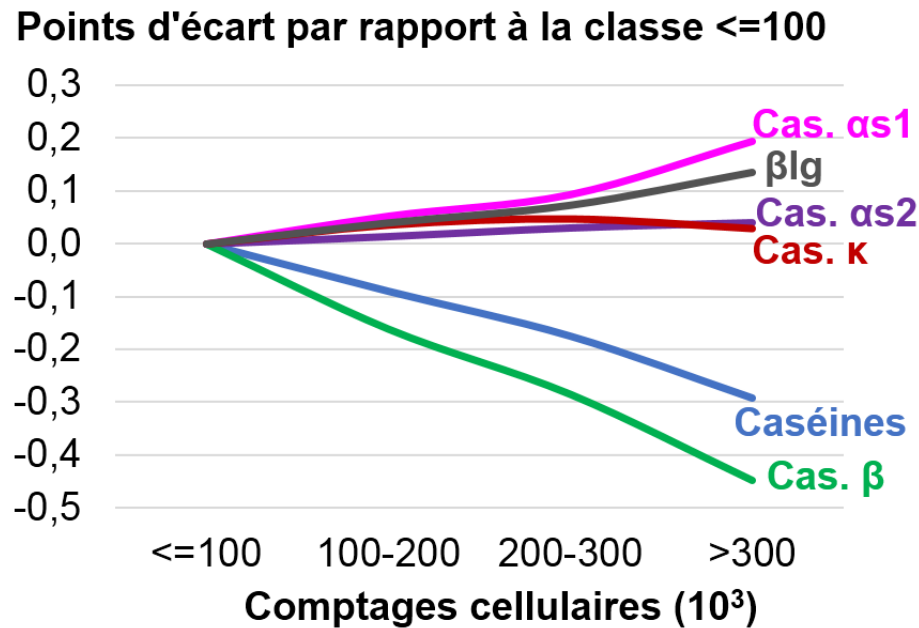
# FACTEURS DE VARIATION : PHYSIOLOGIE

## Age, numération cellulaire

Age des vaches (4<sup>ème</sup> lactation) ↗

Numération cellulaire ↗

Caséines/protéines ↘



Source : Gelé et al., 2014

Race Montbéliarde (n= 61 841)



## Régime fourrager : peu d'effet sur le profil en protéines

| RÉGIME                             | AGS  | AGMI | AGPI | Cas. $\alpha$ 1 | Cas. $\alpha$ 2 | Cas. $\beta$ | Cas. $\kappa$ | B-Ig |
|------------------------------------|------|------|------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|------|
| Ensilage maïs                      | Réf  | Réf  | Réf  | Réf             | Réf             | Réf          | Réf           | Réf  |
| Ensilage maïs +<br>herbe conservée | +/-  | +/-  | =    | =               | =               | =            | =             | =    |
| Foin                               | =/-  | =/+  | =    | +               | =               | =/+          | +             | -    |
| Ensilage herbe                     | --   | ++   | +    | +               | =               | =            | =             | -    |
| Ensilage maïs /<br>Pâturage        | ---  | +++  | +    | =               | =               | =            | =             | =    |
| Pâturage ou<br>Pât. + foin         | ---- | ++++ | ++   | +               | +               | =            | +             | -    |

Source : Gelé et al., 2014



# FACTEURS DE VARIATION : ALIMENTATION

## Niveau et nature des apports énergétique et azote

Apport énergétique ↗

TP ↗

Caséines/protéines : discuté

Nature apport énergétique

Effet TP

Caséines/protéines  $\approx$

Apport azoté (à même apport énergétique) ↗

TP  $\approx$

Caséines/protéines  $\searrow$

Nature complémentation azotée en lien avec couverture AA indispensables

Equilibre en AA : Caséines/protéines ↗

Lysine et/ou méthionine protégée, urée :

TP ↗

Caséines/protéines  $\approx$

Apport azoté+apport énergétique ↗

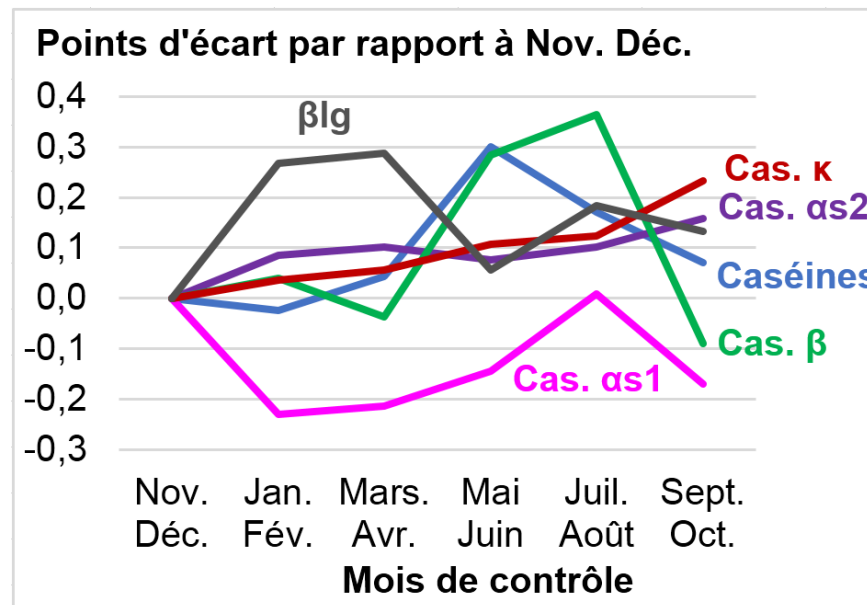
TP ↗

Caséines/protéines ↗



## FACTEURS DE VARIATION : SAISON

De faibles variations en prenant l'effet strict de la saison, des laits plus riches en caséines en été?



Source : Gelé et al., 2014

Race Prim'Holstein (n= 78 207)

# LES PROTÉINES DU LAIT DE VACHE : SYNTHÈSE



- Composantes essentielles du lait pour la transformation, la qualité organoleptique et nutritionnelle des produits laitiers
- Principale source de variation : caractéristiques individuelles des animaux
- Impact fort de la génétique sur les variations de composition en protéines : race et sélection génétique
- Physiologie : effets du stade de lactation, âge et infections mammaires
- L'alimentation : un impact faible en comparaison à la composition en matière grasse