

Variations des teneurs en micronutriments de l'herbe de prairies de moyenne montagne et transfert au lait

B. Graulet^{1,2}, M. Piquet^{3,4}, B. Duriot^{1,2}, P. Pradel⁵, S. Hulin³, A. Cornu^{1,2}, J. Portelli^{1,2}, B. Martin^{1,2}, A. Farruggia^{1,2}

Les caroténoïdes, vitamines et composés phénoliques des laits participent à leur qualité nutritionnelle. Leurs teneurs dépendent largement de la composition de l'alimentation ingérée. Cette qualité est maintenant importante pour les producteurs et les consommateurs. Quel est l'effet du niveau de diversité botanique de prairies de montagne sur ces caractéristiques ?

RÉSUMÉ

L'évolution, au cours de la saison de pâturage, des teneurs en caroténoïdes, tocophérols et polyphénols a été étudiée dans les fourrages de prairies de moyenne montagne aux compositions floristiques contrastées (en conditions expérimentales et en exploitations avec différents modes de gestion) et dans les laits des vaches y pâturant. Les résultats confirment une évolution contraire entre le stade des espèces fourragères et les teneurs en caroténoïdes et montrent que les prairies les moins diversifiées utilisées de façon plus intensive sont plus riches en caroténoïdes mais généralement plus pauvres en polyphénols. Ces différences au niveau de l'herbe des prairies ne se traduisent cependant pas forcément par un écart de concentration au niveau des laits.

SUMMARY

Variations in the micronutrient content of grass in medium-altitude grassland and transfer to milk

Carotenoids, vitamins and phenolic compounds present in milk contribute to its nutritional value. Their levels widely depend on the composition of ingested grass, but how exactly does the botanical diversity of mountain grassland affect these levels? Changes, over the pasturing season, in carotenoid, tocopherol and polyphenol levels was studied in medium altitude grassland forage with a diversified vegetation (under experimental conditions or on farms with varied pasture practices) and in the milk produced by cows, grazing on this grassland. The following observations were made i) an inverse evolution between the stage of development of forage grass species and carotenoid levels and ii) grassland with a lower botanical diversity used in a more intensive way has higher carotenoid levels but lower polyphenol levels. However, these differences in the nutritional value of forage do not necessarily result in a difference in milk concentration.

En France, les productions fromagères sous label AOP, synonyme d'ancrage territorial et de qualité pour le consommateur, ont pris une place privilégiée en zones de montagne, Alpes-du-Nord - Jura et Massif central essentiellement (PFLIMLIN *et al.*, 2005).

Au sein de ces régions, parfois territorialement très étendues comme dans le cas du Massif central, les prairies présentent une large gamme de gestion par les éleveurs et de composition botanique, allant des prairies temporaires aux prairies permanentes de niveau de diversité floristique relativement élevé. **Ces variations de composition botanique et de pratiques entraînent très certainement des variations dans la composition chimique de l'herbe, en particulier au niveau de la richesse et de la composition en microconstituants.**

Par voie de conséquence, l'ingestion de ces composés par les animaux au pâturage s'avère différente, avec un impact possible sur les qualités nutritionnelles et sensorielles des lait et des produits laitiers obtenus (FARRUGGIA *et al.*, 2008 ; LUCAS *et al.*, 2005).

Il existe différents groupes de composés chimiques présents dans les plantes de prairies à des concentrations ou des compositions relativement variables : vitamines, terpènes, caroténoïdes, composés phénoliques (solubles ou polymériques comme les tannins)... Caroténoïdes et composés phénoliques sont des métabolites secondaires des plantes car ils ne contribuent ni à leur nutrition, ni à leur croissance, mais participent plutôt à des fonctions annexes (défense face aux prédateurs, aux pathogènes, à des stress environnementaux, attraction des insectes pol-

AUTEURS

- 1 : INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle ; benoit.graulet@clermont.inra.fr
- 2 : VetaAgroSup, Elevage et productions des ruminants, F-63370 Lempdes
- 3 : Pôle Fromager AOP du Massif Central, F-15000 Aurillac
- 4 : INRA, UR874 Ecosystème Prairial, F-63100 Clermont-Ferrand
- 5 : INRA, UE1296 Monts d'Auvergne, F-15190 Marcenat

MOTS CLÉS : Biodiversité, composition chimique, gestion du pâturage, intensification, mode d'exploitation, prairie de montagne, prairie permanente, prairie temporaire, qualité du lait, stade de récolte, variations saisonnières, végétation.

KEY-WORDS : Biodiversity, chemical composition, cutting stage, grazing management, intensification, ley, milk quality, permanent pasture, seasonal variations, type of management, upland pasture, vegetation.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Graulet B., Piquet M., Duriot B., Pradel P., Hulin S., Cornu A., Portelli J., Martin B., Farruggia A. (2012) : "Variations des teneurs en micronutriments de l'herbe de prairies de moyenne montagne et transfert au lait", *Fourrages*, 209, 59-68.

linisateurs ; FARRUGGIA *et al.*, 2008). Les rations à base d'herbe, en particulier d'herbe pâturée, permettent des apports en caroténoïdes et en vitamine E supérieurs à ceux des rations à base de fourrages conservés, en particulier l'ensilage de maïs ou le foin. Cela se traduit, entre autres, chez les vaches laitières au pâturage, par la production de laits et produits laitiers dont les matières grasses sont nettement colorées en jaune en raison des propriétés pigmentaires des caroténoïdes (NOZIÈRE *et al.*, 2006 ; MARTIN *et al.*, 2009). En ce qui concerne les composés phénoliques des plantes, la prairie a plus rarement été étudiée dans sa globalité. Néanmoins, il est connu que les dicotylédones sont plus concentrées en polyphénols solubles que les graminées. L'augmentation de la part de dicotylédones dans les prairies avec l'altitude induit donc leur enrichissement progressif en polyphénols (SCEHOVIC, 1990 ; JEANGROS *et al.*, 1999). Plus récemment, FRAISSE *et al.* (2007) ont mis en évidence la **grande richesse et diversité en polyphénols d'une prairie de montagne fortement diversifiée**. Les résultats obtenus sur 24 prairies réparties dans 3 régions de France (Haute-Normandie, Isère, Monts-du-Vivaraï) confirment ces observations et ont permis d'identifier une trentaine de composés phénoliques en reliant certains d'entre eux à la présence de certaines plantes et au nombre moyen d'espèces botaniques (REYNAUD *et al.*, 2010). BESLE *et al.*, (2010) ont également montré que la teneur et la composition des laits en composés phénoliques variaient selon le type d'alimentation des vaches, celles étant au pâturage produisant des laits nettement plus riches que celles consommant des fourrages conservés ou des rations riches en concentré.

Pour les polyphénols comme pour les caroténoïdes ou la vitamine E, les résultats disponibles sont à compléter par des données permettant de **mettre en évidence les principaux facteurs de variation de leur teneur et leur composition dans les prairies** (composition botanique mais également stade végétatif, conditions environnementales, mode de gestion) **et les conséquences éventuelles sur le transfert dans le lait** et les produits laitiers. La présente étude avait donc pour objectifs principaux i) d'étudier la variation des teneurs et de la composition en **caroténoïdes, vitamine E et composés phénoliques** des prairies selon leur niveau de diversité floristique et le stade végétatif, ii) de déterminer l'effet des variations observées au niveau des prairies sur la teneur en ces composés dans les laits. Elle a été réalisée à une double échelle, celle de la ferme expérimentale et celle des exploitations d'éleveurs. Elle s'inscrit dans le cadre du programme de valorisation des prairies du Massif central pour la production fromagère AOC avec le soutien financier du CASDAR.

1. Une double démarche de travail

■ Première approche : en ferme expérimentale

L'étude s'est déroulée au cours de la saison de pâturage (mai-septembre) 2007 en conditions contrôlées à l'Unité Expérimentale INRA des Monts d'Auvergne (alti-

tude moyenne du site : 1 080 m) à Marcenat dans le Cantal (climat de moyenne montagne humide). Deux lots homogènes (parité, stade de lactation, performances de production, couleur du lait qui reflète les individualités du métabolisme des caroténoïdes) de 8 vaches (7 Montbéliardes et 1 Holstein) en milieu de lactation ont été utilisés. Fin mai (semaine 22), les animaux du premier lot (lot D) ont été placés sur **une prairie permanente de moyenne montagne de composition botanique très diversifiée** (estive), non fertilisée depuis plus de 50 ans et exploitée avec un **niveau de chargement faible** ; ce mode de gestion génère une hétérogénéité du couvert et par conséquent une herbe offerte comportant une gamme de stades allant du feuillu plutôt ras jusqu'à l'épiaison ou la floraison. Le second lot (lot F) a été placé sur **une prairie moyennement diversifiée** (majoritairement du dactyle) fertilisée et gérée à un niveau de chargement tel qu'il permette d'offrir une herbe de qualité à un stade feuillu sur l'ensemble de la saison de pâturage. Dans les deux lots, la gestion du pâturage a été réalisée par agrandissement progressif de la surface offerte au fur et à mesure de l'avancement de la saison. Les vaches n'ont reçu aucune complémentation pendant cette période.

Les **échantillons d'herbe** ont été prélevés par poignées, à 3 cm du sol, tous les 3 mètres sur la diagonale de chaque parcelle. Un échantillon représentatif de chaque prairie a ainsi été constitué **au cours des semaines 24** (12 juin, 1 004 °.j), **28** (12 juillet, 1 371 °.j), **30** (25 juillet, 1 570 °.j), **32** (6 août, 1 754 °.j), **34** (24 août, 1 969 °.j) **et 37** (10 septembre, 2 186 °.j). Chaque échantillon a été scindé en deux : un premier sous-échantillon a été conservé au congélateur pour un tri ultérieur des plantes (feuilles, tiges et fractions mortes) et un deuxième sous-échantillon a été conservé sous vide à -20 °C et à l'abri de la lumière jusqu'aux analyses. Au laboratoire, les échantillons ont été lyophilisés puis broyés en particules de taille inférieure à 1 mm. Les caroténoïdes et les tocophérols ont été extraits par des solvants organiques, séparés et quantifiés par chromatographie liquide à ultra-haute performance (UPLC) couplée à un détecteur à barrette de diodes (CHAUVEAU-DURIOT *et al.*, 2010). Les composés phénoliques totaux dans les échantillons de prairies ont été dosés par colorimétrie à l'aide du réactif de Folin-Ciocalteu après extraction à l'acétone/eau 70/30 (REYNAUD *et al.*, 2010).

La **composition de floristique** des prairies a été déterminée en juillet par relevé sur 2 lignes de 25 m (1 point tous les mètres) selon la méthode des points quadrats (DAGET et POISSONNET, 1969). Les plantes présentes autour d'un stick vertical (20 cm²) ont été identifiées grâce à la *Flora Europea* (TUTIN *et al.*, 1964-1993), classées par espèce et par famille ; l'indice de Shannon reflétant la biodiversité a été calculé (SHANNON et WEAVER, 1949).

Des **prélèvements de laits** ont été réalisés pour chaque vache aux traites du matin et du soir en semaines 20 (analyses pré-expérimentales participant à la mise en lot), 24, 30 et 34. Les échantillons moyens journaliers de lait ont été reconstitués pour chaque vache en regroupant les laits des traites du matin et du soir dans les proportions 60/40. Les échantillons de laits individuels ont ensuite été

congelés à -20 °C jusqu'au moment des analyses. Les teneurs et la composition en caroténoïdes et vitamines A et E ont été déterminées après extraction à l'aide de solvants organiques, séparation et détection des composés par UPLC (CHAUVEAU-DURIOT *et al.*, 2010). Les données de production laitière ont été enregistrées quotidiennement.

■ Seconde approche : en exploitations

Une étude complémentaire a été menée sur un réseau d'exploitations localisées dans le Massif central (Puy-de-Dôme, Cantal et Aveyron). Elle avait pour objectif de confronter les observations obtenues en conditions expérimentales contrôlées à celles rencontrées dans des exploitations laitières de moyenne montagne. Le choix des **22 parcelles** (20 prairies permanentes et 2 prairies temporaires) permettait de couvrir une **variété de pratiques** (pâturage *vs* fauche ; vitesse de rotation lente *vs* rapide) et une gamme **pédoclimatique**. Chaque prairie a été suivie au cours de 4 périodes de la saison 2008 par des mesures et des prélèvements : 3 au printemps (avril à juin) et 1 au début de l'automne. Les **dates de prélèvement** ont été déterminées pour chaque prairie à partir des sommes de températures relevées au siège de chaque exploitation (fonction de l'altitude et de la localisation géographique) à partir du 1^{er} février. Elles correspondaient à **400 °.j (stade feuillu du dactyle)** pour intervenir avant la mise à l'herbe (P1), à **700 °.j** (stade du début d'épiaison du dactyle) pour intervenir avant la fauche précoce (P2), à **1 200 °.j** (stade de floraison du dactyle) pour déterminer l'accumulation de biomasse avant une fauche tardive le cas échéant (P3), et mi-septembre pour estimer la qualité des repousses (P4). L'herbe a été prélevée à 4-5 cm du sol dans 5 zones séparées de 35 pas sur une diagonale du faciès dominant de chaque prairie. Des relevés botaniques ont été effectués sur ce même faciès. Les échantillons ont été transportés dans un sac hermétique et opaque dans une enceinte réfrigérée à +4 °C puis stockés à -20 °C. Les microconstituants (caroténoïdes, vitamines E et polyphénols) ont été analysés comme décrit ci-dessus. Un sous-échantillon a été constitué au préalable et conservé au congélateur pour un tri ultérieur : 40 talles de graminées par sous-échantillon ont été classées en talle végétative ou non et le pourcentage de dicotylédones a également été évalué visuellement.

Date d'analyse	Prairie très diversifiée, lot D			Prairie peu diversifiée, lot F		
	5 juin	10 juillet	12 sept.	5 juin	10 juillet	12 sept.
Graminées (%)	39,1	64,7	58,1	88,3	84,4	71,7
Dicotylédones (%)	60,9	35,3	41,9	11,7	15,6	28,3
- Diverses (%)	45,7	27,4	31,1	6,8	9,6	25,1
- Légumineuses (%)	15,3	7,9	10,8	4,8	6,0	3,2
Indice de Shannon	4,85	4,01	4,20	2,60	2,19	2,19

TABLEAU 1 : **Part des familles botaniques dans les deux prairies expérimentales, établie par relevé sur les parcelles** (% de recouvrement).

TABLE 1 : **Percentage of botanical families in the two experimental grassland fields, based on collected samples** (% of cover).

Des **prélèvements de laits** ont été réalisés dans le tank de 13 des mêmes exploitations, en 2009, à des périodes correspondant à environ 700 °.j (P2) et environ 1200 °.j (P3). Les vaches étaient alors au pâturage selon un rythme rapide ou lent sur des prairies permanentes. Les échantillons de lait ont été conservés au frais puis congelés à -20°C. Les teneurs et la composition en caroténoïdes et vitamines A et E ont été déterminées selon CHAUVEAU-DURIOT *et al.*, (2010).

2. Résultats

■ Etude en ferme expérimentale (conditions contrôlées)

• Caractérisation botanique des prairies et stade de l'herbe

L'étude en conditions expérimentales incluait 2 prairies de composition botanique et de niveau de diversité contrastés (tableau 1). Les graminées étaient nettement dominantes dans la prairie F tout au long de la saison (dactyle, houlque, pâturin et brome) mais l'importance de celles-ci diminuait pendant l'été au profit des plantes diverses. Inversement, **la prairie D présentait une fraction majoritaire de dicotylédones** (75 % de diverses dont gentiane et rumex) en début de saison, la tendance s'inversant par la suite au profit des graminées (agrostis, fétuque et pâturin). Pour les 2 prairies, l'indice de Shannon tendait à diminuer, particulièrement entre juin et juillet.

Le **pourcentage de feuilles dans la matière sèche** (figure 1a), similaire dans les deux prairies à la première période, était stable sur la prairie D et augmentait au cours de la saison sur la prairie F.

• Teneurs et composition en micronutriments de l'herbe

La composition centésimale moyenne en caroténoïdes de l'herbe des deux prairies est présentée en figure 2a. **Dix composés différents ont été identifiés et quantifiés dans tous les échantillons.** Parmi eux, se trouvent 3 isomères du β -carotène (formes *tout-trans*, 9-*cis* et 13-*cis*), et 7 xanthophylles (lutéine, lutéine époxyde, néoxanthine, violaxanthine, zéaxanthine, anthéranthine et β -cryptoxanthine). **Les β -carotènes représentaient en moyenne 1/3 des caroténoïdes totaux**, l'isomère *tout-trans*, principal précurseur de la vitamine A, étant la forme principale. Parmi les xanthophylles, la lutéine était très nettement dominante puisqu'elle constituait 1/3 des caroténoïdes totaux à elle seule.

La teneur en caroténoïdes totaux était en moyenne près de 2 fois plus élevée dans l'herbe de la prairie du lot F que dans celle du lot D (1 078 *vs* 570 $\mu\text{g/g}$ de MS ; $p < 0,001$; figure 1b). Cette différence était due à des teneurs significativement plus élevées observées pour chaque caroténoïde (sauf lutéine époxyde et β -cryptoxanthine) dans l'herbe de la prairie du lot F. La comparaison des compositions centésimales des caroténoïdes totaux entre les

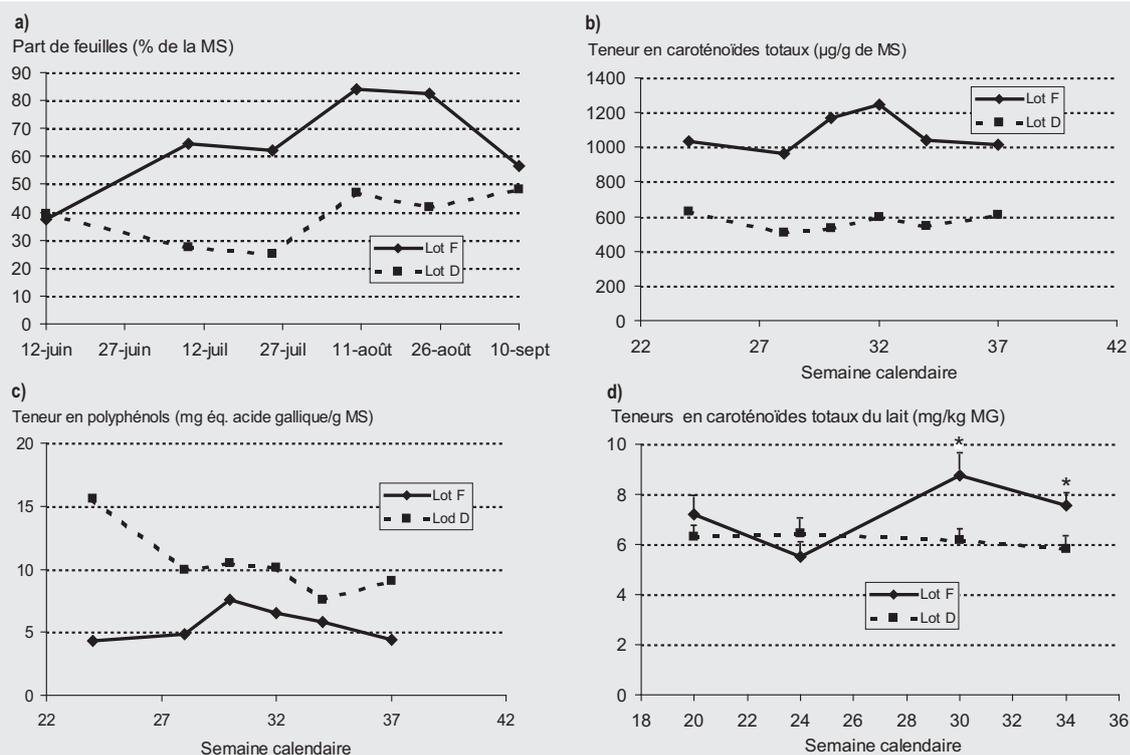


FIGURE 1 : Au cours de la saison de pâturage en conditions expérimentales contrôlées (2007), évolution (a) de la part de feuilles dans l'herbe des prairies, (b) de sa teneur en caroténoïdes totaux et (c) en polyphénols et (d) des teneurs moyennes en caroténoïdes totaux du lait (moyennes \pm écart type, * $p < 0,05$) ; prairie très diversifiée : lot D, prairie peu diversifiée gérée au stade feuillu : lot F.

FIGURE 1 : During grazing season under controlled experimental conditions (2007), evolution of (a) the ratio of leaves in grassland cover, (b) total carotenoid and (c) polyphenol levels and (d) average total carotenoid content of milk (average \pm standard deviation, * $p < 0,05$), botanically-rich grassland: plot D, botanically poor grassland grazed in its leaf stage: plot F.

2 prairies a montré que les teneurs plus élevées dans l'herbe de la prairie F vont de pair avec une part significativement plus importante des 3 β -carotènes (+2,4 %) aux dépens de la lutéine (-2,6 %) et de la β -cryptoxanthine (-0,4 %). L'évolution de ces composés était relativement similaire dans le temps entre les deux prairies, bien que nettement plus marquée pour la prairie F avec une concentration qui augmentait progressivement (+18 à 29 %) entre la mi-juillet et le début août. A cette période, les teneurs maximales ont pu être observées, en particulier au niveau de la prairie peu diversifiée du lot F (1 245 $\mu\text{g/g}$ de MS).

Les concentrations d' α -tocophérol (forme majoritaire de vitamine E) ne présentaient pas de différence significative entre les 2 lots même si les concentrations semblaient diverger au début de l'été (mi-et fin juillet). Les concentrations apparaissaient relativement stables au cours de la saison et la valeur moyenne observée était de 256 $\mu\text{g/g}$ de MS.

Les concentrations en polyphénols étaient en moyenne près de 2 fois plus élevées dans la prairie diversifiée D que dans la prairie feuillue F (10,5 vs 5,6 mg équivalent acide gallique/g de MS ; $p < 0,05$, figure 1c). L'écart était particulièrement élevé à la mi-mai, en lien avec le pourcentage élevé en dicotylédones du couvert et tendait à se réduire en été. L'évolution des concentrations semblait également différente entre les deux prairies.

• Teneurs et composition en micronutriments du lait

Six caroténoïdes seulement ont été identifiés et quantifiés dans la matière grasse du lait. Les composés étaient présents dans l'herbe des prairies, cependant leurs proportions respectives variaient d'une matrice à l'autre. En effet, dans le lait, le β -carotène (dont on retrouve les formes tout-trans, 9-cis et 13-cis) était largement majoritaire (environ 70 % des caroténoïdes totaux ; figure 2b), les seuls xanthophylles présents étant la lutéine, la zéaxanthine, et la β -cryptoxanthine. Il faut noter tout d'abord que la composition des caroténoïdes du lait avait été modifiée lors du passage de la ration hivernale au pâturage. Ainsi, fin mai, lors de la mise en lot, la composition des caroténoïdes du lait des vaches était 42 % de tout-trans β -carotène, 14 % de 13-cis β -carotène, 23 % de lutéine, 18 % de zéaxanthine et 3 % de β -cryptoxanthine, l'isomère 9-cis du β -carotène étant totalement absent. Après 4 semaines au pâturage, mi-juin, les vaches produisaient un lait dans lequel la proportion des isomères de β -carotène était plus élevée (52 à 57 % de l'isomère tout-trans, 18 à 23 % de l'isomère 13-cis avec apparition de l'isomère 9-cis) aux dépens des xanthophylles (lutéine et zéaxanthine).

Jusqu'à la mi-juin, les concentrations en caroténoïdes sont restées similaires dans le lait des deux lots. Elles ont augmenté ensuite de façon importante dans le

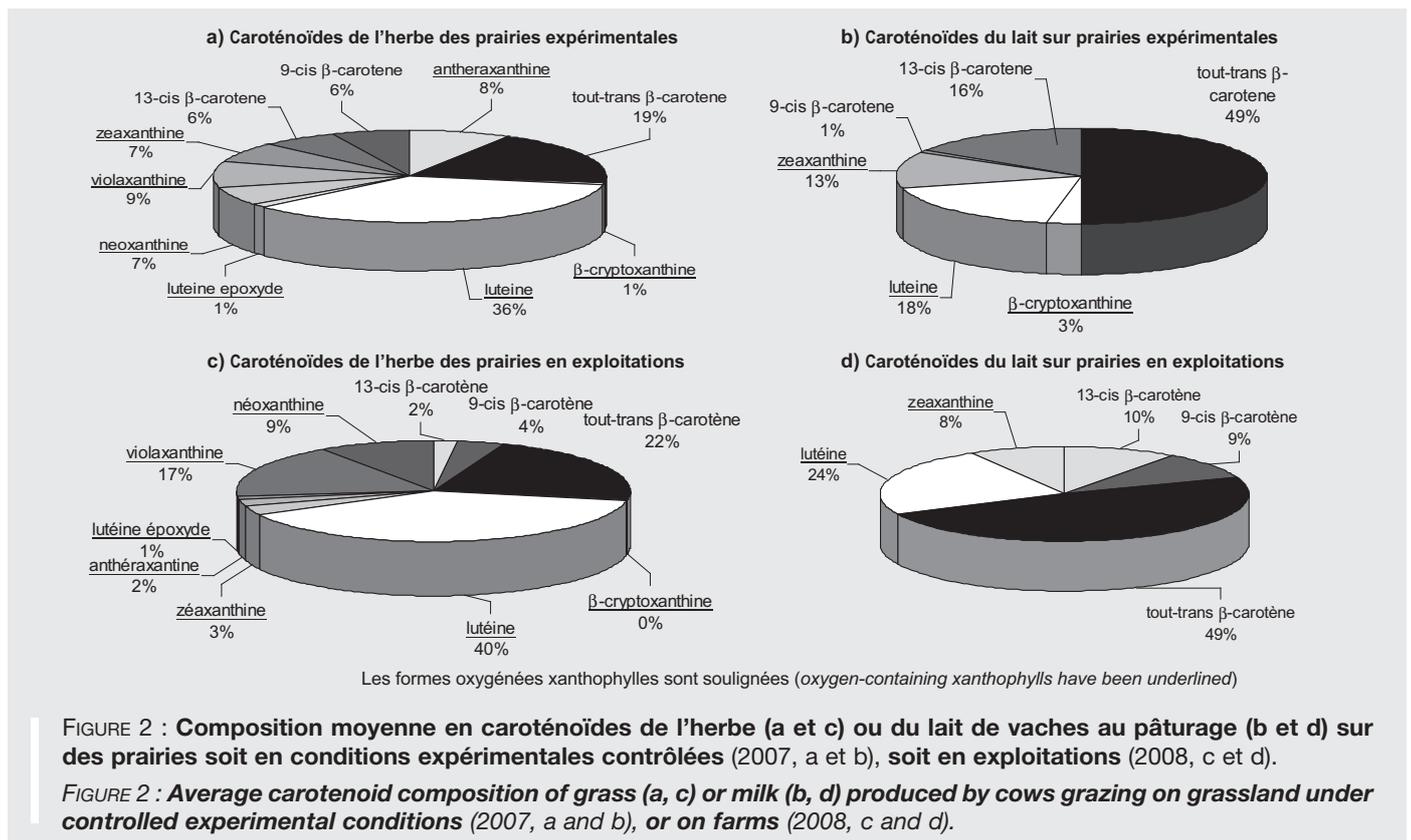


FIGURE 2 : Composition moyenne en caroténoïdes de l'herbe (a et c) ou du lait de vaches au pâturage (b et d) sur des prairies soit en conditions expérimentales contrôlées (2007, a et b), soit en exploitations (2008, c et d).

FIGURE 2 : Average carotenoid composition of grass (a, c) or milk (b, d) produced by cows grazing on grassland under controlled experimental conditions (2007, a and b), or on farms (2008, c and d).

lait des vaches du lot F fin juillet et fin août, tandis qu'elles sont restées relativement stables dans le lait des vaches du lot D **au cours de la saison de pâturage** (figure 1d). Cette différence s'explique essentiellement par la contribution des β -carotènes, surtout tout-trans et 13-cis (tableau 2). Inversement, pour la lutéine et la zéaxanthine, l'évolution des concentrations était différente puisqu'un écart entre les 2 lots était observable dès la mi-juin, avec des concentrations supérieures pour les vaches du lot D, écart qui se réduisait au cours de la saison de pâturage alors que ces concentrations augmentaient progressivement dans les 2 lots. Les concentrations en rétinol du lait augmentaient au cours de la saison de pâturage pour l'ensemble des animaux et elles étaient supérieures dans le lait des vaches du lot F fin juillet. Parallèlement, les concentrations d' α -tocophérol du lait augmentaient également au cours de la saison de pâturage pour l'ensemble des animaux et elles étaient supérieures dans le lait des vaches du lot D mi-juin. Rapportées aux quantités de lait secrétées par jour, les valeurs montraient les mêmes écarts et variations excepté le fait que, pour l'ensemble des micronutriments étudiés, les quantités secrétées par jour diminuaient au cours de l'été pour le lot D mais pas pour le F.

■ Etude dans le réseau d'exploitations (conditions de terrain)

• Caractérisation botanique des prairies et stade de l'herbe

A l'issue de l'année 2008, les 22 parcelles retenues ont été réparties en 5 classes selon leur mode de gestion :

vitesse de rotation au pâturage rapide ou lente, fauche précoce ou tardive, pâture-fauche (déprimage). Les relevés botaniques montrent que les prairies gérées de façon relativement intensive (fauche précoce ou pâturage rapide) sont les plus riches en graminées alors que **les rythmes lents ou le déprimage semblent favoriser les dicotylédones** (tableau 3).

Les périodes de prélèvements étant calées sur les stades de l'herbe, les tris d'herbe font bien apparaître une diminution du pourcentage de tiges végétatives de la première à la deuxième période et une augmentation à la 4^e période coïncidant avec le stade repousse (respectivement 66, 24, 27 et 63 %). Parallèlement, **une diminution du pourcentage de dicotylédones est observée de la première à la quatrième période** (respectivement 14, 11, 9 et 9 %).

• Teneurs et composition en micronutriments de l'herbe

Les mêmes 10 caroténoïdes que ceux identifiés en conditions contrôlées ont été retrouvés dans l'ensemble des échantillons d'herbe du réseau de parcelles. La répartition entre les carotènes et les xanthophylles montre un déséquilibre plus marqué en faveur de ces derniers (72 % du total vs 66 % en conditions contrôlées). Parmi les β -carotènes, l'isomère tout-trans était toujours la forme prédominante. Parmi les xanthophylles, la lutéine était à nouveau très nettement dominante puisqu'elle constituait 39 % des caroténoïdes totaux à elle seule.

Les variations de teneur en microconstituants des prairies du stade feuillu au stade repousse, sont présen-

Type de prairie pâturée	Prairie très diversifiée, lot D*			Prairie peu diversifiée, Lot F*			Ecart type	Signification : P		
	24	30	34	24	30	34		Lot	Semaine	Interaction
Semaine calendaire*	24	30	34	24	30	34				
Somme de températures (°j)	1 004	1 570	1 969	1 004	1 570	1 969				
Teneurs moyennes (mg/kg de matières grasses)										
Caroténoïdes										
Zéaxanthine	0,61	0,83	1,09	0,36	0,56	1,09	0,07	0,019	<0,001	0,001
Lutéine	0,91	1,04	0,40	0,51	1,05	1,49	0,14	0,480	<0,001	0,167
β -cryptoxanthine	0,20	0,15	0,31	0,22	0,23	0,17	0,05	0,172	0,337	0,038
Tout-trans β -carotène	3,41	3,19	2,38	3,13	5,26	3,77	0,40	0,098	0,002	0,005
9-cis β -carotène	0,15	0,07	0,05	0,04	0,10	0,04	0,04	0,448	0,352	0,086
13-cis β -carotène	1,18	0,91	0,77	1,24	1,55	0,98	0,09	0,002	<0,001	0,002
Total	6,46	6,18	5,83	5,51	8,75	7,54	0,53	0,446	0,003	0,001
Rétinol	6,46	7,83	7,88	6,80	9,43	7,48	0,48	0,151	<0,001	0,039
α -tocophérol	28,58	34,75	34,03	25,10	32,71	35,31	0,93	0,118	<0,001	0,038
Quantités secrétées (mg/j)										
Caroténoïdes										
Zéaxanthine	0,492	0,493	0,488	0,222	0,309	0,672	0,051	0,046	<0,001	<0,001
Lutéine	0,718	0,618	0,730	0,310	0,609	0,931	0,089	0,540	<0,001	<0,001
β -cryptoxanthine	0,156	0,082	0,166	0,133	0,130	0,107	0,133	0,180	0,268	0,102
Tout-trans β -carotène	2,611	1,846	1,220	1,896	2,979	2,405	0,278	0,188	0,046	<0,001
9-cis β -carotène	0,120	0,038	0,024	0,028	0,054	0,022	0,022	0,258	0,094	0,029
13-cis β -carotène	0,917	0,521	0,399	0,758	0,885	0,620	0,061	0,021	<0,001	<0,001
Total	5,013	3,598	3,028	3,349	4,967	4,757	0,386	0,590	0,440	<0,001
Rétinol	5,080	4,575	4,102	4,130	5,339	4,658	0,294	0,461	0,059	0,003
α -tocophérol	22,64	20,37	17,64	15,34	18,64	22,26	0,801	0,122	0,274	<0,001

* Les valeurs présentées sont les moyennes des 8 vaches de chaque lot. Semaine 24 : mi-juin, semaine 30 : fin juillet, semaine 34 : fin août.

TABLEAU 2 : Evolution des teneurs moyennes des laits en micronutriments et des quantités secrétées correspondantes pour les deux prairies expérimentales au cours de la saison de pâturage.

TABLE 2 : Evolution of the average micronutrient content of milk and corresponding quantities that were produced for the two experimental grassland plots over the pasture season.

tées dans le tableau 4. **Les concentrations des composés sont significativement différentes selon les stades de prélèvements à l'exception de la lutéine époxyde, de la β -cryptoxanthine et des tocophérols.** D'une manière générale, **pour les principaux caroténoïdes et les composés phénoliques, les concentrations étaient les plus élevées au stade feuillu** et diminuaient progressivement au cours du printemps jusqu'au stade floraison (figure 2c). Cela se poursuivait au cours de l'été pour les composés phénoliques mais pas pour les caroténoïdes, dont les concentrations avaient tendance à être supérieures au stade repousse par rapport au stade floraison.

Mode de gestion des parcelles	Fauche précoce	Fauche tardive	Pâturage - fauche	Pâturage lent	Pâturage rapide
Nombre d'échantillons	14	8	15	27	20
Graminées (%)	90,8	83,4	80,8	80,2	87,4
Dicotylédones (%)	9,2	16,6	19,3	19,8	12,6
- Diverses (%)	3,4	11,4	12,2	10,8	5,9
- Légumineuses (%)	5,8	5,2	7,0	8,9	6,7

TABLEAU 3 : Part des familles botaniques dans les prairies du réseau d'exploitations, établie par relevé sur les parcelles (en % de la biomasse).

TABLE 3 : Percentage of botanical families in grassland belonging to the network of local farms, based on collected samples (% of biomass).

A stade égal, **les teneurs en caroténoïdes ou en γ -tocophérol de l'herbe des prairies n'étaient pas différentes significativement selon le mode de gestion des parcelles** (tableau 5). Néanmoins, en ce qui concerne les caroténoïdes, il faut noter que, si les concentrations étaient équivalentes entre les différentes classes de parcelles au printemps, il n'en était pas de même lors de la repousse d'automne (données non présentées). En effet, les concentrations de caroténoïdes étaient supérieures dans les échantillons des prairies fauchées tardivement par rapport aux autres prairies (846 vs 472 $\mu\text{g/g}$ de MS). Ainsi, début octobre, les valeurs observées pour les prairies de fauche tardive étaient de l'ordre de grandeur de celles des prairies au début du printemps (841 $\mu\text{g/g}$ de MS). En ce qui concerne l' α -tocophérol, les concentrations dans l'herbe sur la période de l'étude étaient plus élevées dans les prairies déprimées par rapport à celles utilisées uniquement pour le pâturage (tableau 5 ; $p < 0,05$), les prairies de fauche précoce ou tardive ayant des concentrations intermédiaires. Enfin, les concentrations en composés phénoliques totaux se sont avérées supérieures dans l'herbe des prairies fauchées tardivement ou pâturées avec une vitesse de rotation lente à celles de l'herbe des autres prairies (tableau 5 ; $p < 0,05$).

• Teneurs et composition en micronutriments du lait

Contrairement à l'étude en conditions contrôlées, **les laits des vaches collectés dans les exploitations ne**

Somme de températures (°j) (stade du dactyle)	400 °j (feuillu)	700 °j (début épiaison)	1 200 °j (floraison)	Mi-septembre (repousse)	Ecart type	P : Stade
Caroténoïdes (mg/kg de MS)						
Zéaxanthine	20,82 ^a	13,92 ^b	15,25 ^b	18,69 ^{ab}	7,84	0,012
Lutéine	325,39 ^a	237,75 ^b	176,89 ^b	198,43 ^b	106,90	<0,001
Violaxanthine	158,56 ^a	97,76 ^b	69,06 ^b	91,51 ^b	52,23	<0,001
Néoxanthine	78,58 ^a	58,81 ^b	40,08 ^c	49,25 ^{bc}	27,60	<0,001
Anthéranthine	14,81 ^a	9,50 ^b	9,67 ^b	11,40 ^b	5,71	0,005
Lutéine époxyde	7,98	7,10	6,08	6,40	4,04	0,429
β-cryptoxanthine	0,36	0,18	0,50	0,21	0,96	0,688
Tout-trans β-carotène	185,30 ^a	128,44 ^b	90,69 ^c	125,15 ^b	58,81	<0,001
9-cis β-carotène	33,89 ^a	23,32 ^b	15,76 ^b	20,65 ^b	12,71	<0,001
13-cis β-carotène	15,66 ^a	10,44 ^b	8,10 ^b	10,07 ^b	5,11	<0,001
Total	841,36 ^a	587,22 ^b	432,07 ^b	531,77 ^b	263,66	<0,001
α-tocophérol (mg/kg MS)	122,8	102,4	95,7	112,8	39,6	0,114
γ-tocophérol (mg/kg MS)	40,1	39,7	41,2	37,3	14,6	0,872
Composés phénoliques totaux (mg éq. acide gallique/g MS)						
	7,91 ^a	7,34 ^a	5,70 ^b	4,45 ^c	2,01	<0,001

Les valeurs d'une même ligne ne présentant pas de lettre indiciaire commune sont significativement différentes au seuil $p = 0,05$

TABLEAU 4 : Evolution des concentrations moyennes en micronutriments de l'herbe au cours de la saison (moyenne par période des 22 prairies du réseau d'exploitations).

TABLE 4 : Evolution of the average micronutrient concentration of grass over the season (average per period for the 22 grassland plots belonging to the local farm network).

contenaient que 5 caroténoïdes quantifiables, la β-cryptoxanthine étant présente, au mieux, à l'état de trace (figure 2d). Le β-carotène représentait 64 à 70 % des caroténoïdes totaux du lait, majoritairement la forme tout-trans (43 à 53 % à lui seul), les 2 isomères cis se trouvant en proportions sensiblement égales. La part de lutéine variait de 21 à 26 % selon les échantillons, celle de la zéaxanthine, de 8 à 10 %. **Le dispositif n'a pas permis de mettre en évidence de différences significatives dans la composition des caroténoïdes du lait selon les périodes de prélèvement (pâturage des prairies à 700 °j vs 1 200 °j) ou la vitesse de rotation au pâturage** sur les prairies. De plus, ces paramètres ont eu des effets très modérés sur les teneurs en micronutriments des laits. Ainsi, aucune différence n'a été observée entre les laits des troupeaux menés en rotation rapide vs lente sur les prairies (tableau 6). Pour la plupart des composés étudiés, aucune différence n'a été observée non plus entre les périodes de prélèvement, sauf pour l'isomère tout-trans du β-carotène (et moins marqué pour l'isomère 9-cis) dont les concentrations étaient plus élevées vers 700 °j que vers 1 200 °j.

3. Discussion

■ Composition en caroténoïdes de l'herbe et du lait

Le profil chromatographique des extraits des plantes révèle la présence de 23 composés de la famille des caroténoïdes, principalement des xanthophylles. Les 10 plus abondants (représentant plus de 95 % de l'aire totale) sont identifiés (lutéine, zéaxanthine, violaxanthine, anthéranthine, néoxanthine, lutéine époxyde, β-cryptoxanthine et les 3 isomères du β-carotène) et ont été quantifiés (figures 2a et 2c ; tableau 4). L'ensemble des échantillons analysés dans ces 2 approches regroupe une plage de variabilité de conditions assez large et les résultats suggèrent qu'il existe peu de variation de composition des caroténoïdes de l'herbe à l'échelle de la prairie. Lorsque l'herbe est prélevée au même stade (dispositif réseau), le mode de gestion de la prairie ou la composition botanique ne semblent pas entraîner de variation de cette composition. On peut également noter quelques évolutions au cours de la saison quel que soit le mode de gestion des parcelles. Ainsi, l'étude en conditions contrôlées a permis

Mode de gestion des parcelles	Fauche précoce	Fauche tardive	Pâturage - fauche	Pâturage lent	Pâturage rapide	p : Gestion
<i>Nombre d'échantillons</i>	14	8	15	27	20	
Caroténoïdes totaux (μg/g MS)	536,5 ± 76,8	696,8 ± 101,8	568,4 ± 73,6	601,3 ± 55,0	606,9 ± 64,3	0,778
α-tocophérol (μg/g MS)	123,6 ^{ab} ± 10,9	105,0 ^{ab} ± 13,9	128,1 ^a ± 10,2	100,5 ^b ± 7,6	95,9 ^b ± 8,8	0,112
γ-tocophérol (μg/g MS)	46,5 ± 5,0	40,4 ± 6,6	43,6 ± 4,8	38,3 ± 3,6	33,1 ± 4,2	0,320
Composés phénoliques totaux (mg éq. acide gallique/g MS)	5,15 ^b ± 0,42	7,59 ^a ± 0,56	5,96 ^b ± 0,40	7,30 ^a ± 0,30	5,79 ^b ± 0,35	0,002

Les valeurs d'une même ligne ne présentant pas de lettre indiciaire commune sont significativement différentes au seuil $p = 0,05$

TABLEAU 5 : Comparaison des concentrations moyennes des micronutriments de l'herbe selon le mode de gestion des parcelles du réseau d'exploitations (analyse statistique de la variance type ANOVA en mesures répétées).

TABLE 5 : Comparison of the average micronutrient concentration of grass based on pasture practices used for plots belonging to the local farm network (repeated measures analysis of variance ANOVA).

	Pâturage lent		Pâturage rapide		Ecart type	Signification : P		
	671 ± 150	1 268 ± 308	753 ± 146	1 281 ± 113		Rotation	Période	Interaction
Somme de températures (° j)								
Nombre d'échantillons	7	6	6	4				
Teneurs moyennes (mg/kg de MG)								
Caroténoïdes								
Zéaxanthine	0,82	0,96	0,83	0,60	0,46	0,436	0,557	0,411
Lutéine	2,23	2,62	2,03	1,89	0,64	0,133	0,951	0,432
β-cryptoxanthine	-	-	-	-	-	-	-	-
Tout-trans β-carotène	4,91	4,32	5,17	3,56	0,86	0,678	0,003	0,252
9-cis β-carotène	0,95	0,90	0,96	0,71	0,24	0,420	0,061	0,361
13-cis β-carotène	0,80	1,25	0,72	0,82	0,48	0,203	0,163	0,365
Total	9,71	10,05	9,72	7,57	1,95	0,205	0,157	0,200
Rétinol	14,23	13,19	16,03	13,24	2,68	0,283	0,182	0,580
α-tocophérol	45,14	54,02	46,60	25,72	3,94	0,625	0,622	0,655
Quantités sécrétées (mg/l)								
Caroténoïdes								
Zéaxanthine	0,67	0,69	0,73	0,58	0,41	0,930	0,459	0,693
Lutéine	1,69	1,87	1,83	1,65	0,59	0,948	0,725	0,568
β-cryptoxanthine	-	-	-	-	-	-	-	-
Tout-trans β-carotène	3,85	3,20	4,65	3,20	1,39	0,377	0,061	0,599
9-cis β-carotène	0,74	0,65	0,83	0,63	0,25	0,695	0,091	0,662
13-cis β-carotène	0,63	0,92	0,62	0,80	0,45	0,717	0,230	0,791
Total	7,58	7,34	8,65	6,86	2,67	0,659	0,249	0,590
Rétinol	11,06	10,14	14,31	11,88	4,27	0,110	0,402	0,633
α-tocophérol	34,50	41,14	42,47	23,38	16,97	0,698	0,242	0,166

TABLEAU 6 : Evolution des teneurs moyennes des laits en micronutriments et des quantités sécrétées correspondantes, à 2 périodes de la saison de pâturage et selon la vitesse de rotation des troupeaux sur les parcelles du réseau d'exploitations.

TABLE 6 : Evolution of the average micronutrient content of milk and corresponding quantities that were produced at 2 different periods of the pasture season and based on the length of rotational cycles for plots belonging to the local farm network.

de montrer que les parts respectives de lutéine et de violaxanthine diminuent fin juillet au profit du tout-trans β-carotène et de la zéaxanthine, l'inversion de ces tendances début août permettant un retour à la composition initiale (pour les 2 parcelles). Une partie de ces variations s'explique probablement par le cycle d'action des pigments xanthophylles qui permet à la plante d'évacuer un excès d'énergie ou se protéger d'un épisode de sécheresse (CHEN *et al.*, 2011 ; FERNANDEZ-MARIN *et al.*, 2011). La somme des 3 xanthophylles (violaxanthine, anthéroxanthine, zéaxanthine) évolue simultanément à la concentration de tout-trans β-carotène qui se trouve être leur précurseur (CAZZONELLI et POGSON, 2010).

La composition en caroténoïdes du lait est différente de celle de l'herbe ingérée par les vaches. En effet, le β-carotène y est largement majoritaire (67 % des caroténoïdes totaux en moyenne) tandis que la lutéine, la zéaxanthine et beaucoup plus minoritairement la β-cryptoxanthine sont les seuls xanthophylles sécrétés par la glande mammaire. Les causes de cette modification importante ne sont pas totalement connues. Néanmoins, des études antérieures ont montré chez des vaches tarries nourries à l'herbe qu'une première cause de modification de composition des caroténoïdes correspondait au transit dans le tube digestif. En effet, la néoxanthine et la violaxanthine résistent mal à l'augmentation de température liée à l'entrée dans le compartiment digestif et leurs proportions s'avèrent fortement réduites après passage dans le rumen. Par la suite, la composition globale en caroté-

noïdes reste stable dans le contenu digestif jusqu'aux fèces (GRAULET *et al.*, 2006). La « simplification » du profil en caroténoïdes apparaît cependant dès le plasma et ne résulte donc pas d'une sélectivité de la glande mammaire. Une hypothèse pour l'expliquer pourrait être le prélèvement rapide des xanthophylles par les tissus, induisant un temps de séjour très court dans le compartiment sanguin. La présente étude montre par ailleurs que l'efficacité de transfert de l'herbe au lait est variable selon les caroténoïdes. De plus, nos résultats confirment les données de la littérature quant à la présence majoritaire du β-carotène dans le lait de vache, accompagné de lutéine, zéaxanthine et β-cryptoxanthine (NOZIÈRE *et al.*, 2006). La présence systématique des isomères *cis* du β-carotène dans le lait de vaches au pâturage est intéressante pour le consommateur, même si leur activité pro-vitaminique A est inférieure à celle de l'isomère tout-trans. De plus, des apports réguliers de lutéine et zéaxanthine dans l'alimentation au cours de la vie permettent de réduire le risque de dégénérescence maculaire de la rétine liée à l'âge (PINTEA *et al.*, 2011). Enfin, **l'activité anti-oxydante des caroténoïdes peut permettre de protéger les acides gras polyinsaturés particulièrement sensibles à l'oxydation (famille des oméga 3) présents dans la matière grasse laitière** (NOZIÈRE *et al.*, 2006 ; CAZZONELLI et POGSON, 2010). Il est donc important de pouvoir connaître les principaux facteurs de variation de la composition et de la teneur des caroténoïdes dans le lait. En complément des données de la littérature décri-

vant les variations selon les grands systèmes d'alimentation, nous avons cherché à mieux caractériser la variabilité de réponse chez la vache au pâturage, en particulier dans le contexte des prairies de moyenne montagne. Ainsi, quel que soit le type de prairie étudié (tableau 2), **les proportions des β -carotènes dans les caroténoïdes totaux du lait diminuent au cours de l'été** (en particulier entre la fin juillet et la fin août pour l'isomère tout-*trans*) **alors que celles de lutéine et de zéaxanthine augmentent**. De plus, les résultats ont indiqué que, d'une manière générale, **les caroténoïdes des laits des vaches pâturant une prairie peu diversifiée sont composés jusqu'à 80 % de β -carotènes alors que ceux-ci dépassent rarement 70 % dans les laits de vaches pâturant une prairie diversifiée**. Ces différences ne peuvent être reliées à celles des compositions observées précédemment pour les caroténoïdes de l'herbe. **Il existe probablement un mécanisme associé à la digestion ou au métabolisme de l'animal en lactation entraînant ces divergences de comportement dans le temps des carotènes et des xanthophylles**. Certainement, les propriétés physico-chimiques de ces composés (leur niveau de polarité principalement), qui conditionnent leur dynamique ainsi que leur devenir, jouent un rôle. Ainsi, les xanthophylles, moins polaires, sont plutôt associés aux lipides membranaires tandis que les carotènes sont inclus dans les gouttelettes lipidiques dans les formes de stockage ou de transport extracellulaire. Leur temps de séjour dans l'organisme peut donc être affecté différemment par divers facteurs, nutritionnels métaboliques ou physiologiques.

■ Variations des teneurs en micronutriments de l'herbe

L'herbe verte est une source importante de divers microconstituants pour le ruminant. Néanmoins, pour les caroténoïdes par exemple, il est bien connu que les apports seront nettement supérieurs si l'herbe est consommée sous forme fraîche (pâturage) que si elle est distribuée après conservation, comme dans le cas d'un foin fané au sol (NOZIÈRE *et al.*, 2006). Jusqu'à présent, peu d'études se sont concentrées sur les variations de teneur des microconstituants de l'herbe des prairies. La comparaison de plantes (le plus souvent 2 à 2) n'a pas permis de faire ressortir des tendances nettes liées aux familles botaniques. Pour la prairie dans sa globalité, quelques comparaisons ont été réalisées afin d'évaluer l'effet du stade végétatif et ont montré que la teneur en caroténoïdes dans la matière sèche diminue globalement, à l'échelle de la saison, avec le rapport feuilles/tige (NOZIÈRE *et al.*, 2006). Pour les composés phénoliques, les variations qui ont été observées (dans le mois de juin) ne décrivaient pas les mêmes tendances puisqu'il semblait y avoir un enrichissement transitoire en acides phénoliques alors que les concentrations en flavonoïdes diminuaient régulièrement (FRAISSE *et al.*, 2007). Cependant, les effets de la composition, du niveau de diversité botanique ou du mode de gestion de la parcelle, sur les teneurs en caroténoïdes, en tocophérols ou en composés phénoliques n'avaient pas été explorés.

Nos travaux confirment l'importance du stade de l'herbe. A une même date de prélèvement de l'herbe (dispositif en ferme expérimentale), les concentrations en caroténoïdes sont proportionnelles au pourcentage de feuilles vertes du couvert observé sur les deux parcelles F et D à l'exception de la première date. La prairie D, exploitée plus extensivement, comporte en effet un mélange d'espèces à des stades différents. De même, quel que soit le mode d'utilisation des parcelles, **les concentrations en caroténoïdes évoluent parallèlement au stade de l'herbe et au pourcentage de talles végétatives**. Le stade repousse en septembre-octobre, riche en organes feuillus, correspond bien à une réaugmentation des teneurs en caroténoïdes. Il a été toutefois surprenant d'observer la divergence de l'évolution des teneurs en α -tocophérol entre les 2 prairies participant au dispositif en ferme expérimentale, celles-ci étant très peu distantes. Cette comparaison indiquerait une interaction entre l'évolution temporelle des teneurs en vitamine E de l'herbe et le mode de gestion (ici, le niveau de chargement était le facteur principal) ou la composition botanique de la prairie (niveau de diversité et/ou stade végétatif). Le dispositif du réseau de parcelles en exploitations confirme cette hypothèse mais n'a pas permis de dégager d'explication plus tangible. Une étude spécifique à l'échelle de la plante semble nécessaire pour cela. Enfin, pour les deux dispositifs, une diminution importante des composés phénoliques entre le printemps et l'automne a été observée, concomitante de la diminution du pourcentage de dicotylédones observée tout au long de la saison y compris sur le stade repousse pour le réseau de parcelles.

Considérant simplement les données globales (teneurs en caroténoïdes et en polyphénols), **nos résultats tendent à minimiser l'importance de la composition botanique « fine » en faisant ressortir deux paramètres : le stade de l'herbe et le pourcentage de dicotylédones**, qui sont évidemment liés au mode de gestion de la prairie. En effet, nos résultats montrent que les teneurs en composés phénoliques sont corrélées à la contribution des légumineuses et plantes diverses à la biomasse. Les caroténoïdes sont quant à eux beaucoup plus concentrés dans l'herbe feuillue. On ne peut néanmoins pas exclure certaines situations qui pourraient interférer dans cette « règle » comme dans le cas de prairies intensives riches en dicotylédones représentées par un nombre limité d'espèces (exemple de prairies où on note la présence importante de pissenlit).

■ Variations des teneurs en micronutriments du lait de vaches à l'herbe

A notre connaissance, la comparaison de différents systèmes de production laitière en contexte herbager de moyenne montagne (basé sur des prairies permanentes) n'a encore jamais été réalisée sur le plan des apports en micronutriments aux vaches et de la composition des produits laitiers. Nos travaux ont mis en évidence que **les différences de teneurs des caroténoïdes de l'herbe des prairies**, observées soit selon les modes de gestion et le niveau de diversité floristique, soit selon la période de prélèvement, **se traduisent par la production d'un lait plus**

ou moins riche en β -carotène, principalement l'isomère tout-*trans*, caroténoïde majoritaire du lait. Ce composé semble être un bon indicateur de la richesse en caroténoïdes de l'herbe, par rapport à la lutéine par exemple qui, bien que toujours majoritaire dans l'herbe, n'est pas sécrétée dans le lait proportionnellement aux quantités ingérées. Réciproquement, on peut penser que plus l'herbe de prairie est riche en caroténoïdes (et en tout-*trans* β -carotène puisque leur répartition globale ne change pas malgré les variations de teneurs), plus la concentration du lait en β -carotène sera augmentée, après un temps de latence lié au métabolisme de ce composé dans l'organisme de la vache (NOZIÈRE *et al.*, 2006 ; CALDERON *et al.*, 2007). Les variations modérées des concentrations en vitamine A du lait sont à relier à celles du tout-*trans* β -carotène. Les concentrations en rétinol circulant dans le plasma et celles sécrétées dans le lait, par voie de conséquence, sont finement régulées et sont donc peu affectées par les différences de β -carotène ingéré (CALDERON *et al.*, 2007). Néanmoins, compte tenu des amplitudes observées pour ces dernières entre les lots F et D, la concentration en rétinol était supérieure dans le lait des vaches F.

CALDERON *et al.* (2007) ont montré que la concentration en vitamine E sécrétée dans le lait était proportionnelle aux quantités ingérées. Or l'augmentation de concentration en α -tocophérol que nous avons observée dans le lait au cours de l'été (tableau 2) ne semble pas dépendre des quantités ingérées, puisque la teneur en α -tocophérol de l'herbe était restée globalement stable. D'autres facteurs de variation pourraient être associés à la digestibilité de l'herbe, de ses constituants, au métabolisme ou à la physiologie de l'animal (équilibre lactation/gestation), modifiant l'utilisation corporelle de la vitamine E.

Au sein des prairies permanentes de moyenne montagne et à l'échelle de la prairie, l'hétérogénéité des pratiques et des compositions botaniques influence la teneur et la composition des micronutriments présents dans l'herbe. En effet, nous avons montré que les prairies les plus diversifiées sont les plus riches en polyphénols, en particulier à la première pousse, mais sont nettement plus pauvres en caroténoïdes, tout au long de la saison. Pour ces derniers composés, les différences observées dans l'herbe se répercutent, après un certain temps, au niveau des teneurs en caroténoïdes (et dans une moindre mesure en vitamine A) du lait. Ceci est à prendre en considération puisque ces composés sont également des pigments responsables de la coloration jaune du lait et des produits laitiers. Leurs variations de concentration dans le lait a donc des conséquences tant sur le plan sensoriel que nutritionnel vis-à-vis du consommateur.

Accepté pour publication,
le 9 février 2012.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BESLE J.M., VIALA D., MARTIN B., PRADEL P., MEUNIER B., BERDAGUÉ J.L., FRAISSE D., LAMAISON J.L., COULON J.B. (2010) : "UV-absorbing compounds in milk are related to the forage polyphénols", *J. Dairy Sci.*, 93, 2846-2856.
- CALDERON F., CHAUVEAU-DURIOT B., PRADEL P., MARTIN B., GRAULET B., DOREAU M., NOZIÈRE P. (2007) : "Variations in carotenoids, vitamins A and E, and color in cow's plasma and milk following a shift from hay diet to diets containing increasing levels of carotenoid and vitamin E", *J. Dairy Sci.*, 90, 5651-5664.
- CAZZONELLI C.I., POGSON B.J. (2010) : "Source to sink : regulation of carotenoids biosynthesis in plants", *Trends in Plant Sci.*, 15, 266-274.
- CHAUVEAU-DURIOT B., DOREAU M., NOZIÈRE P., GRAULET B. (2010) : "Simultaneous quantification of carotenoids, retinol, and tocopherols in forages, bovine plasma and milk : validation of a novel UPLC method", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397, 777-790.
- CHEN X., LI W., LU Q., WEN X., LI H., KUNAG T., LI Z., LU C. (2011) : "The xanthophyll cycle and antioxidative defense system are enhanced in the wheat hybrid subjected to high light stress", *J. Plant Physiology*, 168, 1828-1836.
- DAGET P., POISSONET J. (1969) : *Analyse phytologique des prairies. Applications agronomiques*, éd. CNRS-CEPE: Montpellier, vol. 48, 67 p.
- FARRUGGIA A., MARTIN B., BAUMONT R., PRACHE S., DOREAU M., HOSTE H., DURAND D. (2008) : "Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux ?", *INRA Productions Animales*, 21, 181-199.
- FERNANDEZ-MARIN B., MIGUEZ F., BECERRIL J.M., GARCIA-PLAZAOLA J.I. (2011) : "Dehydration-mediated activation of the xanthophylls cycle in darkness : is it related to desiccation tolerance ?", *Planta*, 234, 579-588.
- FRAISSE D., CARNAT A., VIALA D., PRADEL P., BESLE J.M., COULON J.B., FELGINES C., LAMAISON J.L. (2007) : "Polyphenolic composition of a permanent pasture: Variations related to the period of harvesting", *J. Sci. of Food and Agriculture*, 87, 2427-2435.
- GRAULET B., CHAUVEAU-DURIOT B., NOZIÈRE P., DOREAU M. (2006) : "Teneur et composition en caroténoïdes des contenus digestifs et du plasma chez la vache au pasturage", *13^e Rencontres Recherches Ruminants*, 13, 193.
- JEANGROS B., SCEHOVIC J., TROXLER J., BACHMANN H.J., BOSSET J.O. (1999) : "Comparaison de caractéristiques botaniques et chimiques d'herbages pâturés en plaine et en montagne", *Fourrages*, 159, 277-292.
- LUCAS A., COULON J.B., GROLIER P., MARTIN B., ROCK E. (2005) : "Nutritional quality of dairy products and human health", *Indicators of Milk and Beef Quality*; Hocquette J.F., Gigli S., eds. Academic Publishers, Wageningen, 163-178.
- MARTIN B., COULON J.B., HURTAUD C., GRAULET B., FERLAY A., CHILLIARD Y. (2009) : "Herbe et qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits laitiers", *Fourrages*, 199, 291-310.
- NOZIÈRE P., GRAULET B., LUCAS A., MARTIN B., GROLIER P., DOREAU M. (2006) : "Carotenoids for ruminants: From forages to dairy products", *Animal Feed Sci. and Technology*, 131, 418-450.
- PFLIMLIN A., PERROT C., PARGUEL P. (2005) : "Diversité des systèmes laitiers en France et en Europe. Les atouts des zones défavorisées pour les produits de qualité", *Fourrages*, 184, 493-512.
- PINTEA A., RUGINA D.O., POP R., BUNEA A., SOCACIU C. (2011) : "Xanthophylls protect against induced oxidation in cultured human retinal pigment epithelial cells", *J. Food Composition and Analysis*, 24, 830-836.
- REYNAUD A., FRAISSE D., CORNU A., FARRUGGIA A., PUJOS-GUILLOT E., BESLE J.M., MARTIN B., LAMAISON J.L., PAQUET D., DOREAU M., GRAULET B. (2010) : "Variation in content and composition of phenolic compounds in permanent pastures according to botanical variation", *J. Agriculture and Food Chemistry*, 58, 5485-5494.
- SCEHOVIC J. (1990) : "Tanins et autres polymères phénoliques dans les plantes de prairies : détermination de leur teneur et de leur activité biologique", *Revue Suisse Agricole*, 22, 179-184.
- SHANNON C.E., WEAVER W. (1949) : *The mathematical theory of communication*, University of Illinois press, Urbana, IL, 117 p.
- TUTIN T.G., HEYWOOD V.H., BURGESS N.A., VALENTINE D.M., MOORE D., WALTERS S.M., WEBB D.A. (1964-1993) : *Flora Europaea*, Cambridge University Press, Cambridge, 6 volumes.