

Analyses multivariées de l'effet du régime alimentaire sur la mobilisation des réserves lipidiques chez le dromadaire

A. Kamili¹ S. Messad² M. Bengoumi³
Y. Chilliard⁴ B. Faye^{2*}

Mots-clés

Camelus dromedarius – Méthode statistique – Régime alimentaire – Tissu adipeux – Etat nutritionnel – Maroc.

Résumé

L'étude de la répartition du nombre d'adipocytes par classe de tailles a montré que toutes les tailles étaient représentées chez toutes les chamelles étudiées mais avec des proportions variables. La variabilité de ces proportions a aidé à caractériser un animal gras d'un animal maigre avec le résultat pratique suivant : le profil adipocytaire des animaux gras était caractérisé par la prédominance des cellules des classes de tailles 87,5 µm, 100 µm, 112,5 µm et 125 µm qui présentaient une forte corrélation. On peut dès lors envisager qu'un suivi de la dynamique des réserves corporelles chez le dromadaire pourrait être effectué indifféremment à partir de l'une de ces classes. Une typologie des animaux sur la base de leurs profils adipocytaires a montré la forte hétérogénéité des individus à l'intérieur d'un même groupe. Cette hétérogénéité est devenue moins marquée vers la fin de la période d'essai où les individus d'un groupe avaient subi le même traitement nutritionnel et où, en effet, les profils adipocytaires gras et maigres ont été mieux distingués. Les divergences de classement des animaux dans les typologies obtenues au début et à la fin de l'expérimentation ont montré qu'il existait une forte interaction entre le profil adipocytaire des animaux et le régime alimentaire, confirmant leurs liens dynamiques.

■ INTRODUCTION

La capacité des camélidés à s'adapter à de fortes variations des disponibilités alimentaires dans les conditions arides est proverbiale. Cette propriété s'appuie sur des mécanismes d'épargne très performants. La connaissance des mécanismes régulant la lipogenèse et la lipomobilisation serait utile pour mieux maîtriser la conduite alimentaire des troupeaux dans la perspective d'intensification de l'élevage camelin, espèce capable de survivre et de produire pendant des périodes de sécheresse prolongée. Chez les ruminants

domestiques, la taille des adipocytes est fortement corrélée avec l'état d'engraissement et est utilisée en tant qu'indicateur de suivi de l'évolution des réserves lipidiques en fonction des apports alimentaires.

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un projet visant à élucider les mécanismes de régulation et d'adaptation du dromadaire à la sous-nutrition énergétique (1). L'objectif a été d'étudier la dynamique des profils adipocytaires dans différents contextes alimentaires chez un animal connu pour son adaptation aux conditions de pénurie et de disette.

■ MATERIEL ET METHODES

Animaux et approche expérimentale

L'expérimentation a été réalisée au centre d'insémination artificielle d'Ain Jemâa à Casablanca au Maroc durant cinq mois sur 14 chamelles vides, hors lactation, de 10 à 15 ans d'âge et de race

1. Division de la Santé animale, direction de l'Élevage, Agdal Rabat, Maroc.

2. Cirad, UPR Systèmes d'élevage, Montpellier, F-34398 France.

3. Département de Biochimie, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat Instituts, Maroc.

4. Inra, UR Herbivores, Saint-Genes-Champagnelle, F-63122 France.

* Auteur pour la correspondance

Cirad, UPR Systèmes d'élevage, TA C-18 / A, Montpellier, F-34398 France.

Tél. : +33 (0)4 67 59 37 03 ; e-mail : bernard.faye@cirad

Maghrebi. Après une période d'adaptation de quatre semaines où était distribuée une ration couvrant les besoins énergétiques, les chamelles ont été sous-alimentées (62 p. 100 des besoins) et suralimentées (128 p. 100 des besoins) suivant un schéma croisé avec deux périodes de huit semaines chacune. Ainsi ont été constitués trois lots : suralimenté/sous-alimenté (lot OV), sous-alimenté/suralimenté (lot UN), et témoin (C) alimenté normalement tout au long de l'essai. Le poids corporel et les paramètres baryométriques ont été mesurés à un rythme hebdomadaire. Des biopsies de la bosse ont été réalisées mensuellement afin de déterminer la taille des adipocytes.

Le fichier initial comprenait des données relatives au nombre d'adipocytes par classe de taille (tableau I) pour chacune des 14 chamelles étudiées à cinq dates différentes de la période d'étude (tableau II). A partir de ce fichier, cinq tableaux ont été créés dont chacun correspondait à une date donnée et dans lesquels chaque individu a été décrit par 10 variables (10 classes de tailles d'adipocytes). S'intéressant à l'étude de la répartition des adipocytes par classe de taille plutôt qu'à leur nombre, le nombre d'adipocytes par classe de taille a été rapporté au nombre total. La première classe (C1) a été éliminée de l'étude, le nombre de cellules et leur variabilité étant très faibles dans cette classe de taille.

Approche statistique

L'analyse factorielle permet une description des structures des tableaux de données à l'aide de présentations graphiques synthétiques. Ainsi, les graphiques de l'analyse factorielle permettent de visualiser des regroupements, des oppositions et les tendances, difficiles à examiner avec des grands tableaux de nombres.

La présente analyse a concerné un cube de données (i, j, k) : pour chaque chamelle i (i = 14), les auteurs disposaient de la répartition des adipocytes dans les j classes de tailles (j = 9) à k dates différentes (k = 5). A chaque date, les animaux ont été soumis à des régimes alimentaires différents (OV : suralimenté/sous-alimenté ; UN : sous-alimenté/suralimenté ; C : témoin) (figure 1).

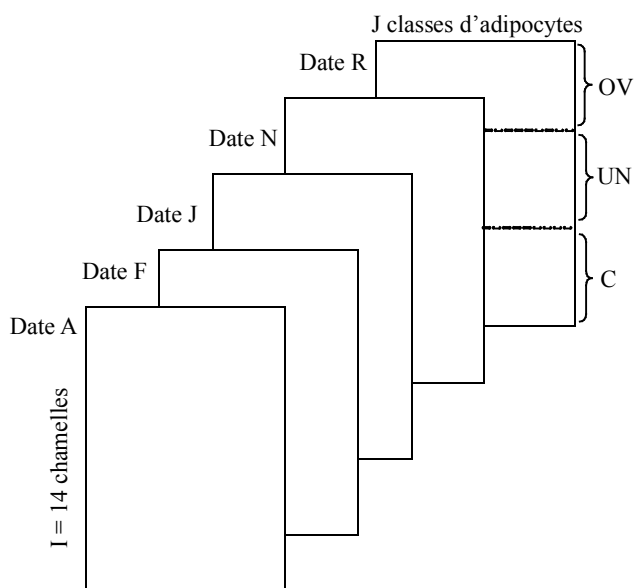


Figure 1 : représentation schématique du jeu de données ; k = 5 tableaux-dates décrivant les I = 14 chamelles soumises à trois régimes alimentaires (OV : suralimenté/sous-alimenté ; UN : sous-alimenté/suralimenté ; C : témoin) à partir de J = 9 classes de tailles d'adipocytes.

Tableau I

Diamètre correspondant à chaque classe de taille des adipocytes

Classe	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Diam. (µm)	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125

Tableau II

Les cinq dates de l'étude

Date	Evénement
A (- 7 j)	Période d'adaptation avant le début du régime alimentaire
F (+ 28 j)	Milieu de la première étape
J (+ 56 j)	Inversion du régime alimentaire, début de la deuxième étape
N (+ 84 j)	Milieu de la deuxième étape
R (+ 112 j)	Fin de la période d'étude

La stratégie d'analyse a consisté en quatre étapes :

- les analyses des tableaux temporels de façon séparée afin de réaliser une typologie des classes d'adipocytes à chacune des dates [cinq analyses en composantes principales normées (ACP) séparées] et comparaison des facteurs identifiés ;
- la classification des individus à chacune des dates par classification ascendante hiérarchique en utilisant le critère d'agrégation de Ward (9) permettant d'identifier des types de profils d'adipocytes pour chaque date ;
- l'analyse simultanée des tableaux temporels par l'analyse factorielle multiple (AFM) (8, 9) permettant d'identifier les facteurs communs aux différentes dates et de représenter sur un même plan factoriel les individus-dates (ou trajectoires des profils adipocytaire) et les corrélations entre facteurs de chacun des tableaux indicé dans le temps ;
- la représentation des groupes sur le plan factoriel en fonction du régime alimentaire aux différentes dates.

Les méthodes utilisées ont été mises en œuvre à l'aide du logiciel d'analyse graphique et statistique R (19), et de la bibliothèque de fonctions ADE4 (2, 7) dédiée aux méthodes d'analyses factorielles.

■ RESULTATS

Typologie des classes d'adipocytes par date

Cinq ACP normées ont été réalisées sur les données transformées. L'étude des diagrammes des valeurs propres a montré que la répartition de la variance sur les axes factoriels était relativement identique pour les cinq dates étudiées. L'examen des plans factoriels des analyses par date a montré également une structure de corrélations entre les classes de tailles d'adipocytes par dates relativement proches.

Au cours des cinq dates, le premier facteur, représentant environ 50 p. 100 de la variance totale du nuage de points (tableau III), a opposé les classes de grandes tailles (C7, C8 et C9) aux classes de tailles moyennes (C3, C4 et C5). Le second facteur, exprimant une

Tableau III

Décomposition de l'inertie (en % du total) projetée sur les trois premiers facteurs à chaque date (A : - 7 j ; F : + 28 j ; J : + 56 j ; N : + 84 j ; R : + 112 j)

	Date A	Date F	Date J	Date N	Date R
F1	50,73	46,96	50,66	56,60	54,70
F2	27,09	22,32	21,19	21,51	26,29
F3	7,87	11,33	14,89	10,05	10,27

quantité d'inertie moins importante mais non négligeable, a opposé les deux classes C2 et C6. La teneur en C6 a donc été indépendante des autres classes de tailles des adipocytes, mais négativement corrélée avec la teneur en adipocytes appartenant à la classe C2.

Classification des individus par date

L'étude des diagrammes des indices de niveaux et des arbres hiérarchiques des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées à chaque date a montré que la population des chamelles étudiées pouvait être répartie en trois classes. La représentation de ces trois classes d'individus sur les cinq plans factoriels (un plan par date) montre une grande hétérogénéité intragroupe et intergroupe des chamelles étudiées ; elle est devenue moins importante au cours des trois dernières dates, indiquant que la variabilité intragroupe diminuait en faveur de la variabilité intergroupe (figure 2).

Chacun des groupes de chamelles était caractérisé par un profil adipocytaire donné (figure 3). La typologie des classes de tailles *via* les répartitions moyennes a permis de mieux visualiser la dynamique des profils adipocytaires de chacun des groupes retenus par

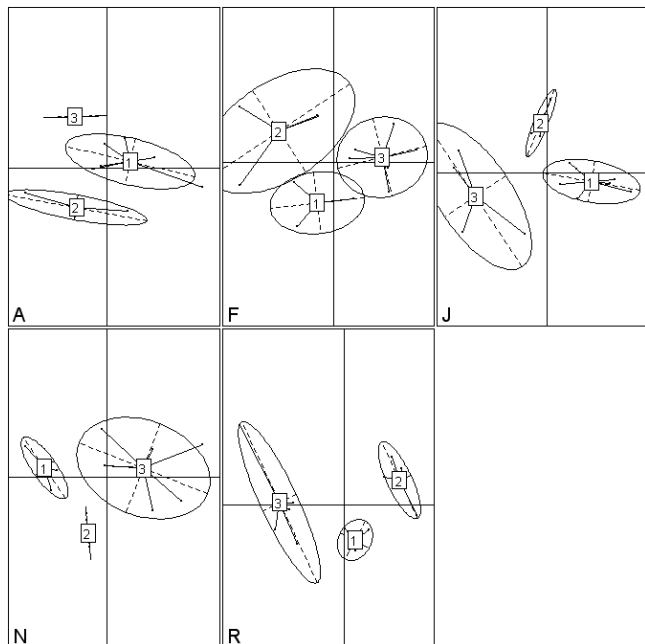


Figure 2 : représentation des classes de la partition (groupe de chamelles) retenues après la classification ascendante hiérarchique sur le plan factoriel 1-2 de l'analyse en composantes principales normées réalisée à chaque date (A : - 7 j ; F : + 28 j ; J : + 56 j ; N : + 84 j ; R : + 112 j).

la classification ascendante hiérarchique montrant des profils plutôt « maigres » (par exemple A3), « moyens (par exemple R1) ou « gras » (par exemple R2).

Analyse simultanée des tableaux indicés par date

Lorsque les mêmes individus étaient décrits par plusieurs groupes de variables, l'AFM permettait d'étudier un certain nombre de questions concernant :

- les classes de tailles d'adipocytes clés agissant sur la variabilité du profil adipocytaire des animaux aux différentes dates étudiées ;
- la construction d'une typologie des chamelles qui tenait compte de la caractérisation de leurs profils adipocytaires à chacune des dates ;

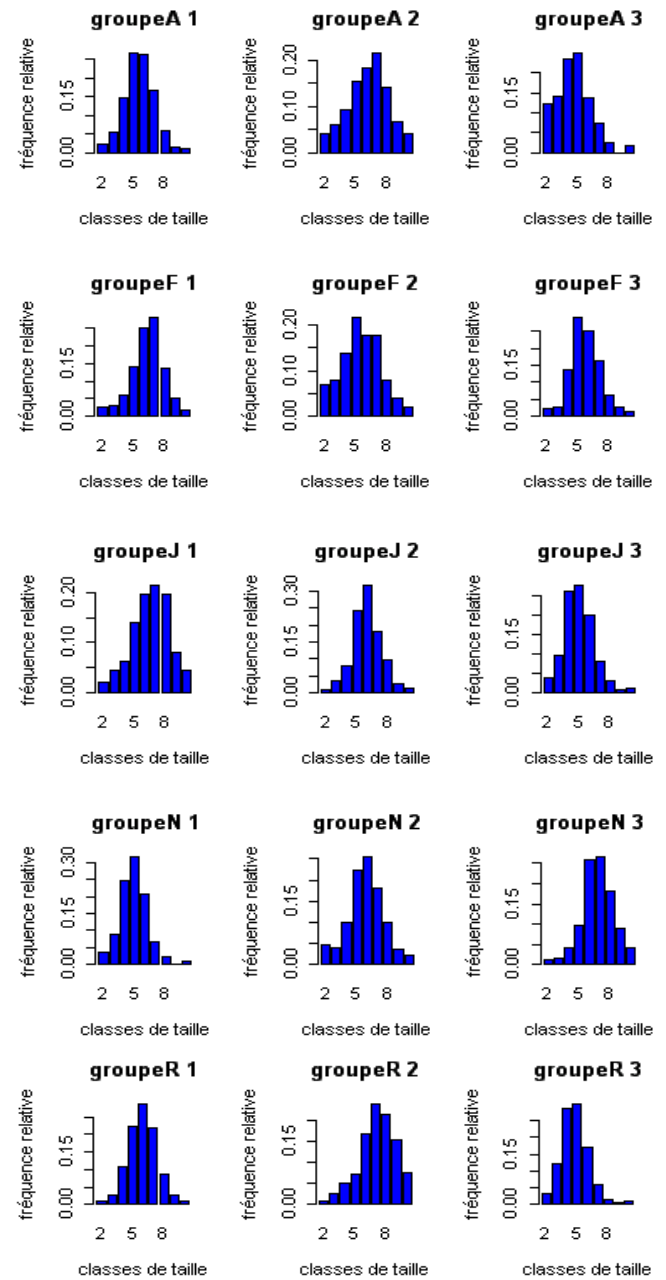


Figure 3 : représentation des profils adipocytaires moyens par date (A : - 7 j ; F : + 28 j ; J : + 56 j ; N : + 84 j ; R : + 112 j) pour les trois classes obtenues après classification ascendante hiérarchique. Les classes de tailles des adipocytes sont en abscisse et la fréquence moyenne du nombre d'adipocytes en ordonnée.

– l'adaptation au régime alimentaire ou la contribution des groupes de variables (classes de tailles d'adipocytes) par date dans la typologie des profils adipocytaires.

L'étude de la représentation des variables sur le plan factoriel 1-2 de l'AFM (figure 4) a montré que les variables les plus corrélées avec le premier facteur étaient, d'une part, les classes de tailles C7, C8 et C9 et, d'autre part, C4 et C5, et ce, presque pour toutes les dates. Les variables les plus corrélées avec le second axe étaient les classes de tailles C2 et C3 qui s'opposaient à la classe de taille C6 de manière identique pour toutes les dates. Ces résultats recoupaient donc ceux des ACP séparées (pour chaque date) : il existait une assez grande stabilité dans la répartition des adipocytes dans les classes de tailles au cours de l'expérimentation.

En effet, l'étude de la relation entre les classes de tailles des adipocytes indicés dans le temps sur le plan factoriel de l'AFM a montré que la première composante était un facteur commun aux classes d'adipocytes pour les dates de - 7 jours (période d'adaptation), 56 j (date d'inversion du régime alimentaire) et 112 j (fin de la période d'étude). La date 28 j (moitié de la première étape) était bien corrélée avec la deuxième composante du plan AFM, alors que la date 84 j (milieu de la deuxième période d'étude) était mal représentée sur ce plan factoriel (figure 5). Les trois premières dates correspondaient aux dates de début, d'inversion et de fin du régime alimentaire, renforçant l'hypothèse d'intervention du régime alimentaire dans l'explication de la dynamique des profils d'adipocytes.

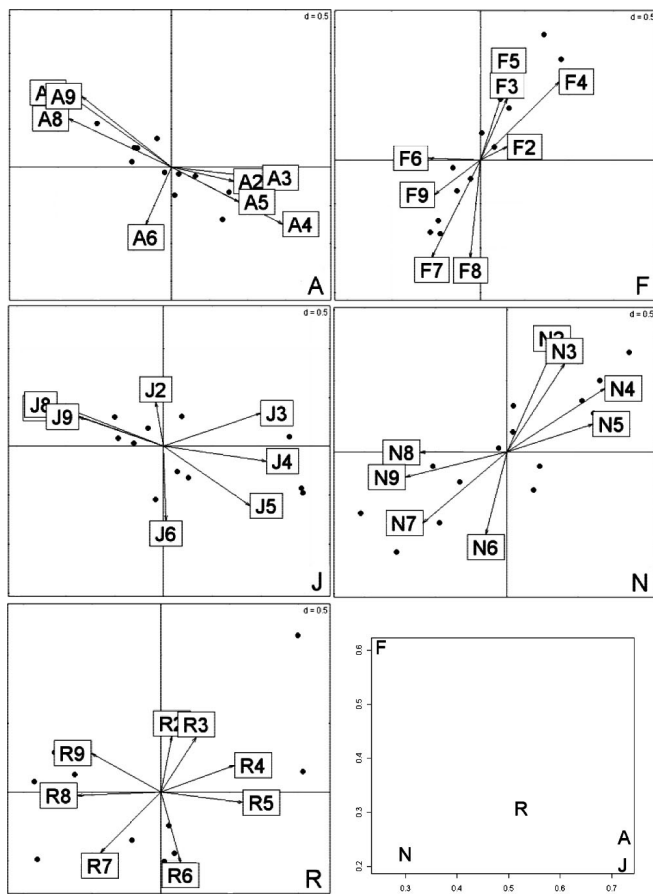


Figure 4 : représentation des variables classes de tailles d'adipocyte par date (A : - 7 j ; F : + 28 j ; J : + 56 j ; N : + 84 j ; R : + 112 j) sur le plan 1-2 de l'analyse factorielle multiple. Représentation de la contribution des tableaux-dates à l'analyse factorielle multiple sur le plan factoriel 1-2 (en bas à droite).

Etude du facteur régime alimentaire

L'étude de la répartition des groupes d'individus selon leur régime alimentaire, sur les plans factoriels des ACP séparées pour les deux premières dates, a montré que les centres de gravité (OV, UN et C) étaient proches les uns des autres, ce qui pouvait signifier que ce facteur ne constituait pas un critère de distinction entre les trois lots de chamelles. Cependant, à partir de la troisième date, les centres de gravité des trois régimes se sont distingués. Ainsi, le groupe C a eu tendance à se démarquer vers les profils gras. Le groupe UN s'est positionné du côté des profils maigres, à l'exception de la période 84 j. Enfin, le groupe OV a présenté un profil gras en fin de période de suralimentation (56 j), pour revenir à un profil moyen au cours des deux périodes suivantes de sous-alimentation.

Un test de signification de Monte-Carlo, basé sur les permutations aléatoires des animaux dans les différents régimes (22), a permis d'évaluer l'effet du régime alimentaire sur le profil adipocytaire des groupes de chamelles étudiées. Le test a montré l'absence d'effet significatif (date - 7 j : 0,70 ; + 28 j : 0,61 ; + 56 j : 0,27 ; + 84 j : 0,13 ; + 112 j : 0,26). Toutefois, le risque d'erreur de première espèce (valeur p) a décru sensiblement à partir de la date + 56 j, laissant supposer que le régime alimentaire aurait pu avoir un effet plus important si sa durée d'application avait été plus longue.

L'effet du régime alimentaire était probablement présent mais ne s'est pas exprimé du fait de la durée courte du traitement nutritionnel, d'une part, et de l'hétérogénéité intragroupe d'autre part. En effet, l'analyse des trajectoires-profils individuels (figure 6) a montré qu'il y avait une forte interaction entre le profil adipocytaire initial (premier point de la trajectoire à la date - 7 j) de l'individu et le régime alimentaire auquel il était soumis. En effet, les projections des individus ayant été soumis au même régime (par exemple, première ligne de la figure 6) n'étaient pas superposables et dépendaient du profil adipocytaire au début de l'expérimentation. La variabilité des trajectoires-profils adipocytaires n'était donc pas homogène à l'intérieur d'un même régime.

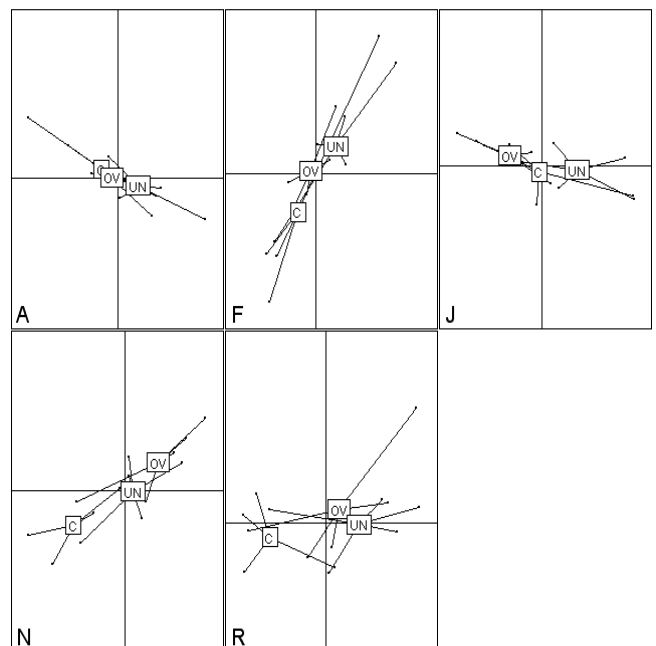


Figure 5 : représentation des chamelles en fonction du régime alimentaire (OV : suralimenté/sous-alimenté ; UN : sous-alimenté/suralimenté ; C : témoin) sur le plan 1-2 des analyses factorielles séparées par date (A : - 7 j ; F : + 28 j ; J : + 56 j ; N : + 84 j ; R : + 112 j).

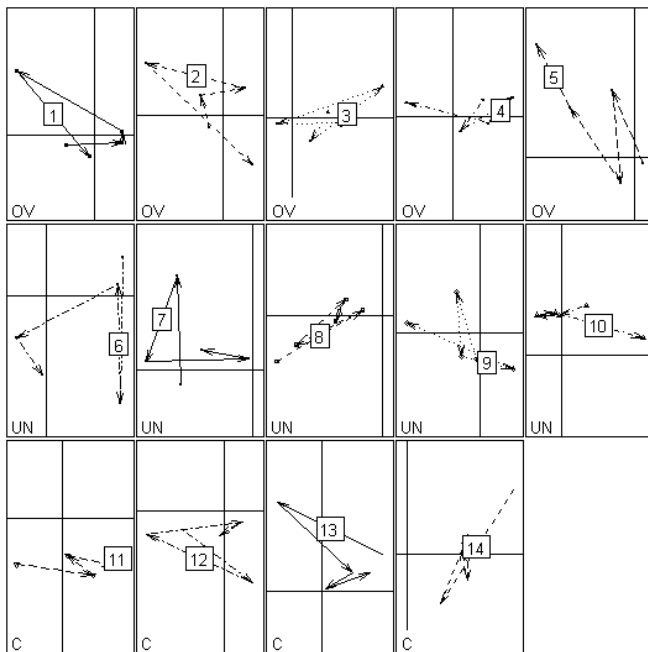


Figure 6 : représentation des trajectoires de profils adipocytaires des 14 chamelles regroupées par régime alimentaire (OV : suralimenté/sous-alimenté ; UN : sous-alimenté/suralimenté ; C : témoin) sur le plan factoriel 1-2 de l'analyse factorielle multiple. Chaque point représente le profil adipocytaire de la chamelle à une date donnée (- 7 j, + 28 j, + 56 j, + 84 j, + 112 j). Le sens des flèches indique la chronologie des dates.

DISCUSSION

L'habilité des ruminants à mobiliser et à reconstituer leurs réserves graisseuses est largement utilisée dans la gestion des élevages. Pendant les périodes de jeûne, les ruminants usent de leurs réserves afin de maintenir leur productivité. Leur survie implique que le tissu adipeux mobilisé est efficacement régénéré (lipogénèse) quand l'alimentation est disponible (3, 10). Ainsi, les cycles de dépôt et de mobilisation des lipides sont essentiels pour la reproduction, la lactation et les adaptations au milieu.

La croissance du tissu adipeux chez le ruminant est essentiellement due au remplissage de la vacuole lipidique des adipocytes (15). Elle est, de ce fait, liée à la taille des adipocytes (15). Sebastien et coll. (23) postulent que la taille des adipocytes est plus difficile à observer dans le tissu sous-cutané que dans le tissu adipeux interne. Ceci peut être attribué à la faible capacité de ce tissu pour le stockage des lipides comme chez les ovins. La distribution des différentes tailles d'adipocytes donne une information pratique sur le potentiel d'engraissement des animaux (6). Les mécanismes de développement du tissu adipeux ont été largement étudiés chez les ovins, les rongeurs, les porcins et les bovins (20).

Le tissu adipeux se dépose dans différents endroits spécifiques qui sont similaires chez tous les mammifères. Cependant, la proportion varie entre les espèces et est influencée par l'âge. Des données suggèrent que le gras abdominal change largement en corrélation avec le poids de la carcasse. Chez le dromadaire, les réserves adipeuses sont principalement stockées au niveau de la bosse et autour des reins. Comme chez les autres ruminants, le tissu adipeux du dromadaire est constitué de cellules capables de stocker les lipides dans leurs cytoplasmes (adipocytes). Ainsi, la taille de ces adipocytes dépend de la quantité du gras intracellulaire stocké (11). La répartition de la graisse sur les parties anatomiques semble plutôt

être due à des différences dans le nombre des adipocytes qu'à des variations de tailles des cellules (4). Cependant, le changement des réserves lipidiques chez le dromadaire n'est pas bien connu, et les données et les analyses sur les mesures de la taille des adipocytes sont peu disponibles (13).

L'absence de relation entre la taille des adipocytes de la bosse et celle du gras périrénal paraît confirmer la différence dans les capacités de stockage (11). La croissance du tissu adipeux étant liée à la taille des adipocytes (15), ce résultat a été exploité pour étudier l'effet du régime alimentaire sur l'état d'engraissement du dromadaire. Chez les 14 chamelles étudiées, la corrélation entre les cellules de grandes tailles (87,5 µm, 100 µm, 112,5 µm et 125 µm) a été plus forte que celle entre les cellules de petites et de moyennes tailles. Par conséquent, la caractérisation d'un profil adipocytaire gras peut être basée sur le suivi de l'une de ces classes de tailles des cellules adipeuses.

Au cours des trois premières dates de l'expérimentation, la distinction entre les trois lots de chamelles n'a pas été nette. Cependant, à partir de la troisième date qui correspondait à la fin de la première période et au début de la deuxième (inversion du régime alimentaire), les trois groupes de chamelles, OV, UN et C, ont commencé à se distinguer les uns des autres du point de vue de leur profil adipocytaire. Ces résultats témoignent en faveur de la présence de changements adipocytaires en fonction du régime alimentaire reçu. En outre, le régime alimentaire nécessite une certaine durée pour manifester son effet sur la mobilisation et la reconstitution des réserves corporelles chez les chamelles.

Il y a eu une grande hétérogénéité intragroupe des chamelles étudiées (état d'engraissement différent des chamelles appartenant au même groupe, au début de l'expérimentation) qui a été moins marquée au cours des trois dernières dates, où la distinction entre les groupes d'individus est devenue plus nette. Une comparaison inter-date des profils moyens a montré que la typologie des individus suivait une dynamique dépendante entre autres du régime alimentaire. Cette typologie est devenue de plus en plus nette au cours des dernières dates où les profils adipocytaires gras et maigres ont été mieux distingués. L'étude des histoires des individus appartenant au même groupe (retenu par la classification ascendante hiérarchique) a montré qu'ils étaient de lots différents, mais ils ont eu à la fin de la période de l'essai des profils relativement identiques. Ces résultats renforcent l'hypothèse qu'il y a une forte interaction entre le profil adipocytaire initial et le régime alimentaire reçu par la suite. En effet, le régime alimentaire a certainement eu un effet sur la mobilisation des réserves corporelles chez le dromadaire, même s'il a été relativement masqué par l'hétérogénéité intragroupe et la courte durée du traitement nutritionnel. Ces données sont en concordance avec les résultats de Chilliard et coll. (6) qui affirment que l'adaptation des ruminants à la sous-nutrition résulte de nombreux changements digestifs, métaboliques et endocriniens dont l'importance relative dépend largement de la durée et la sévérité de la restriction alimentaire. Par conséquent, la durée de survie des animaux dépend du niveau des réserves corporelles avant la sous-nutrition ainsi que des limites cinétiques et physiologiques de la mobilisation adipeuse et protéique.

Ces résultats montrent également que la dynamique (mobilisation et reconstitution) des réserves lipidiques chez le dromadaire est lente par rapport aux autres espèces. Cette lenteur dans la mobilisation et la reconstitution suggère, d'une part, une autre forme d'adaptation des dromadaires aux conditions de sous-nutrition (1) ou peut également être un indicateur de l'implication d'autres formes de réserves lipidiques, comme le gras périrénal et le mésentère (12, 16), ou encore d'autres dépôts adipeux au niveau des côtes, du sternum et du flanc (18). D'autre part, elle peut être expliquée

par le siège du tissu adipeux. En effet, le taux de croissance du tissu adipeux varie largement selon la localisation et le stade de la période de croissance (21).

Le lot d'animaux témoins a montré une tendance à avoir une prédominance des adipocytes de classes de tailles beaucoup plus grandes que moyennes, et les lots UN et OV se sont approchés tous les deux du profil moyen au cours des deux dernières dates. En effet, le lot témoin, comparé aux deux autres, n'a pas subi le stress de changement du régime alimentaire. Par conséquent, il a pu profiter de l'énergie apportée par le régime alimentaire suivi pour satisfaire ses besoins d'entretien et d'emmagasiner le reste sous forme de réserves lipidiques au niveau de la bosse. Cependant, les chameilles des lots OV et UN, ayant subi ce stress nutritionnel, ont eu tendance à mobiliser ou reconstituer lentement leurs réserves adipeuses. La restriction alimentaire cause une hypotrophie des tissus adipeux. Les animaux sous-nourris ont des cellules adipeuses plus petites que ceux qui sont bien nourris et ont le même poids [Geay et Robelin, non publié, 1985, cité par Robelin (21)]. Il semble que la restriction alimentaire induit une réduction temporaire d'adiposité qui n'est pas complètement restaurée pendant la période de recouvrement (21).

Ces données laissent supposer que, d'une part, les besoins énergétiques du dromadaire peuvent être inférieurs à ce qui est recommandé (14, 25). D'autre part, la tendance du lot témoin à avoir des adipocytes de grandes tailles a montré que la reconstitution des réserves lipidiques chez les camelins se faisait par remplissage de la vacuole lipidique des adipocytes comme chez les autres ruminants. Robelin (20) montre que la croissance postnatale du tissu adipeux chez les ruminants consiste essentiellement en une hypertrophie avec une hyperplasie significative durant la période d'engraissement.

Chez les bovins, la taille des cellules adipeuses augmente constamment et significativement, puis se stabilise en fonction des changements du poids corporel. Ainsi la cellularité peut expliquer clairement la hiérarchie impliquée dans la croissance relative du tissu adipeux chez les ruminants (20).

Plusieurs études ont montré que la taille des adipocytes a été utilisée comme marqueur de l'âge, de l'adiposité et de l'accumulation des lipides pour indiquer les changements métaboliques qui accompagnent ou suivent l'accumulation des lipides modifiés. Il a été également montré que la taille des adipocytes a un effet causatif sur les activités métaboliques. Ainsi, ils peuvent dramatiquement influencer le métabolisme cellulaire. Une relation étroite

entre la composition des acides gras et la taille des adipocytes chez des bouvillons en phase d'engraissement a pu être observée (17). Cette étude a également mis en évidence la présence d'une relation étroite entre la lipogenèse et la taille des adipocytes isolés chez des bouvillons Holstein en période d'engraissement (17).

Récemment, de nouvelles fonctions d'adipocytes ont été trouvées. Les adipocytes produisent et secrètent une variété d'hormones et d'autres facteurs liés à la lipogenèse : IGF-I, adiposine et leptine (24). L'habilité à sécréter ces hormones ou facteurs peut être variable en fonction de la croissance des adipocytes. Elle peut être l'une des causes du changement de la lipogenèse des adipocytes de différentes tailles chez des bouvillons pendant différentes périodes d'engraissement. D'autres études s'avèrent nécessaires afin d'éclaircir le mécanisme d'action de la taille des adipocytes (17) et le rôle des hormones telles que la leptine chez le dromadaire (5).

■ CONCLUSION

L'utilisation des méthodes classiques d'analyses factorielles et de classification a permis de mettre en évidence l'effet de l'état nutritionnel sur la dynamique des réserves corporelles chez le dromadaire. L'hétérogénéité intragroupe, le nombre faible des individus et la durée courte du traitement nutritionnel ont été les principaux obstacles qui ont empêché de mieux visualiser l'effet du régime alimentaire sur la dynamique des réserves adipeuses chez les chameilles étudiées. En revanche, l'ensemble des analyses effectuées a permis de mettre en évidence la présence de deux groupes de tailles dont l'un est caractéristique du profil des individus gras et se réduit à une seule classe de taille (87,5 µm, 100 µm, 112,5 µm ou 125 µm), et l'autre décrit les individus maigres (37,5 µm, 50 µm et 62,5 µm).

Cette approche statistique est en faveur de la présence d'une forte interaction entre le profil adipocytaire initial des dromadaires et le régime alimentaire subi par la suite. De plus, elle renforce l'hypothèse que la mobilisation des réserves lipidiques chez le dromadaire est lente par rapport aux autres espèces et oriente les recherches vers une évaluation des besoins énergétiques réels de cette espèce.

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Prad n° 01-04, consacré à l'étude de la gestion des réserves corporelles chez le dromadaire.

BIBLIOGRAPHIE

1. BENGOUMI M., TABARANI A., SGHIRI A., FAULCONNIER Y., FAYE B., CHILLIARD Y., 2005. Effects of overfeeding and underfeeding on body weight, lipid content and cellularity in the dromedary camel. *Animal Res.*, **54**: 383-393.
2. CHESEL D., DUFOUR A.B., THIOULOUSE J., 2004. The ade4 package. I: One-table methods. *R News*, **4**: 5-10.
3. CHILLIARD Y., 1987. Revue bibliographique. Variations quantitatives et métabolisme des lipides dans le tissu adipeux et le foie au cours des cycles gestation-lactation chez la brebis et la vache. *Reprod. Nutr. Develop.*, **26**: 327-398.
4. CHILLIARD Y., 1989. Particularités du métabolisme des lipides et du métabolisme énergétique chez le dromadaire. *Options Méditerran. Sér. Sémin.* (2) : 101-110.

5. CHILLIARD Y., BENGOUMI M., DELAVAL C., FAULCONNIER Y., FAYE B., 2005. Body lipids and adaptation of camel to food and water shortage: new data on adipocyte size and plasma leptin. In: Faye B., Esenov P., Eds, Proc. int. Work. Desertification combat and food safety: the added value of camel producers, Ashkabad, Turkmenistan, 19-22 Apr. 2004. Amsterdam, The Netherlands, IOS Press, p. 135-145. (NATO Sci. Ser. Life and Behavioural Sciences, Vol. 362)
6. CHILLIARD Y., BOCQUIER F., DOREAU M., 1998. Digestive and metabolic adaptations of ruminants to undernutrition, and consequences on reproduction. *Reprod. Nutr. Dev.*, **38**: 131-152.
7. DRAY S., DUFOUR A.B., CHESEL D., 2007. The ade4 package. II: Two-table and K-table methods. *R News*, **7**: 47-52.
8. ESCOFIER B., PAGES J., 1994. Multiple factor analysis (Afmult Package). *Comput. Stat. Data Anal.*, **18**: 121-140.

9. ESCOPIER B., PAGES J., 1998. Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation, 3^e éd. Paris, France, Dunod.
10. FAULCONIER Y., BONNET M., BOCQUIER F., LEROUX C., HOCQUETTE J.F., MARTIN P., CHILLIARD Y., 1999. Régulation du métabolisme lipidique des tissus adipeux et musculaire chez le ruminant. Effets du niveau alimentaire et de la photopériode. *Prod. Anim.*, **12** : 287-300.
11. FAYE B., BENGOUIMI M., MESSAD S., CHILLIARD Y., 2001. Fat storage and adipocyte patterns in camel: a tool for management of reproduction. *Adv. Reprod.*, **5**: 10c.
12. FAYE B., BENGOUIMI M., MESSAD S., CHILLIARD Y., 2002. Estimation des réserves corporelles chez le dromadaire. *Revue Elev. Méd. vét. Pays trop.*, **55** : 69-78.
13. FAYE B., BENGOUIMI M., VIATEAU E., TOURRET M., CHILLIARD Y., 2001. Adipocyte patterns of adipose tissue in camel hump and kidney. *J. Camel Res. Pract.*, **8**: 29-33.
14. GUEROUALI A., WARDEH M.F., 1998. Assessing nutrients requirements and limits to production of the camel under simulated natural environment. *Camel Newsl.*, **15**: 32-42.
15. HOOD R.L., 1992. Relationship among growth, adipose cell size and lipid metabolism in ruminant adipose tissue. *Fed. Proc.*, **41**: 2555-2561.
16. KAMILI A., 2003. Contribution à l'études des réserves corporelles chez le dromadaire. Thèse Doct. Méd. vét., Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 107 p.
17. LONG M.H.E., ROH S.G., SHIBSAKI E., HIDAKA S., MATSUNAGA N., HIDARI H., 1998. The relationship between lipogenic activity and the size of adipocytes from subcutaneous adipose tissue of Holstein steers during the fattening period. *Anim. Sci. Technol.*, **69**: 424-432.
18. OLLIER A., CUYLLE G., PEZANT J.P., CHILLIARD Y., 1995. Reproductibilité de la notation de l'état corporel des vaches Pie noir. *Cah. tech. Inra*, **36** : 17-26.
19. R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>
20. ROBELIN J., 1981. Cellularity of bovine adipose tissues: developmental changes from 15 to 65 percent mature weight. *J. Lipid Res.*, **22**: 452-457.
21. ROBELIN J., 1986. Growth of adipose tissues in cattle, partitioning between depots, chemical composition and cellularity. *Livest. Prod. Sci.*, **14**: 349-364.
22. ROMESBURG H.C., 1985. Exploring, confirming and randomization tests. *Comput. Geosci.*, **11**: 19-37.
23. SEBASTIEN I., CHILLIARD Y., PURROY A., JAIME C., 1993. Supplémentation en céréales, état corporel et enzymes lipogéniques du tissu adipeux chez la brebis Aragonesa. *Ann. Zootech.*, **42**: 299-313.
24. VERNON R.G., 1992. Control of lipogenesis and lipolysis. In: Boorman K.N., Buttery P.J., Lindsay D.B., Eds, The control of fat and lean deposition. Oxford, UK, Butterworth Heinemann, p. 59-81.
25. WARDEH M.F., 1997. The nutrients requirements of the dromedary camels. The camel applied research and development network. Damascus, Syria, ACSAD/CARDN, 29 p.

Reçu le 07.07.2008, accepté le 20.11.2008

Summary

Kamili A., Messad S., Bengouimi M., Chilliard Y., Faye B. Multi-variate Analyses of the Effect of Feed Diet on the Mobilization of Fat Reserves in the One-Humped Camel

The study of the distribution of the number of adipocytes by size classes showed that all sizes were represented in all she-camels studied, but in variable proportions. The variability of the proportions helped to characterize fat from lean animals with the following practical result: the adipocyte profile of fat animals was characterized by the prevailing cells of size classes 87.5, 100, 112.5 and 125 μm , which were highly correlated. It is thus conceivable that monitoring dynamics of body reserves in camels could be carried out based on any one of these classes. A typology of the animals based on their adipocyte profiles showed high heterogeneity of individuals within the same group. This heterogeneity became less apparent toward the end of the trial period, when individuals in a group had been administered the same diet, and when fat and lean adipocyte profiles were better distinguished. The typologies obtained at the beginning and at the end of the experiment showed that the animals were grouped differently and thus that there was a high interaction between animal adipocyte profiles and diet, confirming a high interaction between the two.

Keywords: *Camelus dromedarius* – Statistical method – Diet – Adipose tissue – Nutritional status – Morocco.

Resumen

Kamili A., Messad S., Bengouimi M., Chilliard Y., Faye B. Análisis multivariados del efecto del régimen alimenticio sobre la movilización de las reservas de lípidos en el dromedario

El estudio de la repartición del número de adipositos por clase de tamaños, mostró que todos los tamaños se encontraban representados en todas las camellas estudiadas, pero con proporciones variables. La variabilidad de estas proporciones ayudó a caracterizar un animal gordo de un animal magro con el siguiente resultado práctico: el perfil adipocitario de los animales gordos se caracterizó por la predominancia de células de las clases de tamaños 87,5 μm , 100 μm , 112,5 μm y 125 μm las cuáles presentaron una fuerte correlación. Podemos entonces prever que un seguimiento dinámico de las reservas corporales en el dromedario podría efectuarse indiferentemente a partir de una de estas clases. Una topología de los animales, basada en los perfiles de adipositos, mostró la fuerte heterogeneidad de los individuos dentro de un mismo grupo. Esta heterogeneidad disminuyó marcadamente hacia el fin del periodo de estudio, cuando los individuos de un grupo habían recibido el mismo tratamiento nutricional y cuando, efectivamente, se distinguieron mejor los perfiles adipocitarios gordos y magros. Las divergencias de clasificación de los animales dentro de las topologías obtenidas al inicio y al final del experimento mostraron la existencia de una fuerte interacción entre el perfil adipocitario de los animales y el régimen alimenticio, confirmando sus relaciones dinámicas.

Palabras clave: *Camelus dromedarius* – Método estadístico – Dieta – Tejido adiposo – Estado nutricional – Marruecos.